



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Dovydas Užumeckas

**KAMERINĖS KONVEKCIINĖS KROSNIES TEMPERATŪROS
PASISKIRSTYMO TYRIMAS**

Magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Romualdas Dundulis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

KAMERINĖS KONVEKCIINĖS KROSNIES TEMPERATŪROS
PASISKIRSTYMO TYRIMAS

Magistro projektas
Mechanikos inžinerija (621H30001)

Vadovas

(parašas) Prof. dr. Romualdas Dundulis
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. dr. Gintautas Miliauskas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Dovydas Užumekas
(data)

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino

(Fakultetas)

Dovydas Užumeckas

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija, 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Kamerinės konvekcinės krosnies temperatūros pasiskirstymo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m.

_____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Dovydo Užumecko** baigiamasis projektas tema „Kamerinės konvekcinės krosnies temperatūros pasiskirstymo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardas ir pavardė įrašyti ranka)

(parašas)

Užumeckas Dovydas. Kamerinės konvekinės krosnies temperatūros pasiskirstymo tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Romualdas Dundulis; Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Technologiniai mokslai, Mechanikos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *Kamerinė krosnis, temperatūros pasiskirstymas, priverstinė konvekcija.*

2016. 61 p.

SANTRAUKA

Kamerinės konvekinės krosnys vis plačiau naudojamos įvairiose pramonės šakose. Padidėjus kompiuterių spartai ir ištobulėjus programoms, kurios gali daryti skaičiuojamosios skysčių dinamikos simuliacijas, kamerinių konvekcinių krosnių projektavimas smarkiai pasikeitė. Naujos kamerinės konvekinės krosnys turi ne tik atitikti aukštus kokybės reikalavimus, bet ir jos gamybos bei eksploatavimo kaštai negali būti aukšti.

Šiame darbe baigtinių tūrių metodu tiriamas oro srautų ir temperatūros pasiskirstymas tipinėje kamerinėje konvekcinėje krosnyje. Didelis dėmesys skiriamas priverstinės konvekcijos komponentams: ventiliatoriaus mazgui ir oro tėkmės kanalui. Pateikiami pasiūlymai, kaip būtų galima pagerinti temperatūros pasiskirstymo tolygumą kamerinėje konvekcinėje krosnyje.

Užumeckas, Dovydas. *Analysis of heat distribution in convection chamber heater*. Master's Final Project / supervisor prof. dr. Romualdas Dundulis;, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology

Study area and field: Technological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: *Chamber heater, temperature distribution, forced convection*.

Kaunas, 2016. 61 p.

SUMMARY

Convection chamber heaters are used in wide variety of industries fields. Due to Increase of computing power and CFD based software development, design process of convection chamber heater has changed. New convection chamber heaters must meet strict quality requirements and in the same time manufacture price and exploitation cost must remain low.

In this project heat distribution in an ordinary convection chamber heater are analyzed using finite volume method based software. Focused on forced convection system elements: ventilator units and air flow channels. Few improvements are made to increase heat distribution uniformity.

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Tvirtinu:

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas
Vytautas Grigas

(Parašas, data)

Mechanikos inžinerijos krypties studijų
programų vadovas Kęstutis Pilkauskas

(Parašas, data)

MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa: MECHANIKOS INŽINERIJA – 621H30001

Patvirtinta 2016 m. Gegužės mėn. 3 d. dekanų įsakymu nr. V 25-11-7

Išduota MD M-4/5. gr. studentui *Dovydui Užumėckui*

1. Darbo tema: **Kamerinės konvekcinės krosnies temperatūros pasiskirstymo tyrimas**
Analysis of Heat Distribution in Convection Chamber Heater

2. Darbo tikslas: *Ištirti temperatūros pasiskirstymą kamerinėje konvekcinėje krosnyje*

3. Darbo uždaviniai

Ištirti temperatūros pasiskirstymą tipinėje kamerinėje konvekcinėje krosnyje.
Parinkti techninius sprendimus, kurie užtikrintų tolygesnį temperatūrų pasiskirstymą krosnyje.

4. Specialūs reikalavimai ir sąlygos

Tiriamos konvekcinės kamerinės krosnies dizainas turi atitikti UAB „Termoskalė“ gaminamų krosnių dizainą. Šildymo galimumas > 4kw; darbinė temperatūra > 500 °C. Kaitinamas objektas: du stačiakampiai gretasieniai užapvalintais kampais, kurių gabaritai: 500 x 240 x 800 mm. Oro temperatūros skirtumas ties kaitinamų objektų paviršiumi negali būti didesnis nei 15 °C. Pakeisti krosnies elementai turi būti technologiški, žymiai nepadidinantys krosnies gamybos ir/arba eksploatacinių išlaidų.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

6. Darbo pateikimo (gynimui) terminas

iki 2016 m. 05 20 d.

(data)

Užduotį gavau:

(studento vardas, pavardė, parašas)

(data)

Vadovas:

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

(data)

TURINYS

Įvadas	8
1. Techninių sprendimų analizė	10
1.1. Kamerinių konvekcinių krosnių klasifikavimas	10
1.2. Šilumos šaltiniai kamerinėse konvekciniuose krosnyse.....	11
1.3. Priverstinės konvekcijos generavimo būdai.....	11
1.3.1. Ventiliatorių (dinaminių kompresorių) rūšys ir parametrai.....	13
1.4. Oro srautų valdymas	18
1.5. Techninių sprendimų naudojamų kamerinėse konvekciniuose krosnyse apibendrinimas	18
2. Temperatūros pasiskirstymo skaičiavimų metodika.....	19
2.1. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos pagrindai.....	19
2.2. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos taikymas	20
2.3. Oro srautų ir šilumos apykaitos skaičiavimų metodikos apibendrinimas.....	22
3. Temperatūros pasiskirstymo pradinėje kamerinėje konvekciniuose krosnyje tyrimas	23
3.1. Pradinės sąlygos ir skaičiuojamojo modelio kūrimas.....	23
3.2. Srautų simuliacijos skaičiavimų eiga.....	26
3.3. Išvados	30
4. Krosnies oro apykaitos tobulinimas.....	31
4.1. Ventiliatoriaus menčių padėties parinkimas	31
4.2. Ventiliatoriaus oro suspaudimo kameros formos parinkimas.....	39
4.3. Ventiliatoriaus darbo rato koregavimas	47
4.4. Oro srautų nukreipimo parinkimas	50
4.5. Išvados	54
5. Temperatūros pasiskirstymo patobulintoje kamerinėje konvekciniuose krosnyje tyrimas	55
5.1. pakeistos kamerinės konvekcinės krosnies skaičiavimai.....	55
5.2. Patobulintos kamerinės konvekcinės krosnies analizė	57
Išvados	59
Literatūra.....	60

ĮVADAS

Kamerinių konvekcinių krosnių paskirtis – įvairių medžiagų kaitinimas, jų temperatūros pakėlimas iki reikiamos (dažniausiai aukštos) temperatūros ir išlaikymas joje. Tokios krosnys naudojamos ne vien termiškai gerinant medžiagas, bet ir džiovinimui ar kitokiam apdorojimui temperatūra. Kamerinės konvekcinės krosnys plačiai naudojamos įvairiose pramonės srityse, pradedant statybomis, apdaila, baigiant medicinos ir karine pramone. Dėl naudojimo įvairovės, kamerinės konvekcinės krosnys gali būti labai skirtingos. Skiriasi ne vien gabaritai ir galia, tačiau ir įvairūs parametrai. Nors kamerinių konvekcinių krosnių tikslas toks pat, tačiau jas projektuojant ir gaminant naudojami įvairūs techniniai sprendimai.

Sparčiai tobulėjant pramonės šakoms, kurios naudoja kamerines konvekcines krosnis, auga kokybiškų tokių krosnių paklausa. Griežtėjantys kokybės reikalavimai, atsiveriančios naujos kamerinių konvekcinių krosnių panaudojimo nišos, kamerinių konvekcinių krosnių kūrime sukuria naujų iššūkių. Be to, atsiradus pažangioms projektavimo ir skaičiavimų programoms, galima suprojektuoti efektyvesnes kamerines konvekcines krosnis, kurios būtų labai konkurencingos kainos atžvilgiu. Išaugus kompiuterių skaičiavimo galiai, galima, neieikvojant didelių resursų, patenkinamu tikslumu suskaičiuoti skysčių dinamikos ir šilumos mainų uždavinius. Žinant skysčių dinamikos ir šilumos mainų tendencijas kamerinėje konvekcinėje krosnyje galima panaudoti tokius techninius sprendimus, kurie užtikrintų aukštą kokybę ir ekonomiškumą. Projektuotojai kuriantys naujas konvekcines krosnis turi spręsti ne vien tradicines problemas, tačiau naujos, aukštų reikalavimų konvekcinės krosnys, turi būti ne vien kokybiškos, sugebėti termiškai paveikti netipinius gaminius, tačiau būti labai konkurencingos kainos.

Padidėjus vienetinių, netipinių kamerinių konvekcinių krosnių paklausai, gamintojai, norėdami būti konkurencingi privalo pasiūlyti visus keliamus reikalavimus atitinkantį gaminį už patrauklią kainą. To neįmanoma pasiekti neišanalizavus oro srauto tekėjimo krosnyje, nenustačius temperatūrų pasiskirstymo dėsningumo bei kokį poveikį jiems turi įvairūs techniniai sprendimai. Atlikus analizę, galima parinkti optimalius technologinius sprendimus, juos standartizavus būtų galima supaprastinti naujų kamerinių konvekcinių krosnių projektavimo darbus bei atpiginti krosnių savikainą. Šiame darbe bus analizuojamos kamerinės konvekcinės krosnies konstrukciniai sprendimai susiję su oro apytaka joje bei patys oro srautai.

Darbo uždaviniai:

- Ištirti tipinės kamerinės konvekcinės krosnies temperatūrų pasiskirstymą.
- Parinkti efektyvesnę darbo rato konstrukciją. Bei pateikti nesunkiai pagaminamą ventiliatoriaus suspaudimo kameros koncepciją, kuri padidintų ventiliatoriaus efektyvumą bei pagerintų oro srautų tolygumą.
- Pateikti oro srautų nukreipimo koncepciją, kuri efektyviai padidintų oro srauto tolygumą.
- Sukurti kamerinės konvekcinės krosnies modelį, kad jis užtikrintų mažesnę nei 15 °C oro temperatūros pasiskirstymą ties kaitinamu objektu.

1. TECHNINIŲ SPRENDIMŲ ANALIZĖ

1.1. KAMERINIŲ KONVEKČINIŲ KROSNIŲ KLASIFIKAVIMAS

Kamerines krosnis galima suskirstyti į keturias pagrindines kategorijas:

- Aukštos temperatūros (daugiau kaip 800 °C), dažniausiai naudojamos terminiam metalų gerinimui.
- Žemos temperatūros (iki 200 °C), naudojamos biomasės džiovimui.
- Vidutinės temperatūros (300 – 800 °C), dažniausiai naudojami terminiam metalų gerinimui bei įvairių medžiagų savybių keitimui.
- Nišines (įvairių temperatūrų).

Pagrindiniai kamerinių konvekcinių krosnių parametrai yra:

- krosnies kameros tūris ir gabaritai,
- įdėjimo angos matmenys,
- darbinė temperatūra,
- temperatūros pasiskirstymo tolygumas.

Projektuojant šį įrenginį svarbu atsižvelgti ne tik į anksčiau išvardintus reikalavimus, tačiau ir į:

- įrenginio vartojamą galią,
- gabaritus,
- masę,
- mobilumą,
- eksploataavimo kaštus,
- priežiūrą,
- gamybos sąnaudas,
- patikimumą.

Aukštos temperatūros krosnyse reikalingi galingi šildytuvai. Jų paviršiaus plotas turi būti didelis, todėl dėl savo gabaritų, šildytuvai tolygiai paskirstomi po visą kameros plotą. Šiluma dėl savaiminės konvekcijos pakankamai tolygiai pasiskirsto.

Žemos temperatūros krosnys, dažniausiai naudojamos džiovimui. Labiau nei tolygus temperatūrų pasiskirstymas, jose svarbiau didelio našumo oro apykaita. Šiam tikslui pasiekti nereikia specialios konstrukcijos techninių sprendimų ar sudėtingų skaičiavimų. Didelio našumo oro apykaita

nebūtinai užtikrina būtiną temperatūros tolygumą. Dažniausiai, užtikrinti tolygų temperatūros pasiskirstymą, reikia priimti inovatyvius konstrukcinius sprendimus.

Vidutinės temperatūros arba nišinės krosnys dažniausiai (dėl savo paskirties) turi griežtus temperatūros pasiskirstymo reikalavimus. Naudoti daug šildytuvų nėra praktiška, o ir didelis jų kiekis negali visada užtikrinti temperatūros tolygumą. Tokiose krosnyse tenka naudoti įvairius ir originalius sprendimus, kurie užtikrintų pageidaujamą konkrečios krosnies veikimą.

1.2. ŠILUMOS ŠALTINIAI KAMERINĖSE KONVEKCIŖSE KROSNYSE

Pagrindiniai pramonėje naudojami šilumos šaltiniai yra angliavandenilius (dujas, skystą kurą) naudojantys degikliai, elektriniai – varžiniai elementai bei kieto kuro katilai.

Naujose kamerinėse konvekciniuose krosnyse šilumos šaltinis yra elektriniai – varžiniai elementai. Jais tekant elektros srovei, dėl varžos išsiskiria šiluma. Išsiskiriančios šilumos kiekis priklauso nuo pratekėjusios srovės ir elemento varžos [1]. Šios šilumos šaltinius lengva reguliuoti, jie nėra tokie pavojingi kaip degikliai.

1.3. PRIVERSTINĖS KONVEKCIJOS GENERAVIMO BŪDAI

Šilumą nuo šilumos šaltinio iki ruošinio perduoda oras konvekcijos būdu. Konvekcija – šilumos perdavimo būdas, kai skysčiai ar dujos liečiasi su skirtingos temperatūros paviršiais, o tarp jų vyksta šilumos mainai. Šilumos srauto galia išreiškiama Niutono lygtimi [2]:

$$Q = A\alpha\Delta T; \quad (1.1)$$

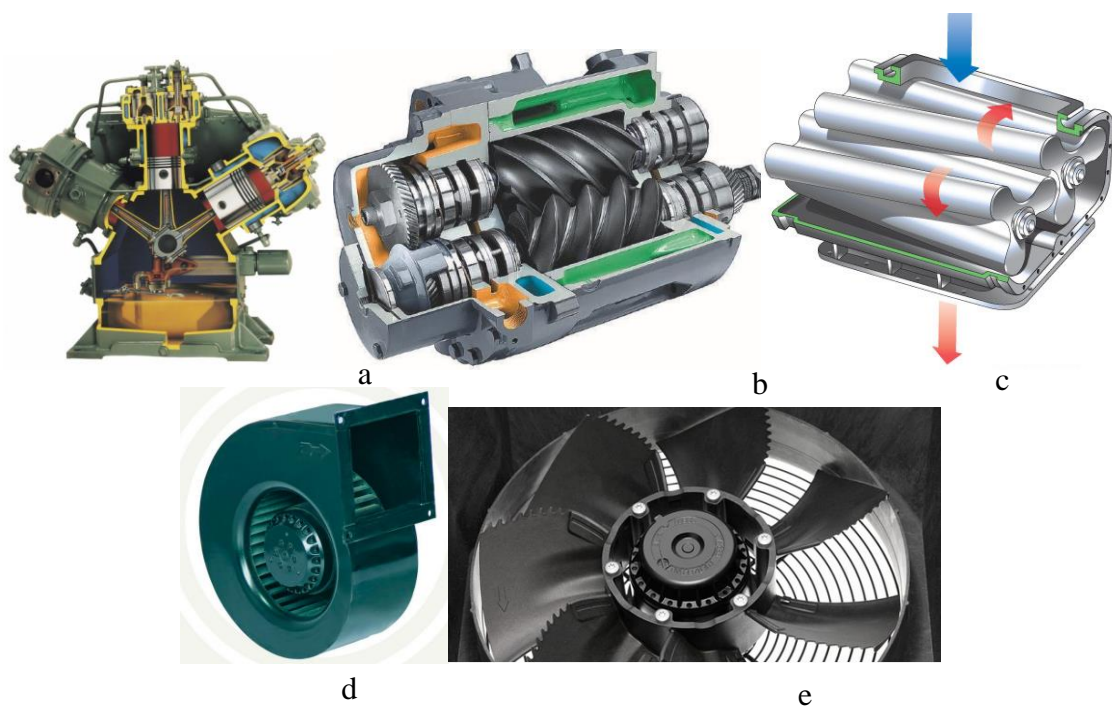
čia A – paviršiaus plotas;

α – šilumos atidavimo koeficientas $W/(m^2K)$, priklausantis nuo paviršių aptekancios medžiagos fizikinių savybių, tekėjimo režimo ir aptekamo kūno paviršiaus geometrijos;

ΔT – temperatūrų skirtumas.

Konvekcija gali būti natūrali (laisvoji) ir priverstinė. Natūrali konvekcija skysčiuose ir dujose vyksta dėl skirtingų temperatūrų ir slėgių įvairiose vietose, tam didelę įtaką turi gravitacija.

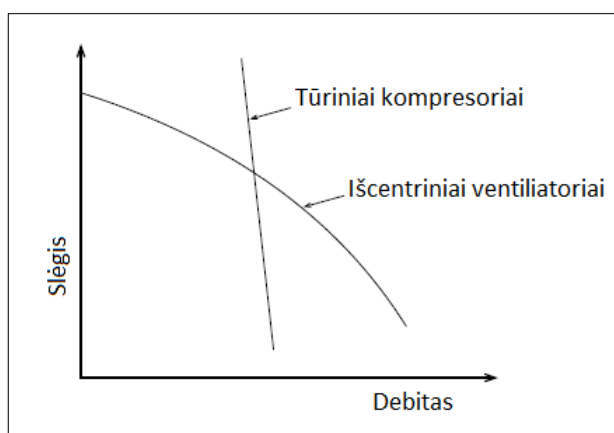
Priverstinė konvekcija atsiranda kai skysčio ar dujų dalelės juda dėl išorinės jėgos poveikio, tai gali būti įvairių tipų siurbiai, kompresoriai, vėduoklės, išcentriniai ar ašiniai ventiliatoriai ir kiti (**1.1 pav.**). Kamerinė priverstinės konvekcijos krosnis pavaizduota **1.12 pav.**



1.1 pav. Kompresorių tipai, tūriniai: a – stūmoklinis kompresorius; b – sraigtinis kompresorius, c – krumpliaratinis kompresorius; dinaminiai: d – išcentrinis ventiliatorius; e – ašinis ventiliatorius [3, 4, 5, 6, 7]

Norint tolygiai paskirstyti šilumą visame kamerinės konvekcinės krosnies darbo tūryje, laisvosios konvekcijos nepakanka. Kamerinė priverstinės konvekcijos krosnis pavaizduota **1.3 pav.**

Tūriniai kompresoriai pernešdami tūrį sukuria slėgių skirtumą, todėl tūrinių kompresorių našumo – slėgio charakteristika yra kieta, net ir didėjant pasipriešinimo slėgiui, kompresoriaus debitas pakinta nežymiai. Sumažinus iš kompresoriaus galinčio išeiti oro kiekį, bet nepakeitus kompresoriaus parametru, sukuriamas didžiulis slėgių skirtumas, o kompresoriaus galia stipriai išauga.



1.2 pav. Tūrinių ir išcentrinių ventiliatorių charakteristikos [8]

Ventiliatoriai (dinaminiai kompresoriai) sukurdami slėgių skirtumą perneša orą. Jų našumo – slėgio charakteristika (**1.2 pav.**) yra minkšta. Padidėjus pasipriešinimo slėgiui, sumažėja ir našumas. Pasipriešinimo slėgiui pasiekus tam tikrą vertę, ventiliatorius nustoja atlikti pagrindinę savo funkciją.



1.3 pav. Priverstinės konvekcijos kamerinė krosnis [9]

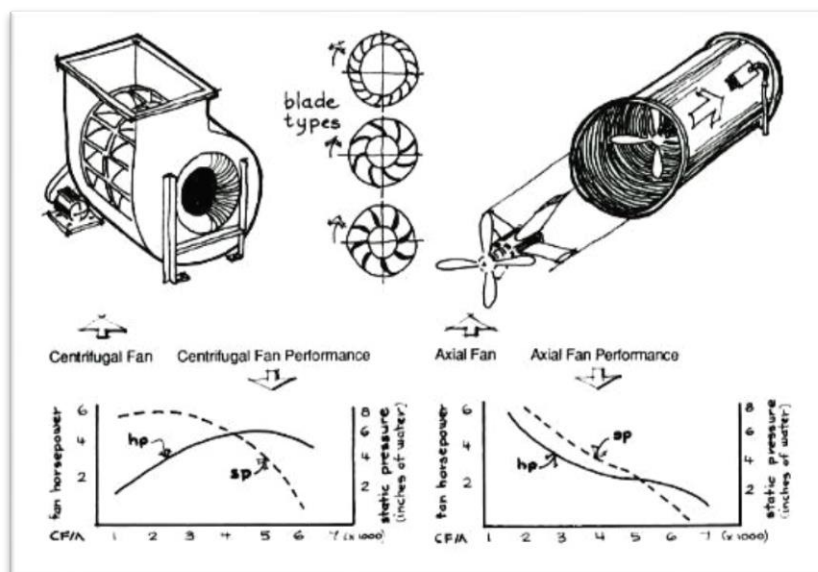
1.3.1. Ventiliatorių (dinaminių kompresorių) rūšys ir parametrai

Konvekciniuose kameriniuose krosnyse priverstinės konvekcijos šaltiniui yra svarbiau didesnis našumas (debitas), o ne aukštas slėgis. Slėgių skirtumui kameroje sukurti galima naudoti turinius arba dinaminus kompresorius, kurie dar vadinami ventiliatoriais. Tūriniai kompresoriai gali sukurti labai aukštą slėgių skirtumą, bet jų našumas palyginus mažas, jų konstrukcija sudėtinga, yra daug judamųjų (dylančių) dalių, juos gaminti brangiai kainuoja, nes efektyviam darbui reikia aukšto tikslumo dalių. Ventiliatoriai turi minkštesnę slėgio/našumo charakteristiką, jų našumas esant mažam slėgiui daug didesnis, todėl jie plačiau naudojami tokio tipo įrenginiuose kaip krosnys ar šildymo/džiovinimo kameros. Išskiriamos du pagrindiniai ventiliatorių tipai:

- ašiniai
- išcentriniai

Esminiai šių dviejų tipų ventiliatorių charakteristikų skirtumai pateikti **1.4 pav.** Kaip matyti iš pateiktų diagramų, išcentrinųjų ventiliatorių slėgio/našumo charakteristika yra tolydesnė. Esant didesniam slėgiui jie gali generuoti didesnę debitą, tai ypač svarbu norint paspartinti konvekciją. Išcentriniai ventiliatoriai sukuria daugiau triukšmo nei ašiniai, tačiau triukšmo lygis nėra svarbus faktorius. Ašinių ventiliatorių debitas esant dideliame slėgiui už ventiliatoriaus yra artimas nuliui. Nors

ašiniai ventilatoriai yra daug pigesni už išcentrinius, tačiau jų panaudojimo vietos yra labiau ribotos nei išcentrinių.



1.4 pav. Išcentrinio ventilatoriaus eskizas ir bendroji charakteristika kairėje, ašinio ventilatoriaus dešinėje. Grafikai vaizduoja statinio slėgio (brūkšninė linija) ir galios (vientisa linija) priklausomybę nuo debito [10]

Išcentriniai ventilatoriai pagal savo konstrukciją skirstomi į (1.5 pav.):

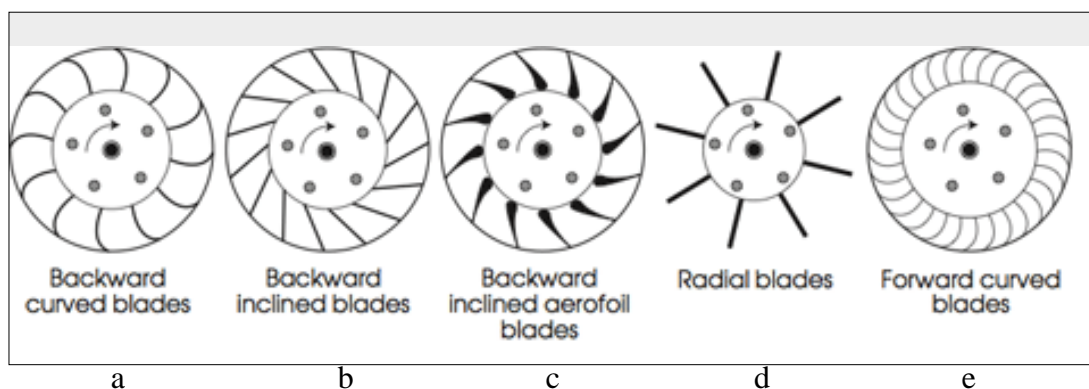
- spindulinius
- su į priekį palenktomis mentėmis
- su atgal palenktomis mentėmis

Spinduliniai išcentriniai ventilatoriai turintys tiesias mentes, kurios eina nuo ašies link išorinio gaubto naudojami tada, kai dujose gali būti kietų dalelių, tokia konstrukcija atsparesnė jų poveikiui. Šie ventilatoriai skleidžia daugiau triukšmo. Rekomenduojama pasirinkti spindulinius išcentrinius ventilatorius, kai reikia aukštesnio slėgio, palyginus nedidelio našumo, o ventilatoriaus darbo ratas gali sukantis gan aukštomis apsukomis. Šių ventilatorių konstrukcija paprasta, tinkama darbui aukštoje temperatūroje [15].

Išcentriniai ventilatoriai su į priekį palenktomis mentėmis yra labai jautrūs kietoms dalelėms, kurios gali pažeisti mentes. Tokios konstrukcijos ventilatoriai yra tylėsniai už ventilatorius tiesiomis mentėmis, tačiau mažesnio efektyvumo, jų konstrukcija sudėtingesnė, jose naudojamas didesnis menčių kiekis nei kito tipo išcentrinuose ventilatoriuose. Jie naudojami norint didelio oro

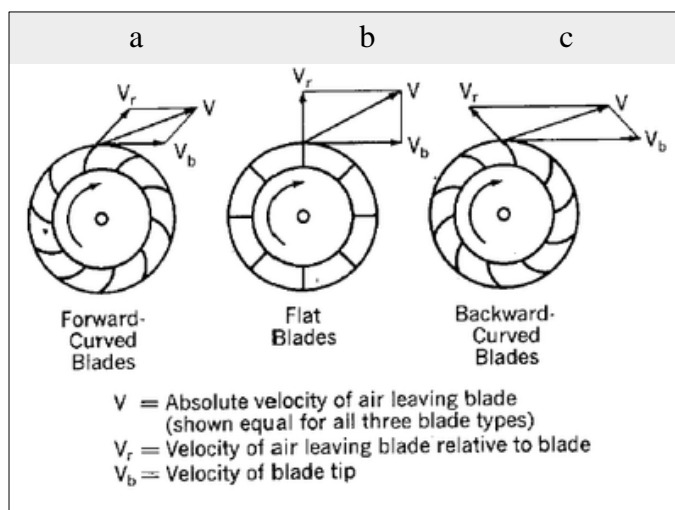
debito, esant mažam pasipriešinimo slėgiui (už ventiliatoriaus), kai oro srautas yra švarus ir nedidelės temperatūros [11, 12].

Išcentriniai ventiliatoriai su atgal (prieš rotorius sukimąsi) palenktomis mentėmis yra efektyviausi išcentriniai ventiliatoriai. Dėl savo konstrukcijos, jų gamyba yra sudėtinga ir palyginus brangi. Išskiriami trys šių išcentrinų ventiliatorių tipai: su tiesiomis, bet paverstomis mentėmis; su išlenktomis mentėmis ir su aerodinaminio profilio mentėmis. Didžiausias efektyvumas pasiekiamas naudojant aerodinaminio profilio ventiliatorius, tačiau jų gamyba yra labai sudėtinga ir brangi. Ventiliatorių tiesiomis bet paverstomis mentėmis efektyvumas mažesnis, tačiau gamyba daug paprastesnė. Dėl savo konstrukcijos ventiliatorių su atgal palenktomis mentėmis variklių apkrova smarkiai nepadidėja, padidėjus pasipriešinimo slėgiui. [11, 12]



1.5 pav. Išcentrinų ventiliatorių tipai: a – atgal išlenktomis; b – atgal paverstomis; c – atgal paverstos aerodinaminio profilio, d – tiesiomis (spindulinėmis) ir e – pirmyn paverstomis mentėmis [13]

Pagrindiniai skirtumai tarp išcentrinų ventiliatorių tipų atsiranda dėl absoliutaus vektorinio oro greičio paliekant ventiliatoriaus mentes. **1.6 pav.** Iš ventiliatoriaus su atgal paverstomis mentėmis oras išeina statesniu kampu.



1.6 pav. Oro greitis paliekant išcentrinį ventiliatorių (a – į priekį palenktomis, b – tiesiomis, c – atgal palenktomis mentėmis): V – absoliutus oro greitis; V_r – oro greiti mentės atžvilgiu; V_b – mentės galo linijinis greitis [14]

Renkantis, ar projektuojant priverstinę konvekcijos sistemą, kamerinėse krosnyse būtina atsižvelgti, kad sistema dirbs aukštoje temperatūroje. Reikia ne tik pasirinkti medžiagas, kurios gali dirbti aukštoje temperatūroje, bet visos pavaros (reduktoriai, diržinės perdavos, varikliai) ir jų elementai (guoliai, įvorės) turi patikimai atlikti savo funkciją esant darbinėms sąlygoms. Taip pat parenkant ventiliatorių yra kaštai: eksploataavimo (naudingumas) ir gamybos.

Skaičiuojant ventiliatoriaus naudingumą, dažnai patogiu paskaičiuoti ventiliatoriaus naudingą galią, kuri apskaičiuojama pagal formulę [18]:

$$P_n = Q \cdot \Delta p; \quad (1.2)$$

čia Q – ventiliatoriaus debitas (m^3/s);

Δp – slėgių skirtumas. Pa.

Lyginant panašius ventiliatorius, dirbančius vienodomis sąlygomis galima apskaičiuoti kokios galios vatais reikia pernešant 1kg oro per vieną sekundę. Tam užtenka žinoti ventiliatoriaus sukimosi greitį, pasipriešinimo momentą ir debitą:

$$\eta p = \frac{\omega \cdot M}{Q m}; \quad (1.3)$$

čia Q_m – ventiliatoriaus debitas (kg/s);

ω – ventiliatoriaus kampinis greitis (rad/s);

M – pasipriešinimo momentas (Nm).

Dažniausiai naudojamas sukimosi greičio matavimo vienetas yra apsisukimai per minutę, plačiau žinomas kaip rpm (angliškai: **revolution per minut**). Tačiau SI sistemoje sukimosi greičio vienetas yra radianai per sekundę. Perversti apsisukimus per minutę į radianus per sekundę galima naudojant formulę:

$$\omega = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{60}; \quad (1.4)$$

čia: n – apsisukimų per minutę skaičius (min^{-1});

π – matematinė konstanta ($\sim 3,14$).

Siekiant patobulinti esamą ventiliatorių pravartu žinoti esminius ventiliatorių dėsnius. Jie parodo pagrindines ventiliatorių priklausomybes [8]:

$$\begin{aligned} Q &\sim N(\omega); \\ Q &\sim N(D); \\ p &\sim N(\omega^2); \\ p &\sim N(D^2); \\ P &\sim N(\omega^3); \\ P &\sim N(D^3); \end{aligned} \quad (1.5)$$

čia: Q – debitas;

p – slėgis;

P – galia;

$N(\omega)$ – tiesinė priklausomybė nuo sukimosi greičio;

$N(\omega^2)$ – kvadratinė priklausomybė nuo sukimosi greičio;

$N(\omega^3)$ – kubinė priklausomybė nuo sukimosi greičio;

$N(D)$ – tiesinė priklausomybė nuo darbo rato skersmens;

$N(D^2)$ – kvadratinė priklausomybė nuo darbo rato skersmens;

$N(D^3)$ – kubinė priklausomybė nuo darbo rato skersmens.

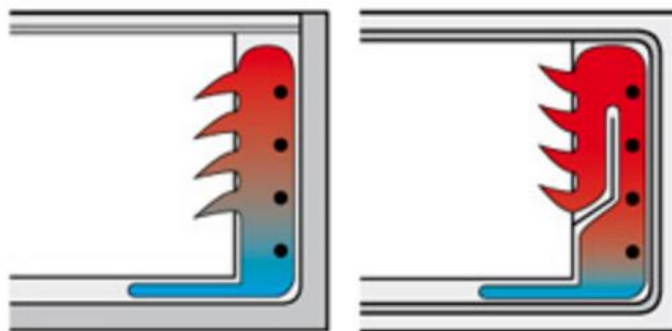
Didinant ventiliatorių ir kompresorių efektyvumą galimi įvairios ventiliatorius darbo rato formos variacijos. Bėgant laikui, atliekant vis daugiau įvairių bandymų buvo eksperimentiškai parinktos vis efektyvesnės ventiliatorių formos. Ištobulėjus kompiuterinėms optimizavimo programoms, ventiliatoriai pasiekia iki tol neregėtą efektyvumą. Tokių ventiliatorių mentės yra 3D formos (**1.7 pav.**), jas pagaminti itin sunku. Modernūs didelio slėgio ir efektyvumo dinaminiai

kompresoriai peržengia tradicinių ventiliatorių formas. Tokius dinامينius kompresorius galima pavadinti ašinių ir išcentrinių ventiliatorių hibridais.

1.4. ORO SRAUTŲ VALDYMAS

Siekiant užtikrinti temperatūros tolygumą kamerinėse konvekciniuose krosnelėse yra naudojami įvairūs technologiniai sprendimai. Vienas iš temperatūros tolygumo užpildymo būdų – papildomos šildymo kameros suformavimas. Ji suformuojama atskiriant šildytuvus ir kaitinimo kamerą su pertvara. Atsiradusi pertvara sumažina į kaitinimo kamerą patenkančią oro kiekį, padidina slėgį apie kaitinimo elementus. Sulėtėjus oro srautui, šiluma gali tolygiau pasiskirstyti sraute. Nors šiuo atveju padidėja oro srauto greičio tolygumas bei temperatūros tolygumas sraute, tačiau sumažėja kaitinimo našumas.

Oro srautų valdymui galima naudoti ir kreiptuvus. Jie gali reikiama kryptimi nukreipti oro srautą (**1.7 pav.**).



1.7 pav. Oro srauto temperatūros pasiskirstymas (kairėje – be kreiptuvo) [15]

1.5. TECHNINIŲ SPRENDIMŲ NAUDOJAMŲ KAMERINĖSE KONVEKCIŖSE KROSNYSE APIBENDRINIMAS

Kamerinėje konvekciniame krosnyje dėl savo charakteristikų tinkamiausi yra dinaminiai kompresoriai – išcentriniai ventiliatoriai. Pagaminti ventiliatoriai su tiesiomis mentėmis yra paprasčiau. Tokie ventiliatoriai, gali dirbti esant aukštesnei temperatūrai. Pavertus mentes prieš ventiliatoriaus sukimosi kryptį, galima padidinti ventiliatoriaus efektyvumą.

Oro srauto tolygumą galima padidinti naudojant pertvaras ir oro srauto kreiptuvus.

2. TEMPERATŪROS PASISKIRSTYMO SKAIČIAVIMŲ METODIKA

2.1. SKAIČIUOJAMOSIOS SKYSČIŲ DINAMIKOS PAGRINDAI

Skaičiuojamoji skysčių dinamika – viena mažiausiai išbaigtų, skaitiniais metodais sprendžiamų uždavinių rūšių. Sprendžiant skysčių ir dujų dinamikos uždavinius klasikiniiais metodais, problema užrašoma sudėtingomis diferencialinėmis lygtimis. Sudėtingus modelius sunku, kartais praktiškai neįmanoma aprašyti. Vien matematinio modelio sukūrimas gali pareikalauti daug žinių, laiko ir pastangų. Tokių lygčių sprendimas yra komplikuoatas, užima be galo daug laiko, jis nėra praktiškas, juse lengva padaryti klaidų.

Dažniausiai kuriant matematinį modelį, spręsti skysčių mechanikos uždavinius, naudojama dalinėmis išvestinėmis išreikšta Oilerio lygtis (2.1 formulė) [16], kuri aprašo skysčio pagreičio priklausomybes:

$$\begin{cases} a_x = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{du_x}{dt} \\ a_y = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{du_y}{dt}; \\ a_z = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{du_z}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

čia:

a_x ; a_y ; a_z – skysčio pagreiciai x; y ir z ašyse;

ρ – skysčio tankis;

$\frac{\partial p}{\partial x}$; $\frac{\partial p}{\partial y}$; $\frac{\partial p}{\partial z}$ – dalinės skysčio slėgio išvestinės x; y ir z ašimis;

$\frac{du_x}{dt}$; $\frac{du_y}{dt}$; $\frac{du_z}{dt}$ – skysčių greičio išvestinės x; y ir z ašimis.

Lygtys tampa daug sudėtingesnės, įvertinant, kad oras yra spūdis. Kartu norint aprašyti ir temperatūrinius mainus, tokia užduotis daugeliui gali tapti neįmanoma misija.

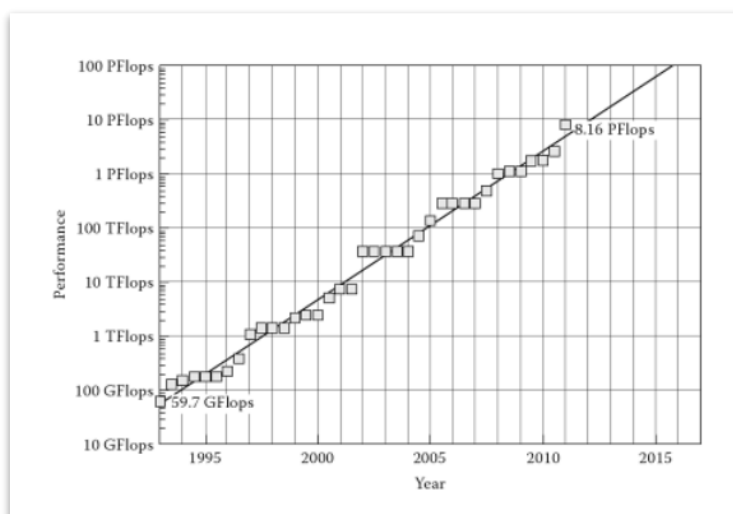
Sprendžiant sudėtingesnius skysčių dinamikos uždavinius patogiau naudotis skaitinės analizės metodais: baigtinių tūrių ar baigtinių elementų metodais. Nors skaitinės analizės pagrindai buvo išvesti gan seniai, bet efektyviems uždavinių skaičiavimams būtini spartūs kompiuteriai. Skaičiuojant elementarius 3D – stiprumo uždavinius, gali tekti išspręsti tūkstančius ir daugiau lygčių. Skysčių dinamikoje netgi paprasčiausios – stacionarios tėkmės lygtys gaunamos netiesinės, tokios lygtys visuomet sprendžiamos iteracijomis [17].

Svarbu neužmiršti, kad projektuojant konvekcines kamerines krosnis yra svarbu ne pati oro tėkmė, bet jo perduodama šiluma bei jos mainai. Toksai uždavinys reikalauja dar didesnių skaičiavimo resursų.

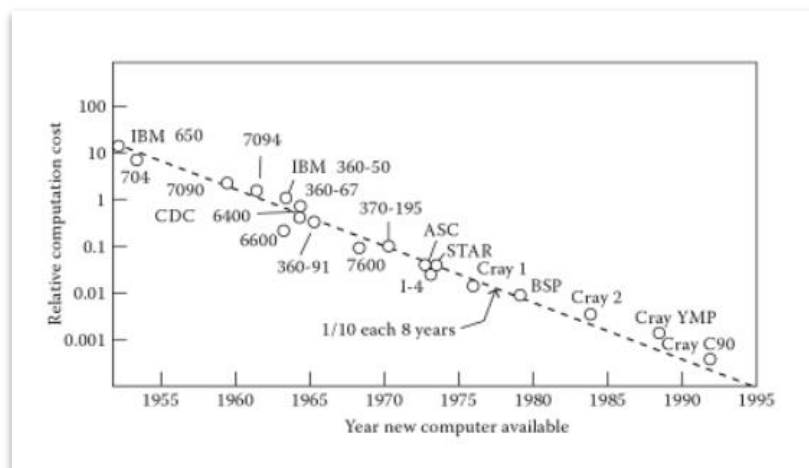
2.2. SKAIČIUOJAMOSIOS SKYŠČIŲ DINAMIKOS TAIKYMAS

Dar visai neseniai tokio pobūdžio uždavinius buvo galima skaičiuoti tik superkompiuteriais. Vien uždavinio paruošimui reikėjo labai aukšto lygio specialistų, kurie tinkamai įvertintų pradines sąlygas, numatytų prielaidas, kurios leistų su paspartinti uždavinį, be didelių paklaidų. Uždavinių optimizavimas užimdavo daug laiko. Skaičiuojamosios srities skaidymas baigtiniais elementais buvo nepatogus, reikalaujantis specifinių žinių, laiko, kruopštumo ir užsispyrimo. Todėl nenuostabu, kad ši skaičiavimo metodika iš pradžių buvo taikoma tik kosmoso ir karo pramonėse.

Spartėjant kompiuteriams (**2.1 pav.**), mažėjant skaičiavimų išlaidoms (**2.2 pav.**), vis daugiau pramonės šakų pradėjo naudoti skaitine analize paremtus, kompiuterinius skaičiavimo metodus. Atsiradus skaitinės analizės metodo pagrindu skaičiuojančių programų paklausai, buvo išleista naujų programų, kurios turėjo vartotojui draugišką sąsają. Programų kūrėjai tobulino savo programas, jos tapdavo vis labiau automatizuotos.

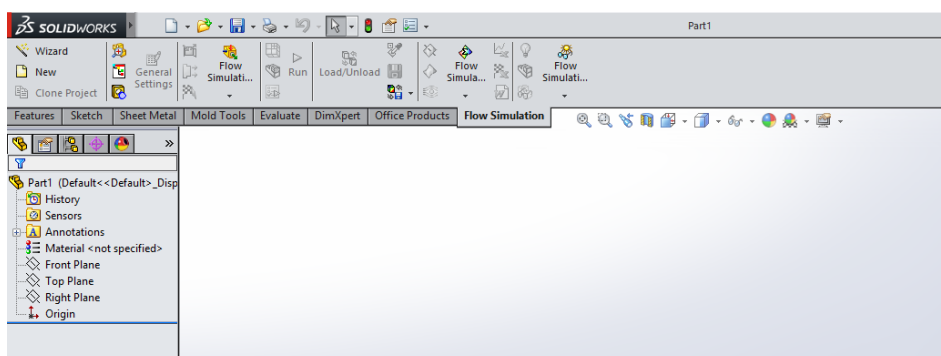


2.1 pav. Grafikas rodantis kompiuterių skaičiavimo pajėgumo kitimą metų atžvilgiu [18]



2.2 pav. Grafikas rodantis santykių kompiuterių skaičiavimo išlaidų kitimą metų atžvilgiu [18]

Šiais laikais jau yra daug programinės įrangos, kurios leidžia jų vartotojams, net ir neturintiems didelės patirties ar programos jų veikimo principo žinių, sėkmingai apskaičiuoti elementarius uždavinius. Nors programomis kurios turi intuityvią vartotojo sąsają, be specifinių žinių nepavyks labai tiksliai išspręsti sudėtingų uždavinių, tačiau jos tinka norint suprasti skysčių dinamikos dėsningumas. Atliekant pradinis – orientacinius skaičiavimus, norint pasirinkti labiausiai tinkančią projektavimo kryptį, labai gerai tinka į projektavimo programą „SOLIDWORKS“ integruojamas skaičiavimo paketas „SOLIDWORKS Flow Simulation“ (**2.3 pav.**). Jis turi labai patogų vedlį, kuris padeda greitai sukurti skaičiuojamąjį modelį. Šis paketas automatiškai, su minimalia vartotojo pagalba, sugeneruoja baigtinių tūrių tinklę. Su šiuo skaičiavimo paketu galima skaičiuoti ir šilumos mainų uždavinius. Jei įrenginys projektuojamas „SOLIDWORKS“ programa, nereikia konvertuoti jo failų, galima iškart atlikti norimus skaičiavimus.



2.3 pav. „SOLIDWORKS Flow Simulation“ paketo vartotojo sąsaja

„SOLIDWORKS Flow Simulation“ paketas neturi kai kurių skaičiavimo galimybių, kurias turi specializuotos programos. Su jomis skaičiuojant, reikia įdėti daug darbo kuriant skaičiuojamąjį modelį, sudarant tūrių/elementų tinklą. Žinomiausios iš tokio tipo programų: „OpenFOAM“, „ANSYS CFX“, „ANSYS Fluent“. Šios ir panašios programos tinka patikslintiems skaičiavimams, kai svarbu rezultatų tikslumas.

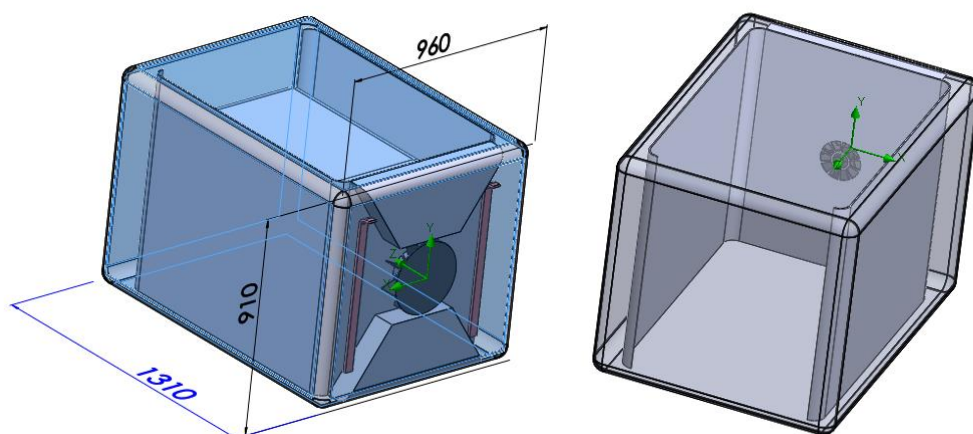
2.3. ORO SRAUTŲ IR ŠILUMOS APYKAITOS SKAIČIAVIMŲ METODIKOS APIBENDRINIMAS

Oro srautų skaičiavimams galima naudoti ir projektavimo sistemas, kurios turi srautų skaičiavimo paprogrames. Srautų skaičiavimas yra sudėtingas, daug resursų reikalaujantis procesas, todėl pravartu kaip įmanoma labiau supaprastinti, išskaidyti uždavinį.

3. TEMPERATŪROS PASISKIRSTYMO PRADINĖJE KAMERINĖJE KONVEKCIŖJE KROSNYJE TYRIMAS

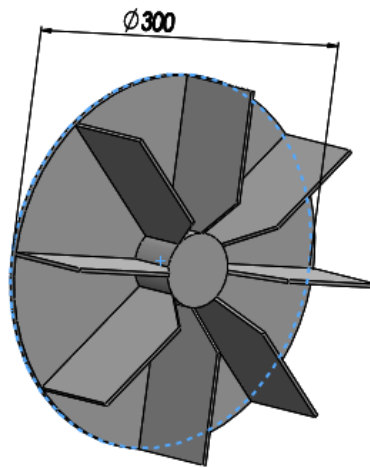
3.1. PRADINĖS SĄLYGOS IR SKAIČIUOJAMOJO MODELIO KŪRIMAS

Šiame skyriuje paanalizuosiu temperatūros pasiskirstymą vidutinės temperatūros kamerinėse krosnyse. Atliekant temperatūros pasiskirstymo analizę, naudotas krosnies kameros modelis (**3.1 pav.**), kuris yra panašus į įmonės „Termoskalė“ gaminamas kamerinių krosnių kameras. Tokio tipo krosnių kameros būna naudojamos įvairios paskirties, priverstinės konvekcijos krosnyse. Analizė atlikta programos „SOLIDWORKS“ skysčių dinamikos skaičiavimo pakete „Flow Simulation“.



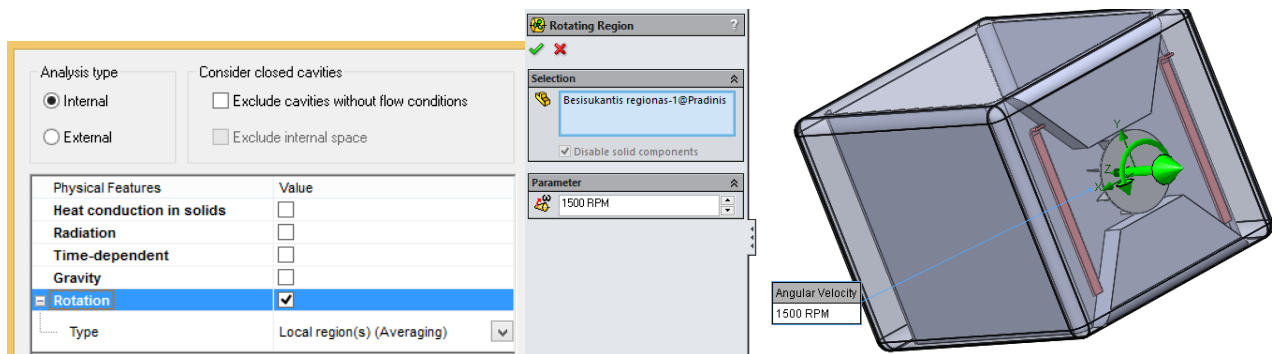
3.1 pav. Krosnies kameros modelis

Priverstinę konvekciją sukeltą slėgių skirtumą, dėl kurio kameroje paspartėja oro apykaita. Šioje krosnies kameroje, slėgių skirtumą sukelia išcentrinis tiesių menčių ventiliatorius (**3.2 pav.**). Iki šiol naudojami ventiliatoriai, neturėjo suspaudimo kameros, todėl jų naudingumas ir našumas yra žemas.



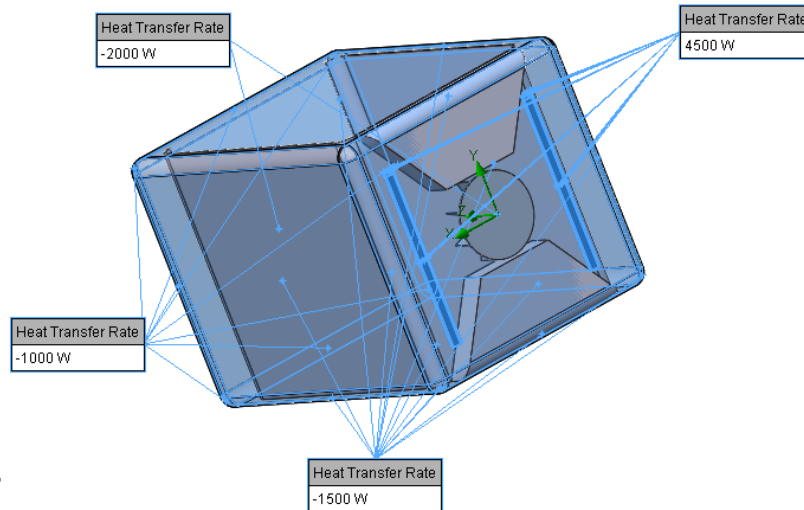
3.2 pav. Išcentrinis tiesių menčių ventiliatorius

Ventiliatoriaus sukimasis imituojamas sukuriant besisukančią sritį (**3.3 pav**). Sukimosi greitis nustatytas 1500 aps/min.



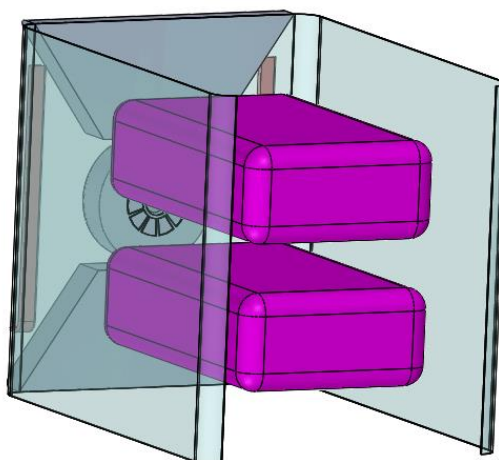
3.3 pav. Besisukančio regiono uždėjimas

Šildytuvai šiuose skaičiavimuose imituojami jų modelio paviršiuose nustačius šilumos išsiskyrimo intensyvumą lygų 4500W (**3.4 pav.**). Kameros sienelių, kurios ribojasi su aplinka, paviršiuose nustatomas toks šilumos suvartojimas, kad šilumos galios balansas būtų lygus nuliui.



3.4 pav. Temperatūrinių sąlygų nustatymas

Kadangi kamerinė konvekcinė krosnis naudojama gaminiams kaitinti, siekiant tikroviškesnių rezultatų, buvo sumodeliuota ir ruošiniai (**3.5 pav.**). Ties jų paviršiumi esanti oro temperatūra bus naudojama vertinant temperatūros pasiskirstymą.



3.5 pav. Kaitinamų ruošinių modelis

Skaičiuojamoji sritis suskaidoma baigtiniais tūriais į: 106120 skysčių celes, 9149 kūnų celes, 37694 dalelių celes. Atliekant skaičiavimus žemės trauka nebuvo vertinama, kadangi tai labai prailgintu skaičiavimus. Be to, vykstant priverstiniai konvekcijai ji nėra labai didelę įtaką kuriantis faktorius, kurio nebuvimas stipriai iškraipytų oro srovių pasiskirstymo dėsningumas. **3.6 pav.** pateikta išsamesnė skaičiuojamojo modelio informacija.

```

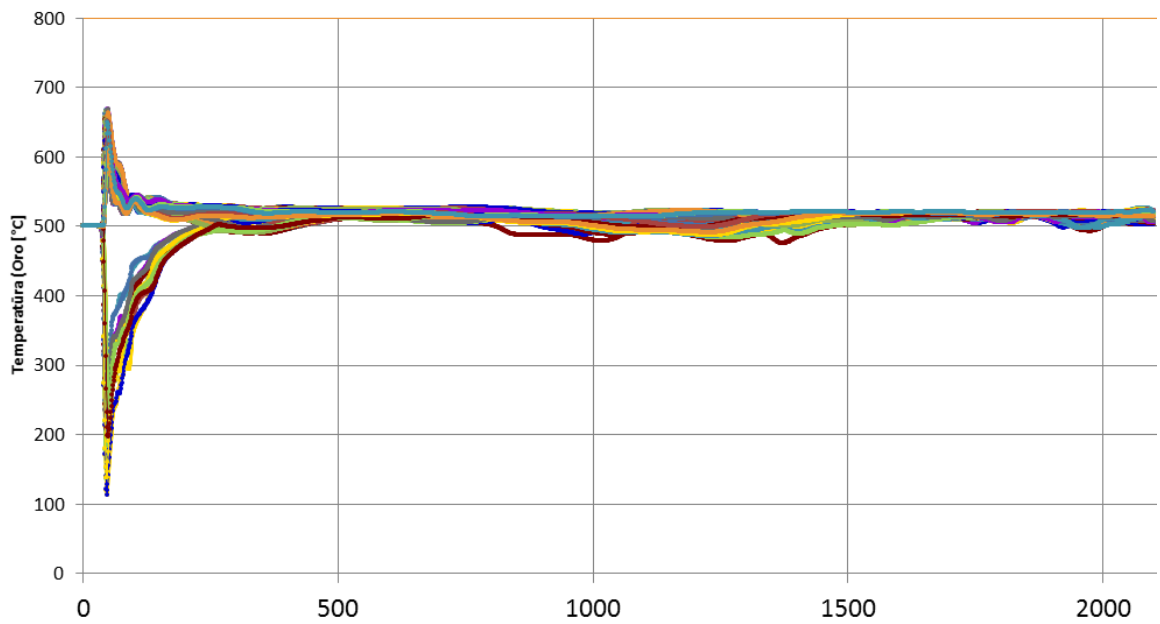
Model: Pradinis.SLDASM
Project Directory: D:\solido failai\Tiriamasis\1
Project Name: Pradinis bandymas
Configuration: Default
Results File: D:\solido failai\Tiriamasis\1\1.fld
Version: Flow Simulation
File Type FLD
Iteration 2100
Physical Time 0 s
CPU time 10614 s
Cells 152963
Fluid Cells 106120
Solid Cells 9149
Partial Cells 37694
Trimmed cells 0
X min -0.480 m
X max 0.480 m
Y min -0.455 m
Y max 0.455 m
Z min -0.001 m
Z max 1.310 m
High Mach number flow No
Time-dependent No
Heat Conduction in Solids No
Radiation No
Porous Media No
Internal Yes
Gravity No
Basic Mesh Dimensions Nx = 26, Ny = 24, Nz = 34
Pressure [101837.03 Pa; 102476.20 Pa]
Velocity [0 m/s; 40.897 m/s]
Temperature [-273.15 °C; 2692.88 °C]
Density (Fluid) [0.12 kg/m^3; 4.64e+008 kg/m^3]
Reference Pressure 101325.00 Pa
ADPI 0 %
Calculation warnings:
No warnings

```

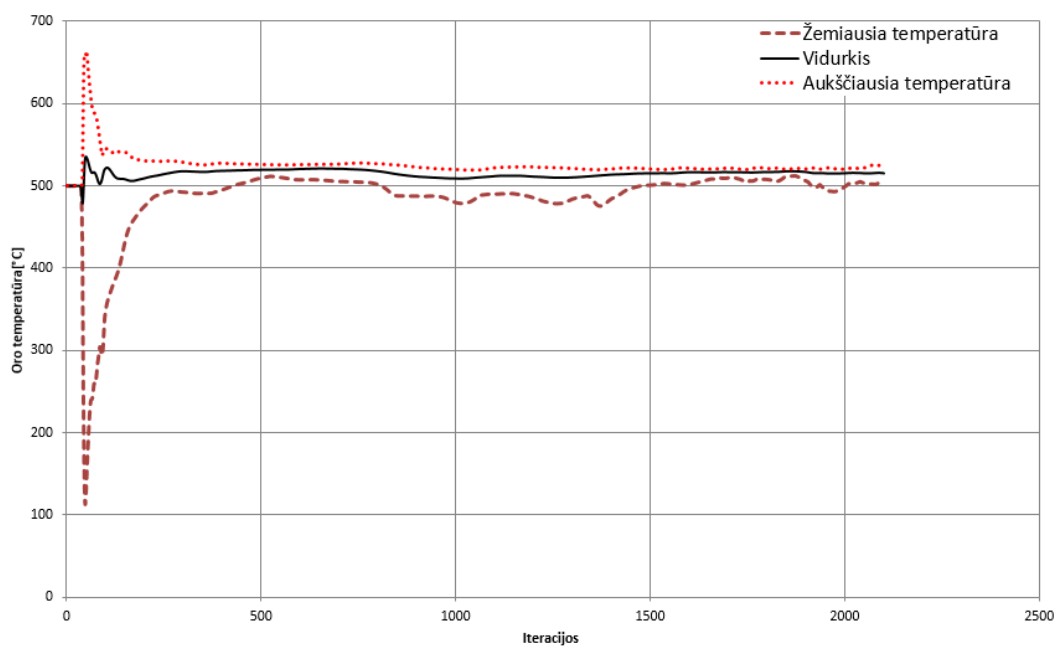
3.6 pav. Skaičiuojamojo modelio informacija

3.2. SRAUTŲ SIMULIACIJOS SKAIČIAVIMŲ EIGA

Skaičiuojant oro pasiskirstymą buvo atlikta virš 2000 iteracijų. **3.7 pav.** Patektas tiriamo objekto paviršių mažiausių ir didžiausių temperatūrų konvergavimo grafikas. **3.8 pav.** pateiktas bendro paviršiaus mažiausios, didžiausios ir vidutinės konvergavimo grafikas.

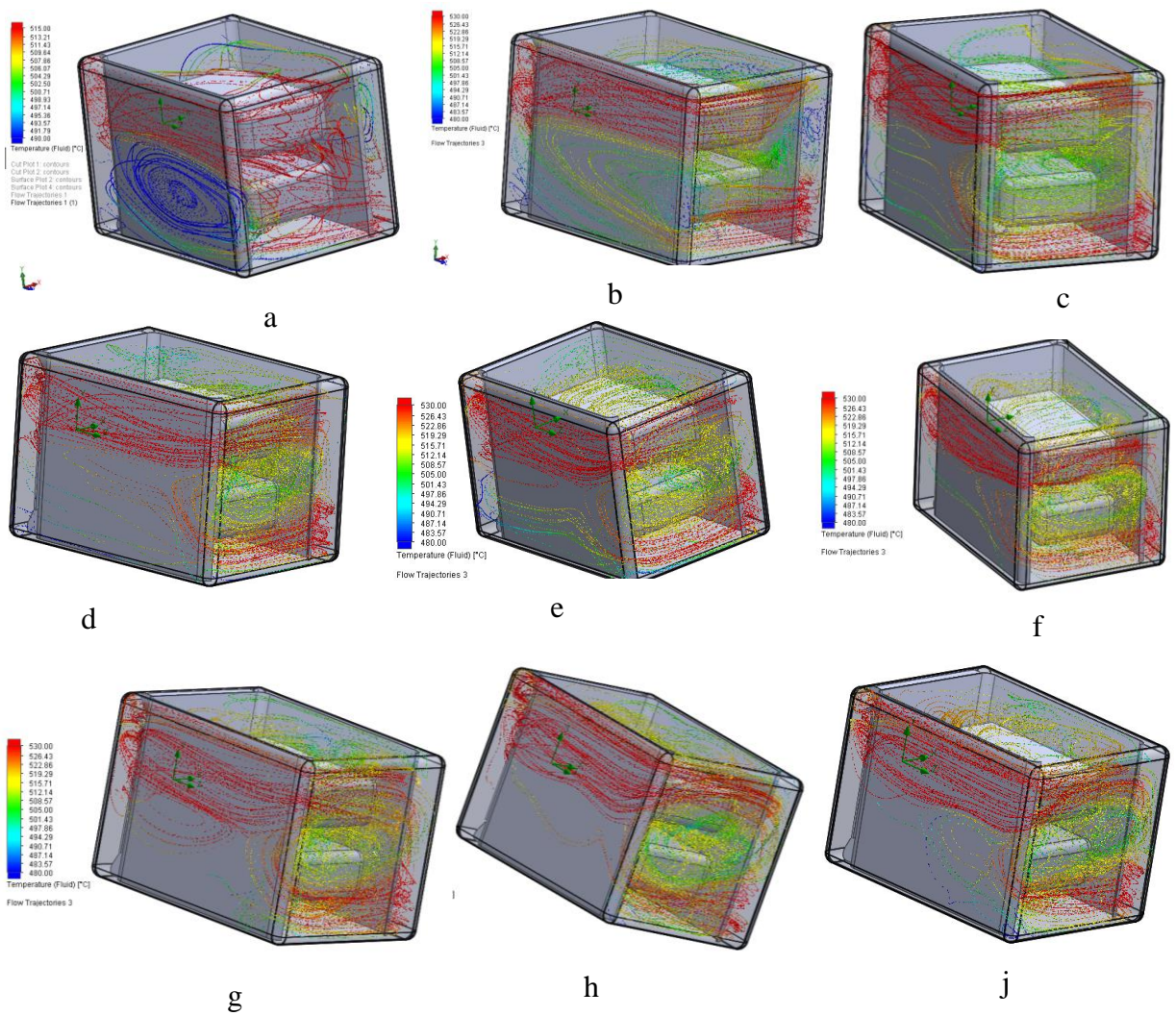


3.7 pav. Paviršių temperatūros konvergavimo grafikas

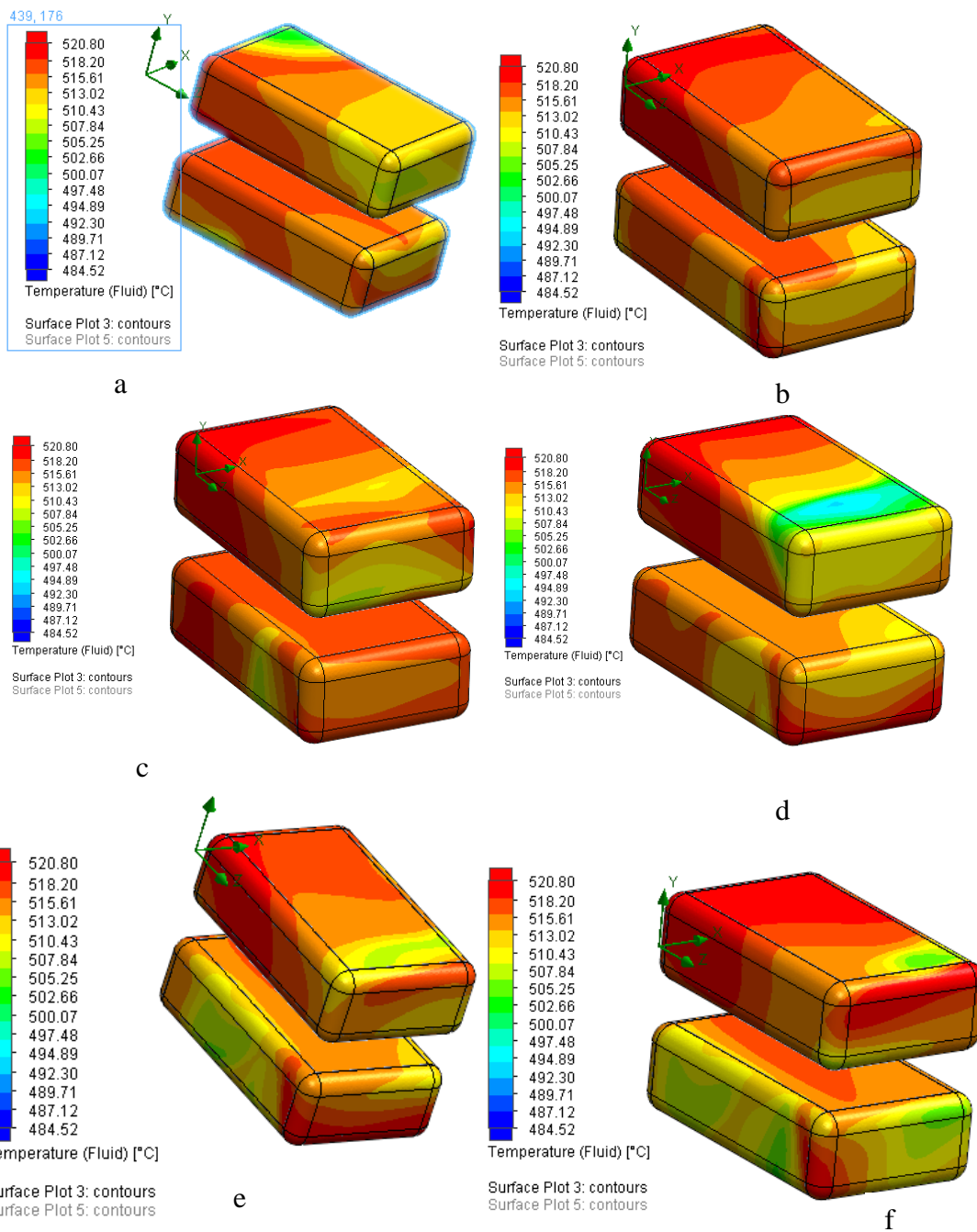


3.8 pav. Viso Paviršiaus temperatūros konvergavimo grafikas

Atliekant skaičiavimus, buvo gauti tarpiniai, oro srauto tėkmės ir temperatūros pasiskirstymai pateikti **3.9 pav.** ir **3.10 pav.**



3.9 pav. Tarpiniai, oro temperatūros ir tėkmės rezultatai, iteracijų skaičiui esant: a – 689; b – 910; c – 1300; d – 1551; e – 1701; f – 1901; g – 1961; h – 2056; j – 2100

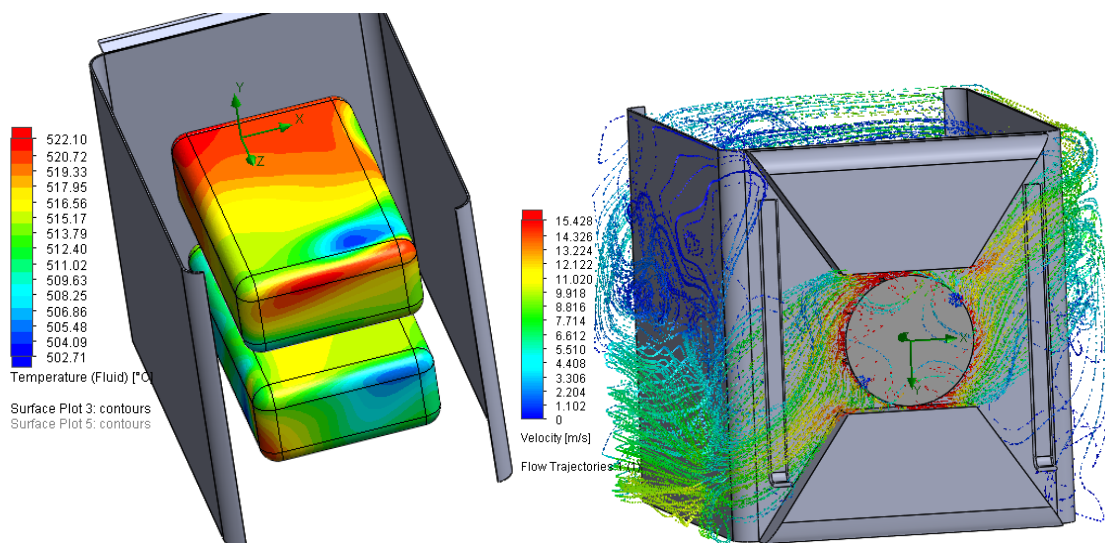


3.10 pav. Tarpiniai, oro temperatūros prie ruošinio paviršiaus pasiskirstymo rezultatai, iteracijų skaičiui esant: a – 1551; b – 1701; c – 1901; d – 1961; e – 2056; f – 2100

Iš tarpinių rezultatų matyti, kad oro temperatūros pasiskirstymas nuolat kinta, jis nėra stabilus. Ruošinio paviršių nuolat šildo vis kitokios temperatūros oras. Oro srautas taip pat nėra stabilus. Srautas neprognozuojamai maišosi, jis nėra nuspėjamas, jo pokyčiui įtaką gali padaryti ir labai maži veiksniai, nekalbant apie ruošinio gabaritų pokyčius.

Kaip matyti iš temperatūros pasiskirstymo po 2100 iteracijos (**3.11 pav**), skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios temperatūros yra 20 °C. Jis yra gan didelis, ir gali neatitikti kaikurioms

krosnims keliamų aukštų temperatūros pasiskirstymo tolygumo reikalavimų. Oro srautas paliekantis ventiliatorių turi daug sukurių, kurie blogina oro apykaitą. Ventiliatoriaus įsukti iki nurodyto greičio reikalingas 0,318 Nm.



3.11 pav. Apskaičiuotas temperatūros pasiskirstymas prie ruošinio paviršiaus (kairėje) ir oro greitis prie ventiliatoriaus po 2100 iteracijos

3.3. IŠVADOS

Ventiliatorius neturi suslėgimo kameros, todėl jo efektyvumas ir našumas nėra didelis. Sukurtas mažas slėgių skirtumas generuoja nedidelius oro srauto greičius (**3.11 pav.**), kurie ties šildytuvais nesiekia nei 14m/s. Be to, iš oro srautų matyti, kad šildytuvai išnaudojami neefektyviai, nes yra netolygus oro pasiskirstymas prie jų paviršių, todėl šilumos pernešimas yra nevienodai pasiskirstęs ir šildytuvai gali perkaisti.

Atlikus tipinio, įmonėje „Termoskalė“ projektuojamų, priverstinės konvekcinės krosnių kameros dizaino analizę, gauti rezultatai parodė, kad tokio dizaino kameros neužtikrina aukštų kokybės reikalavimų. Oro temperatūros skirtumai, prie ruošinių paviršiaus siekia virš 20 °C. Oro srauto dinamika kameroje yra nestabili, beveik neįmanoma suprojektuoti universalios tokio dizaino kameros, nes oro tėkmės parametrams labai didelę įtaką daro joje esantys objektai. Priverstinę konvekciją turinti ventiliatorius neturi suspaudimo kameros, todėl nėra efektyvus. Aukštus kokybinius reikalavimus atitinkančią krosnį, kuri būtų universali, galima suprojektuoti tik iš esmės pakeitus kameros konstrukcijos dizainą.

4. KROSNIES ORO APYKAITOS TOBULINIMAS

4.1. VENTILIATORIAUS MENČIŲ PADĖTIES PARINKIMAS

Panagrinėjus dabartinę ventiliatoriaus konstrukciją ir paanalizavus teorinę medžiagą, galima daryti išvadą, kad ventiliatoriaus naudingumą galima padidinti naudojant kitokios konfigūracijos mentes. Nors efektyviausios mentės yra aerodinaminio profilio, tačiau jų gamyba yra labai sudėtinga ir brangi. Be to, jos forma esant didelėms temperatūroms gali prarasti optimalią formą. Įvertinus šiuos faktorius, konkurencingose kamerinėse konvekciniuose krosnyse geriau naudoti atgal palenktas mentes.

Atgal išlenktas mentes galima pagaminti išvalcavus jas reikiamu spinduliu, o po to jas virinti prie darbo rato šono. Tačiau tokį darbo ratą būtų sunku subalansuoti, be to karščiui paveikus lenkimo vietą mentės gali netolygiai susideformuoti, o tai padidintų disbalansą. Kitas būdas įtvirtinti išlenktas mentes būtų išpjaunant mentės lenkimo formas atkartojančias išpjovas, mentes laikančioje plokštėje. Tai padidintų tikslumą, tačiau neišsprendžia pagrindinės problemos – galimų nesklaidumų dėl temperatūrinių deformacijų.

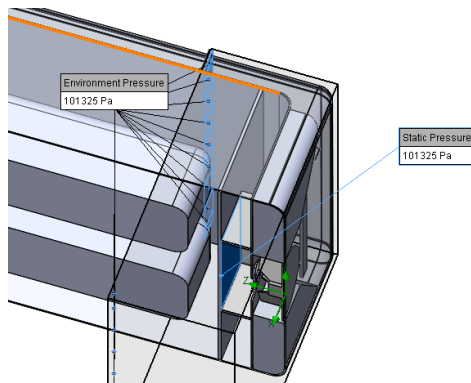
Technologiškai lengviausia pagaminti tiesias mentes. Vėliau jas galima pritvirtinti darbo rate palenktas atgal. Taip minimaliai padidinus sąnaudas galima padidinti ventiliatoriaus efektyvumą. Tokio tipo ventiliatoriai dažnai naudojami įvairiuose industrijos šakose.

Norint patikrinti, ar tokios konfigūracijos ventiliatorius būtų efektyvesnis ir analizuojamoje konvekciniame krosnies kameroje, adaptuosime naudojamą modelį ventiliatoriaus efektyvumo skaičiavimams. Siekiant paspartinti skaičiavimus buvo sumažinti skaičiuojamoji sritis, sukurtos oro padavimo ir išėjimo sritys. Jose nustatytas atmosferos slėgis (101325 Pa) **4.1 pav.** Ventiliatoriaus regiono tinklelis sutankintas.

Pirmiausia atliekamas pradinio ventiliatoriaus su spindulinėmis mentėmis tyrimas. Iš šios simuliacijos gauti duomenys bus naudojami lyginimui su kitokios formos ventiliatoriais. Taip bus galima nustatyti kurio tipo sparnuotės šiuo konkrečiu atveju yra efektyvesnės. Bandant skirtingos konfigūracijos ventiliatorius bus naudojami tokie patys jų parametrai: Sukimosi greitis 1500 min^{-1} , o darbo rato skersmuo 300 mm.

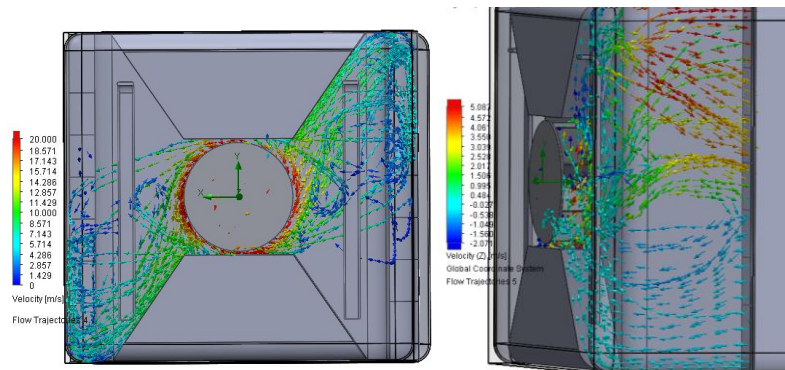
Pagal (1.4) formulę perskaičiavę sukimosi greitį iš apsisukimus per minutę į radianus per sekundę gauname:

$$\omega = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{60} = \frac{2 \cdot 1500 \cdot 3,14}{60} = 157 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

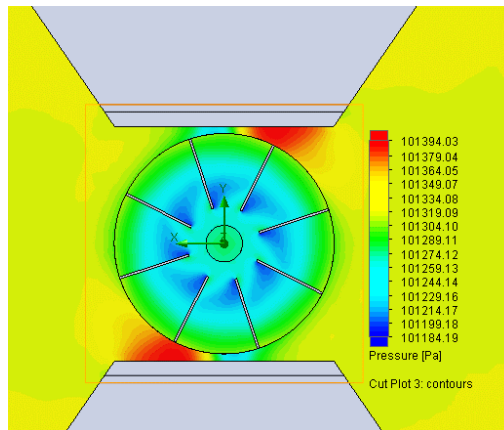


4.1 pav. Oro padavimo ir išėjimo plokštumos.

Atlikus simuliaciją su pradiniu ventiliatoriaus modeliu gauti oro srautai parodyti **4.2 pav.** Ventiliatorių paliekantis oro srautas yra koncentruotas ū kampus. Pati ventiliatoriaus kameros forma skatina oro sūkurių susidarymą. Ventiliatoriuje atsirandantys slėgių pasiskirstymas parodytas **4.3 pav.**



4.2 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje)

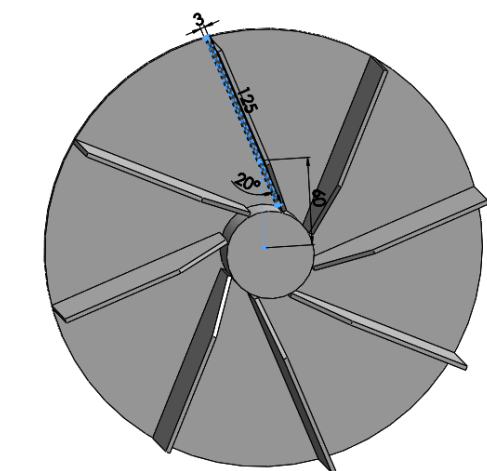


4.3 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje

Po 700 iteracijų ventiliatoriaus debitas nusistovi ties 0,0962 m³/s verte. Naudojant spindulinio tipo mentes, generuoti tokį debitą reikalingas 0,271 Nm sukimo momentas. 0,2108 m³/s
Pagal (1.3) formulę galima apskaičiuoti kokia galia reikalinga pradinės formos ventiliatoriui:

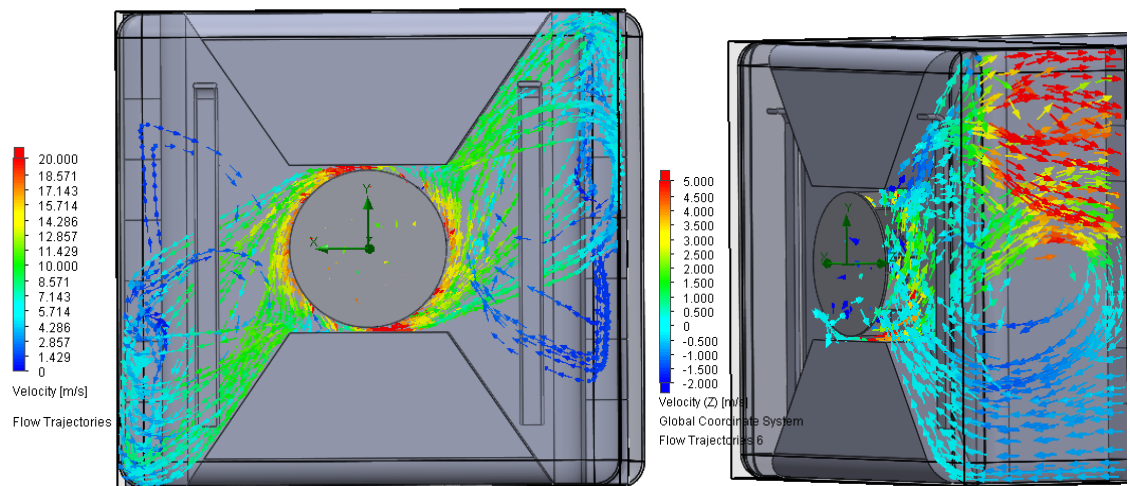
$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,271}{0,0962} = 442 \frac{W}{kg/s}$$

Siekiant padidinti ventiliatoriaus efektyvumą, jo mentės buvo pasuktos 20° (**4.4 pav.**) prieš darbo rato sukimosi kryptį. Teoriškai toksai ventiliatorius turėtų būti naudingesnės.

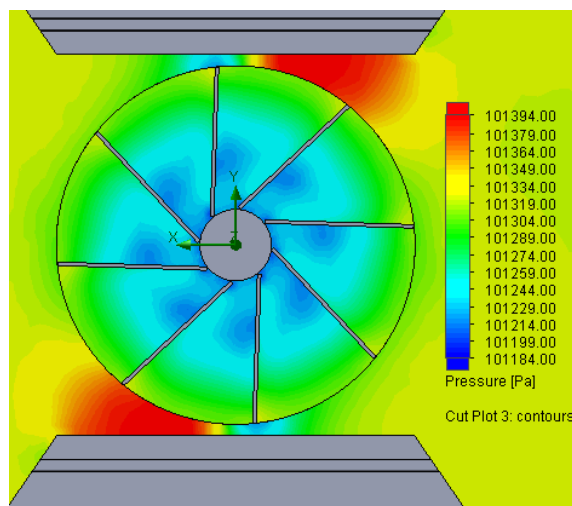


4.4 pav. Ventiliatorius su pasuktomis mentėmis

Atlikus simuliaciją matyti, kad oro srautai (**4.5 pav.**) mažai skiriasi nuo srautų susidarančių, naudojant pradinę ventiliatorių, su tiesiomis (spindulinėmis) mentėmis. Slėgio pasiskirstymas ventilaitoriuje su palenktomis mentėmis (**4.6 pav.**) ženkliai skiriasi nuo pradinio ventiliatoriaus. Mažo slėgio sritis tolygiau pasiskirščiusi išilgai mentės.



4.5 pav. Oro srautas ir oro greitis (absoliutus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai mentės paverstos 20° kampu

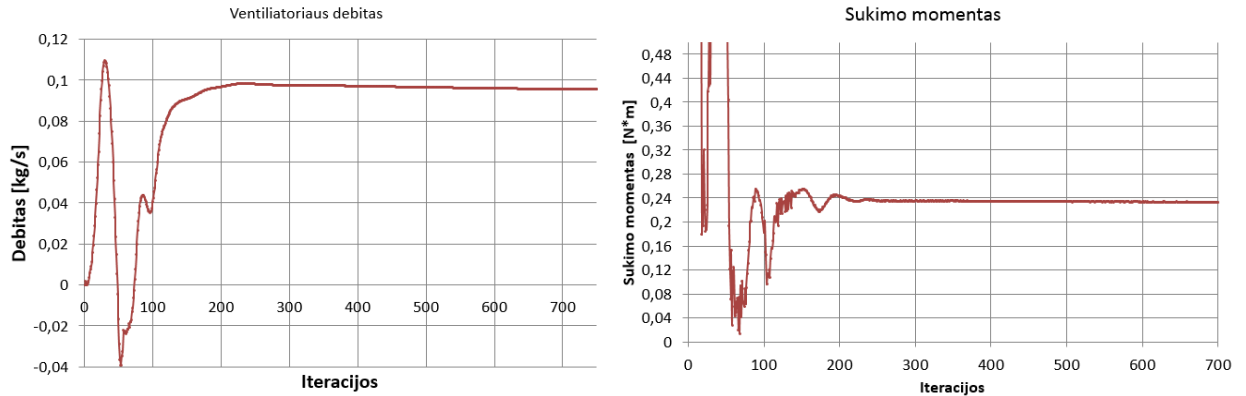


4.6 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje

Nusistovėjus oro srautui, po 700 iteracijos oro debitas (**4.7 pav.**) su 20° palenktomis mentėmis buvo: 0,0947 kg/s, o reikalingas sukimo momentas šiam debitui generuoti (**4.7 pav.**): 0,253 Nm. Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas specifinis šio ventiliatoriaus galingumas:

$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Q_m} = \frac{157 \cdot 0,253}{0,0947} = 419 \frac{W}{\text{kg/s}}$$

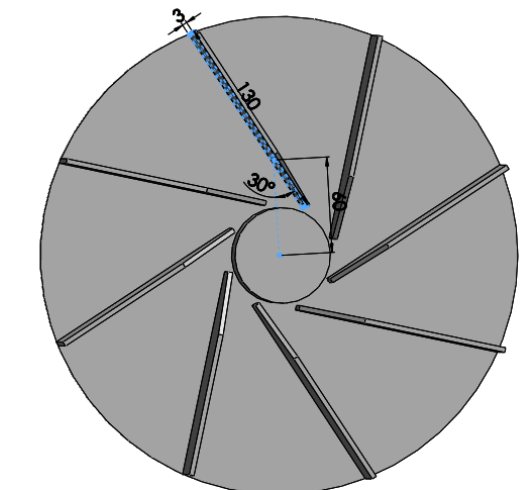
Lyginant šio tipo ventiliatorių, jis tokiomis sąlygomis, nors ir generuoja 0,015kg/s mažesnę debitą, tačiau dirba 23 W/kg/s naudingiau, nes jam reikia mažesnio sukimo momento.



4.7 pav. Ventiliatoriaus su 20° kampu palenktomis mentėmis debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

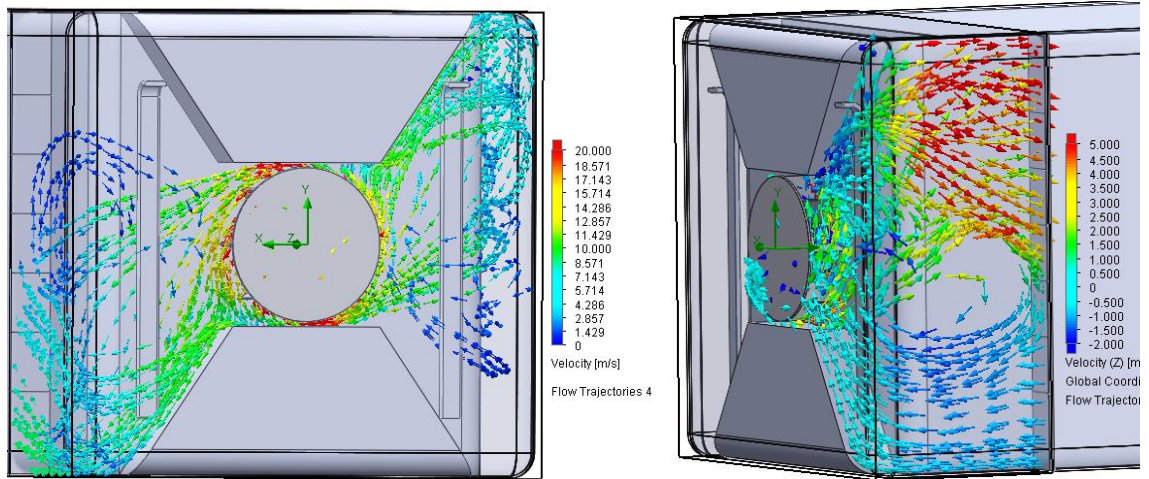
Lyginant šio tipo ventiliatorių, jis tokiomis sąlygomis, nors ir generuoja $0,015 \text{ kg/s}$ mažesnę debitą, tačiau dirba 23 W/kg/s naudingiau, nes jam reikia mažesnio sukimo momento.

Dar viena simuliacija buvo atlikta padidinus menčių pasisukimo kampą 10° iki 30° . Ventiliatoriaus darbo ratas su sparnuote pavaizduotas **4.8 pav.**

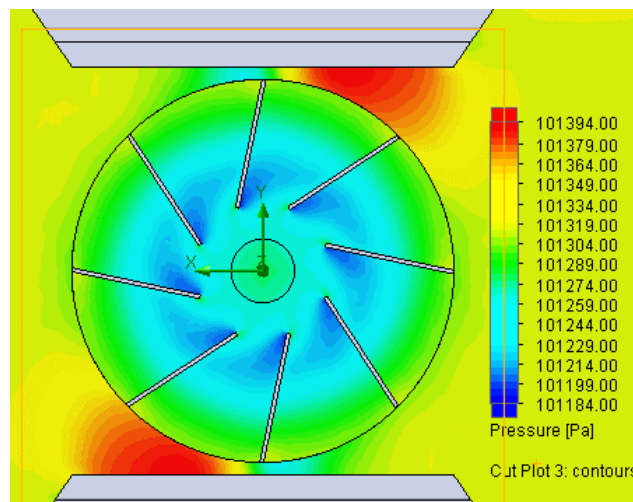


4.8 pav. Ventiliatorius su 30° palenktomis mentėmis

Oro srautų greitis (**4.9 pav.**) aplink ventiliatorių, gautas atikus simuliaciją su ventiliatoriumi kurio mentės palenktos 30° yra mažesnis, negu pirminio ventiliatoriaus sukurto oro srauto greitis. Taip yra todėl, kad absoliutus oro srauto greitis paliekantis ventiliatorių yra mažesnis, nes atsiranda oro greičio dedamoji kurios kryptis priešinga tangentiniam darbo rato sukimosi greičiui, todėl kad mentės palenktos prieš sukimosi kryptį. Ventiliatoriuje atsirandantis slėgio pasiskirstymas pavaizduotas **4.10 pav.**



4.9 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolius kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai mentės paverstos 30° kampu.

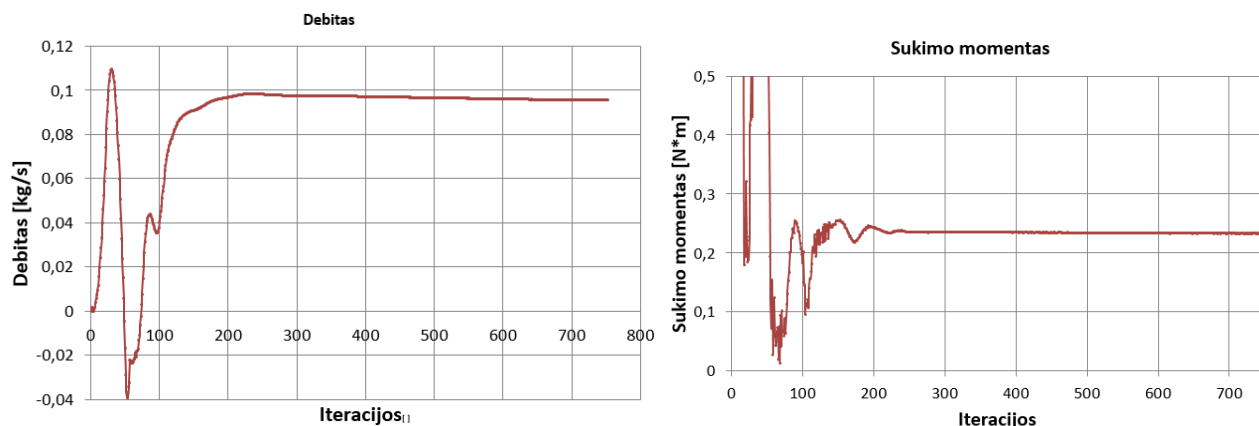


4.10 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje

Ventiliatoriaus parametrų (debito ir apkrovos momento) diagramos iteracijų atžvilgiu, pateiktos **4.11 pav.** Oro srauto debitas po 700 iteracijų yra 0,0957 kg/s, o sukimo momentas reikalingas generuoti tokį srautą yra 0,233 Nm. Oro debitas lyginant, lyginant jį su ventiliatoriumi, kurio mentės palenktos 20° kampu padidėjo 0,001 kg/s, o pasipriešinimo momentas sumažėjo 0,02 Nm. Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas specifinis šio ventiliatoriaus galingumas:

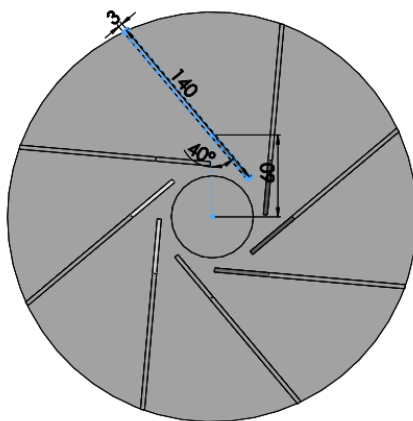
$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,233}{0,0957} = 382 \frac{W}{\text{kg/s}}$$

Ventiliatoriaus naudingumas, lyginant jį su pirminiu (su spindulinėmis mentėmis) ventiliatoriumi, pagerėjo 60 W/kg/s, o lyginant su ventiliatoriumi, kurio mentės palenktos 20° kampu pagerėjo 37 W/kg/s.

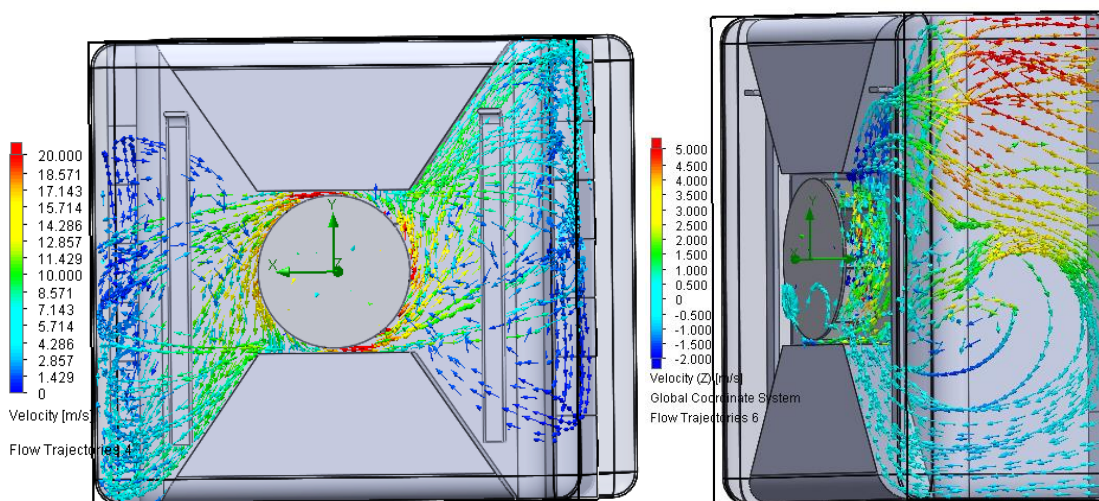


4.12 pav. Ventiliatoriaus su 30° kampu palenktomis mentėmis debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

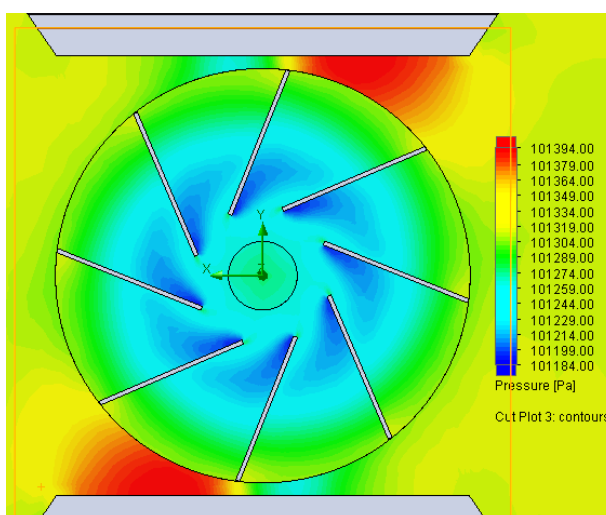
Ventiliatoriaus menčių palenkimo kampą padidinus dar 10° gautas, 40° menčių pavirtimo kampas (**4.13 pav.**). Oro srautas, dėl tokiu kampu palenktų menčių pasiskirsto tolygiau (**4.14 pav.**), sumažėja atgalinio sūkurio dydis.



4.13 pav. Ventiliatorius su 40° palenktomis mentėmis



4.14 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai mentės paverstos 40° kampu

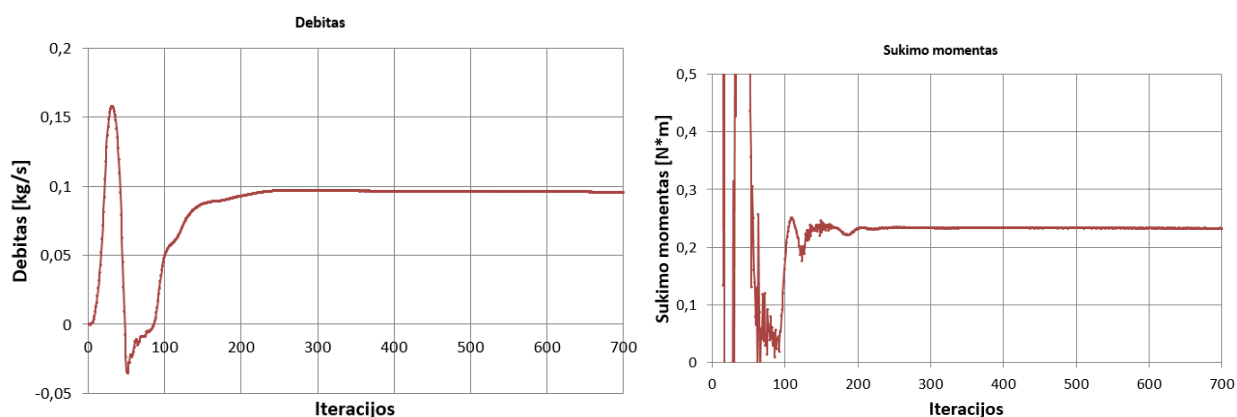


4.15 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje, menčių pavirtimo kampas 40°

Ventiliatoriaus parametrų (debito ir apkrovos momento) diagramos iteracijų atžvilgiu, pateiktos **4.16 pav.** Oro srauto debitas po 700 iteracija yra 0,0957 kg/s, o sukimo momentas reikalingas generuoti tokį srautą yra 0,233 Nm. Oro debitas ir sukimo momentas lyginant juos su ventiliatoriumi, kurio mentės palenktos atgal 30° kampu nepakito. Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas specifinis šio ventiliatoriaus galingumas:

$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Q_m} = \frac{157 \cdot 0,233}{0,0957} = 382 \frac{W}{\text{kg/s}}$$

Ventiliatoriaus naudingumas, lyginant jį su 30° kampu paverstomis mentėmis nepasikeitė.



4.17 pav. Ventiliatoriaus su 40° kampu palenktomis mentėmis debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

Apibendrinti, skirtingu kampu atgal palenktų menčių ventiliatorių rezultatai surašyti 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Ventiliatorių su skirtingomis mentėmis palyginimas

Menčių palinkimo kampas, °	Debitas, kg/s	Sukimo momentas, Nm	Galingumas, W	Naudingumas, W/kg/s	Santykinis naudingumo pagerėjimas, %
0	0,0962	0,271	42,5	442	0
20	0,0947	0,253	39,7	419	5
30	0,0957	0,233	36,6	382	14
40	0,0957	0,233	36,6	382	14

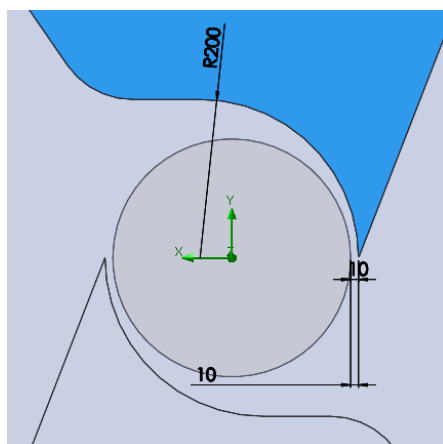
Ventiliatoriaus mentes palenkus prieš sukimosi kryptį 30° ir 40° jo naudingumą pavyko padidinti santykinį naudingumą pavyko padidinti 14%. Nors tokių ventiliatorių našumas mažesnis, tačiau jiems reikia mažiau energijos. Kadangi ventiliatorių, kurio mentės palenktos 30° laipsniu kampu paprasčiau pagaminti ir eksploatuoti, toliau bus tobulinamas jo dizainas.

4.2. VENTILIATORIAUS ORO SUSPAUDIMO KAMEROS FORMOS PARINKIMAS

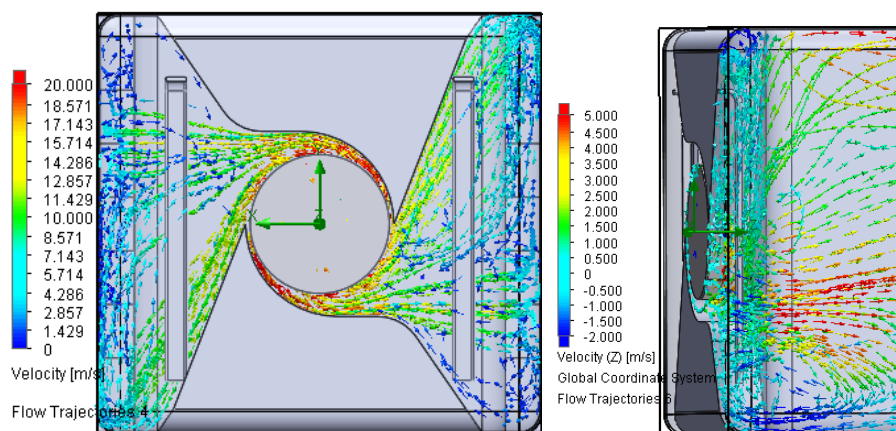
Ventiliatoriaus efektyvumui didelę įtaką turi ir suspaudimo kamera. Ji gali ne tik padidinti ventiliatoriaus efektyvumą, bet ir nukreipti oro srautą pageidaujama kryptimi. Dėl temperatūrinių

deformacijų, mažiausias tarpelis, tarp darbo rato ir suspaudimo kameros sienelių negali būti labai mažas, šioje analizėje jis yra 10 mm. Suspaudimo kamera, dėl technologinių aplinkybių negali būti optimalios – spiralės formos. Kadangi ventiliatorius turi turėti du oro išėjimo kanalus, galima naudoti pastovaus spindulio lanko formos suspaudimo kameras. Jų dalis būtų nesunku išvalcuoti, ir sustiprinti lazeriu išpjautomis standumo briaunomis. Toliau nagrinėjami ventiliatoriai, kurių mentės palenktos atgal 30°.

Pirmuoju atveju simuliuojama konstrukcija, kai lankas dengia du ketvirtadalius ventiliatoriaus darbo rato, o išlenkimo spindulys 200 mm (**4.18 pav.**). Ventiliatoriaus su tokia slėgio kamera sukuriamas oro srautas pavaizduotas **4.19 pav.** Ventiliatorių paliekantis oro srautas pasiskirsto daug tolygiau, nei ventiliatoriaus be slėgio kameros. Grįžtančiojo oro sūkuriai yra daug mažesni. Sprendžiant vien iš oro srautų judėjimo, suspaudimo kamera turi didelį teigiamą efektą, visos kamerinės konvekcinės krosnies kaitinimo kokybei.

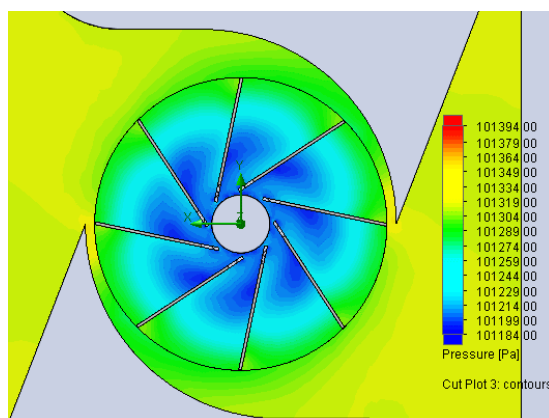


4.18 pav. Pirmoji slėgio kamera



4.19 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojama pirmoji slėgio kamera

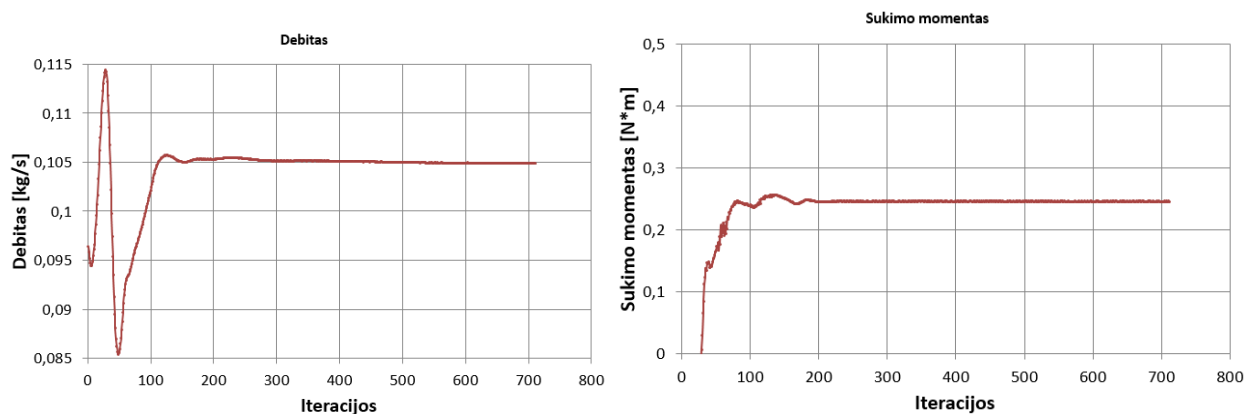
Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje pavaizduotas **4.20 pav.** Lyginant su ventiliatoriais kurie neturi oro suspaudimo kameros, nebeliko slėgio koncentracijos vietų. Žemo slėgio sritis tapo didesnė.



4.20 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje su pradine slėgio kamera

Ventiliatorius su suspaudimo kamera pasižymi ne tik geresnėmis (tolygesnėmis) oro srauto pasiskirstymo savybėmis. Simuliacijos metu apskaičiuota (**4.21 pav.**), kad toks ventiliatorius gali generuoti 0,105 kg/s, o jam reikalingas sukimo momentas yra lygus 0,246 Nm. Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas specifinis šio ventiliatoriaus galingumas:

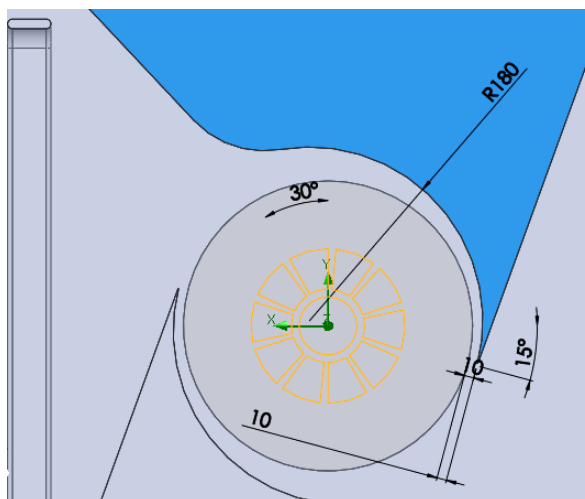
$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,246}{0,105} = 368 \frac{W}{kg/s}$$



4.21 pav. Ventiliatoriaus su pirmąja slėgio kamera debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

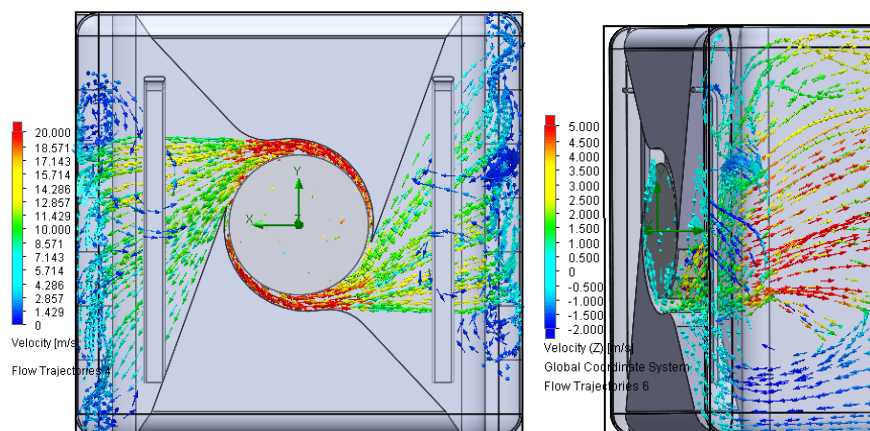
Naudojant tokią kamerą galima ventiliatoriaus efektyvumą padidinti 14 W/kg/s. Ventiliatoriaus debitas padidėjo 0,0093 kg/s, o pasipriešinimo momentas išaugo tik 0,013Nm.

Atsižvelgus į gautus oro srautų rezultatus, buvo pakeista suspaudimo kameros forma. Padidintas jos perdengimo ilgis, sumažintas spindulys. Pirmoje suspaudimo kameroje šoninis dalis dengė darbo ratą tik iki pusės, naujame – A dizaine, suspaudimo kamera šoną dengia 15° daugiau (4.22 pav.).

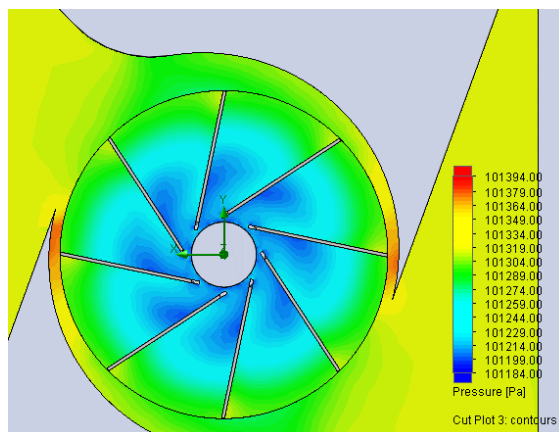


4.22 pav. A suspaudimo kamera

Ventiliatorius su tokio tipo suspaudimo kamera sukuria didesnio greičio oro srautą, tačiau dėl savo formos sukuria ir daugiau didesnius grįžtamuosius sūkurius, oro srauto pasiskirstymas yra netolygus 4.23 pav. Dėl sumažėjusios suspaudimo kameros spindulio, padidėjo slėgis slėgimo kameros pradžioje (4.24 pav.), taip pat nežymiai sumažėjo žemo slėgio regionas.



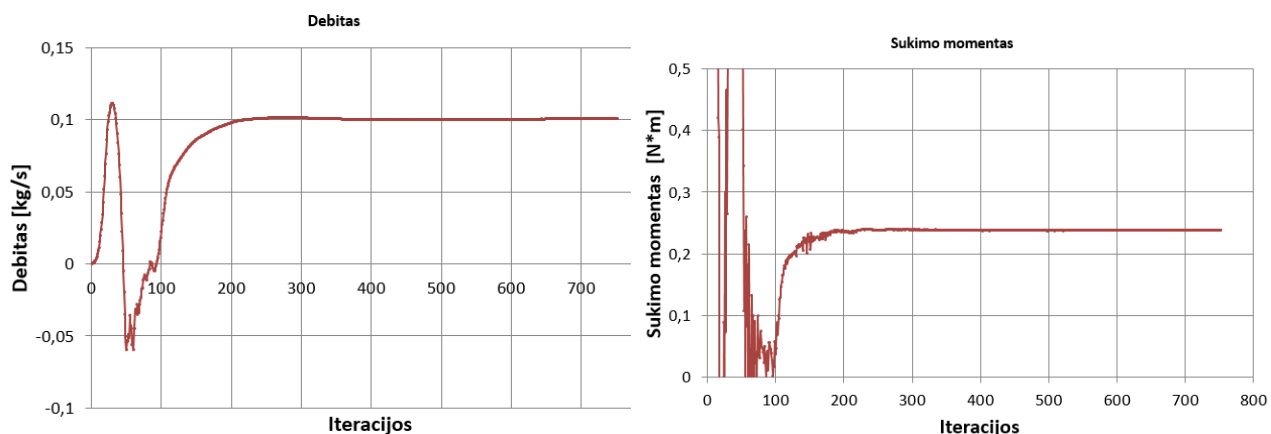
4.23 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojama A slėgio kamera



4.24 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje su A slėgio kamera

Nors oro srautai pasiskirstė blogiau, nei simuliacijoje su pirmąja slėgio kamera, tačiau reikalingas sukimo momentas sumažėjo iki 0,239 Nm, o debitas sumažėjo iki 0,101 kg/s (**4. 25 pav.**). Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas specifinis šio ventiliatoriaus su A slėgio kamera galingumas:

$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,239}{0,101} = 371 \frac{W}{kg/s}$$

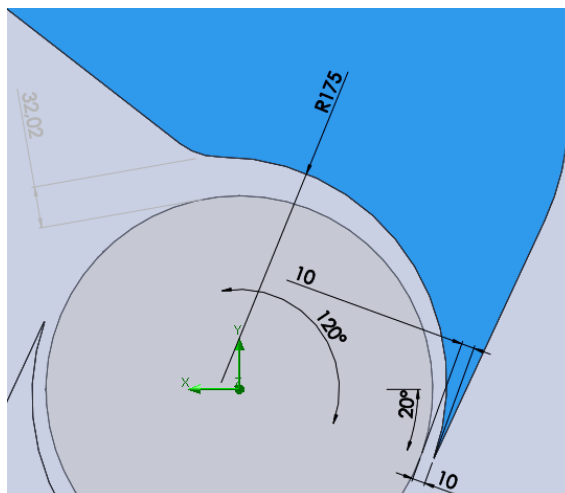


4.25 pav. Ventiliatoriaus su A slėgio kamera debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

A formos ventiliatorius ne tik pablogino oro srauto pasiskirstymo tolygumą, tačiau ir sumažino ventiliatoriaus naudingumą 3 W/kg/s. Tokios formos suspaudimo kamera pablogino ventiliatoriaus parametrus.

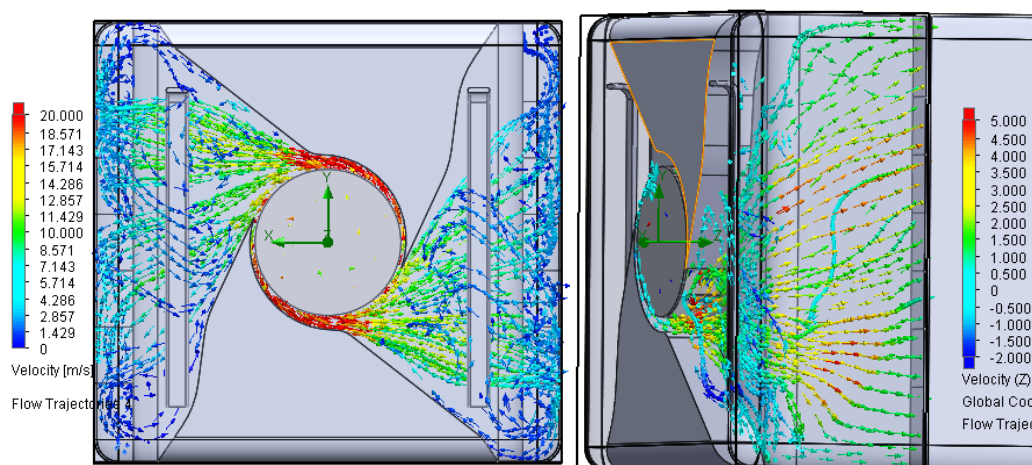
Nepavykus pirmu kartu pagerinti ventiliatoriaus, buvo suprojektuota nauja suspaudimo kamera. Norint išlaikyti tvarką, ji pavadinta suspaudimo kamera B (**4.26 pav.**). Siekiant oro srautą

nukreipti labiau į vidurį, ventiliatoriaus šonas buvo uždengtas 20° daugiau nei iki vidurio, bendras uždengimo kampas 120° . Siekiant padidinti oro srauto greitį, buvo sumažintas suspaudimo kameros spindulys. Tokia suspaudimo formos kamera turėtų generuoti didesnę oro srautą, kai yra didesnis pasipriešinimo slėgis.

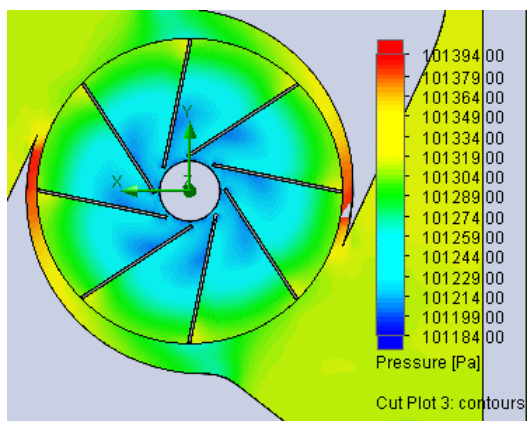


4.26 pav. Suspaudimo kamera B

Ventiliatoriaus su suspaudimo kamera B sukurti oro srautai (**4.27 pav.**) yra tolygiau pasiskirsto per kameros šoninius oro srauto kanalus. Oro sraute beveik nėra žalingų atgalinio srauto sūkurių. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje (**4.28 pav.**), parodo, kad padidintos šoninės perdangos ir sumažintas kameros spindulys sukuria didesnes aukšto slėgio zonas.



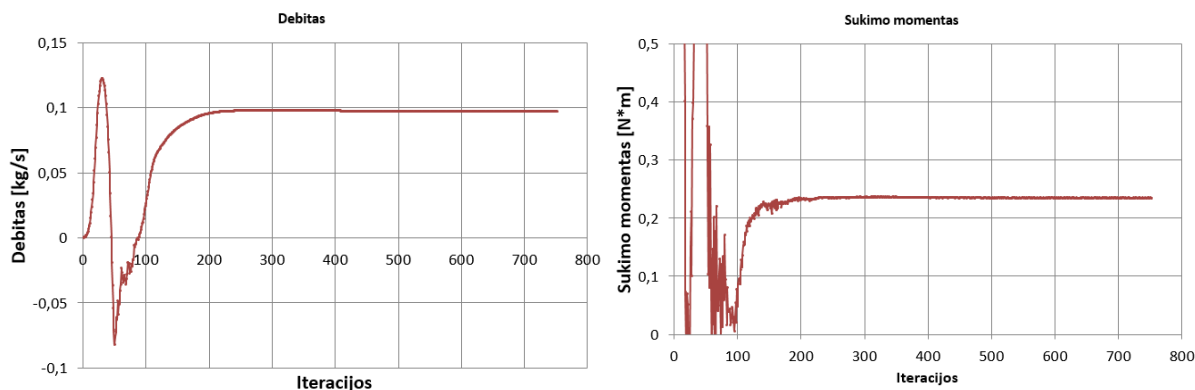
4.27 pav. Oro srautas ir oro greitis (absoliutus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojama B slėgio kamera



4.28 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje naudojant B slėgio kamerą

Ventiliatorius su B tipo slėgio kamera sukuria 0,0972 kg/s oro srautą ir jam sukurti ventiliatoriui reikia 0,235 Nm sukimo momento. Šio ventiliatoriaus naudingumas pagal (1.3) formulę:

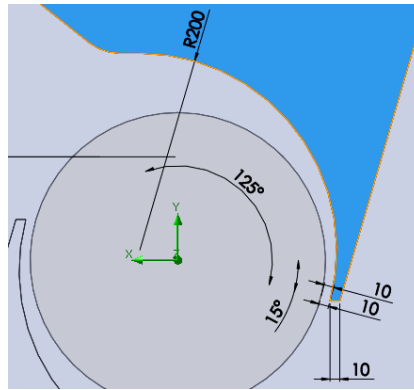
$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,235}{0,0972} = 380 \frac{W}{kg/s}$$



4.29 pav. Ventiliatoriaus su B slėgio kamera debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

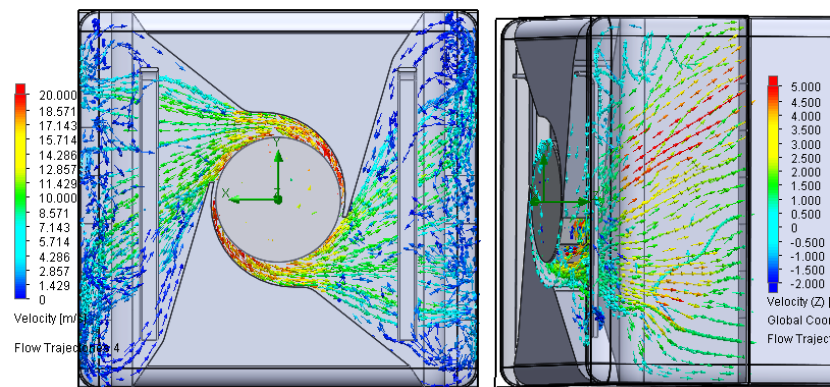
Ventiliatoriaus naudingumas naudojant B tipo suspaudimo kamera lyginant su pradine kamera sumažėjo 12 W/kg/s, o lyginant su patobulinta kamera sumažėjo 9 W/kg/s. Tačiau oro srauto pasiskirstymo tolygumas pagerėjo. Mažesnis kameros spindulys sumažino efektyvumą, o didesnis šoninis perdengimas padidino tolygumą.

Iš gautų oro srauto apykaitos, ir debito rezultatų matyti, kad efektyvesnė suspaudimo kamera būtų su didesniu spinduliu. Todėl buvo suprojektuota nauja – C (**4.30 pav.**) suspaudimo kamera, kurioje panaudota darant ankstesnius bandymus surinkta informacija.

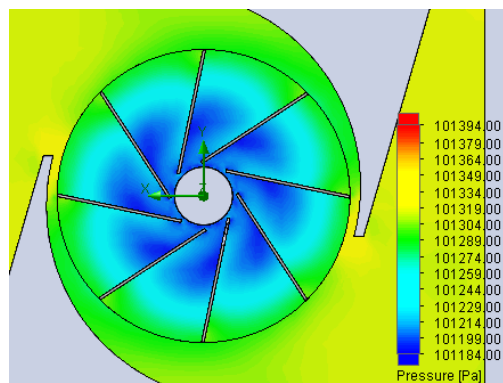


4.30 pav. Suspaudimo kamera C

Oro srautų pasiskirstymas yra tolygus (**4.31 pav.**), beveik nesusiformuoja atgaliniai sūkuriai. Toks pasiskirstymas yra tinkamas norint užtikrinti ir temperatūros tolygumą. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje (**4.32 pav.**) yra panašus kaip ir anksčiau nagrinėtuose ventiliatoriuose.



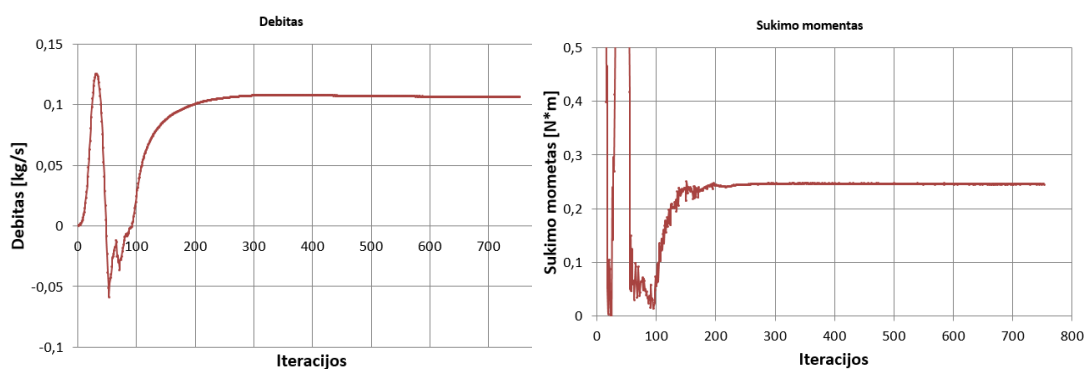
4.31 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojama C slėgio kamera



4.32 pav. Slėgio pasiskirstymas ventiliatoriuje naudojant C slėgio kamerą

Ventiliatorius su C suspaudimo kamera, generuoja 0,106 kg/s oro srautą, šiam srautui generuoti jam reikia 0,246 Nm sukimo momento (**4.33 pav.**). Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas ventiliatoriaus su C suspaudimo kamera naudingumas:

$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,246}{0,106} = 364 \frac{W}{kg/s}$$



4.33 pav. Ventiliatoriaus su C slėgio kamera debito ir sukimo momento grafikai iteracijų atžvilgiu

Naudojant C slėgio kamerą ventiliatoriaus naudingumas padidėjo 4 W/kg/s, reikalingas sukimo momentas nepakito, tačiau padidėjo debitas.

4.2 lentelė. Ventiliatorių slėgio kamerų palyginimas

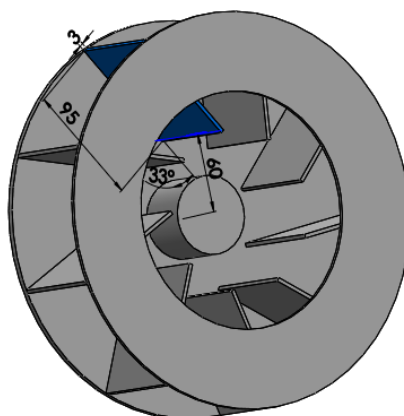
Slėgio kamera	Debitas, kg/s	Sukimo momentas, Nm	Galia, W	Naudingumas, W/kg/s	Naudingumo pokytis, %	Oro srauto tolygumas
Pradinė	0,105	0,246	38,6	368	0	vidutinis
A	0,101	0,239	37,5	371	-0,8	prastas
B	0,0972	0,235	36,9	380	-3	geras
C	0,106	0,246	38,6	364	1	geras

Ventiliatoriai su A ir C suspaudimo kameromis yra mažiau efektyvūs. Dėl A suspaudimo kameros geometrijos, sukuriamas oro srautas pasiskirsto netolygiai. Efektyviausiai dirba ventiliatorius su C suspaudimo kamera, be to, toks ventiliatorius sukuria ir tolygų oro srautą.

4.3. VENTILIATORIAUS DARBO RATO KOREGAVMAS

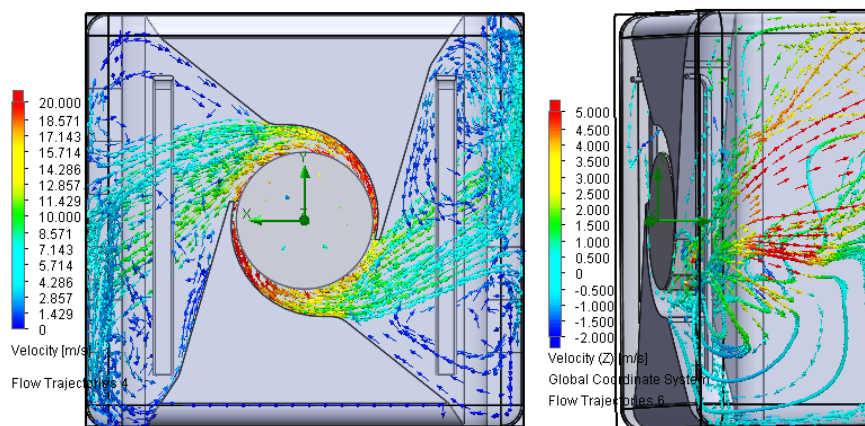
Parinkus ventiliatorių ir oro suspaudimo kamerą galima padaryti techninius pakeitimus jų konstrukcijoje, kurie leistu efektyviau išnaudoti ventiliatoriaus sunaudojamą energiją. Vidurinė

ventiliatoriaus zona nėra efektyvi, jos įtaka debitui mažesnė, nei apkrovos momentu. Naujajame ventiliatoriuje naudojamos 9 trumpesnės mentės, pasuktos 33° kampu atgal (**3.34 pav.**), taip pat padaryta nauja slėgio pertvara, kuri neleidžia orui esančiam ventiliatoriaus karštuose lengvai grįžti į žemesnio slėgio sritį esančia ventiliatoriaus centre.

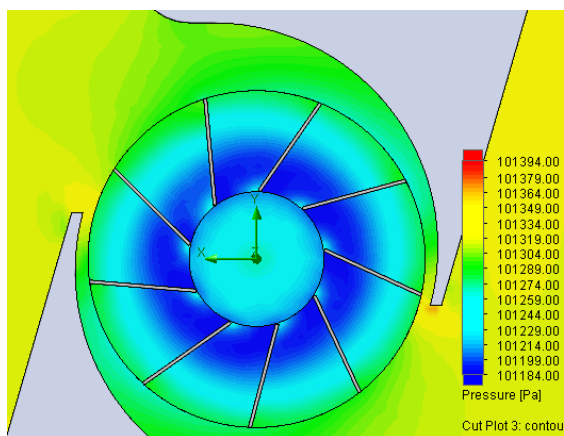


3.34 pav. Patobulintas ventiliatoriaus darbo ratas

Šio darbo rato generuojami oro srautai pavaizduoti **3.35 pav.** Oro srauto greitis akivaizdžiai padidėjo, todėl pradėjo formotis atgaliniai sūkuriai, o oro pasiskirstymo tolygumas sumažėjo. Dėl atliktų pakeitimų padidėjo žemo slėgio sritis ventiliatoriaus centre (**4.36 pav.**).



4.35 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojamas patobulinta darbo ratas

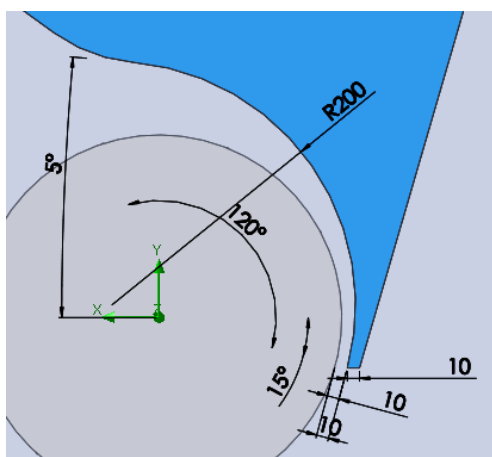


4.36 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojamas patobulinta darbo ratas

Toks ventiliatorius generuoja 0,109 kg/s oro srautą, sukurdamas 0,248 Nm sukimo momentą. Pagal (1.3) formulę paskaičiuotas naudingumas:

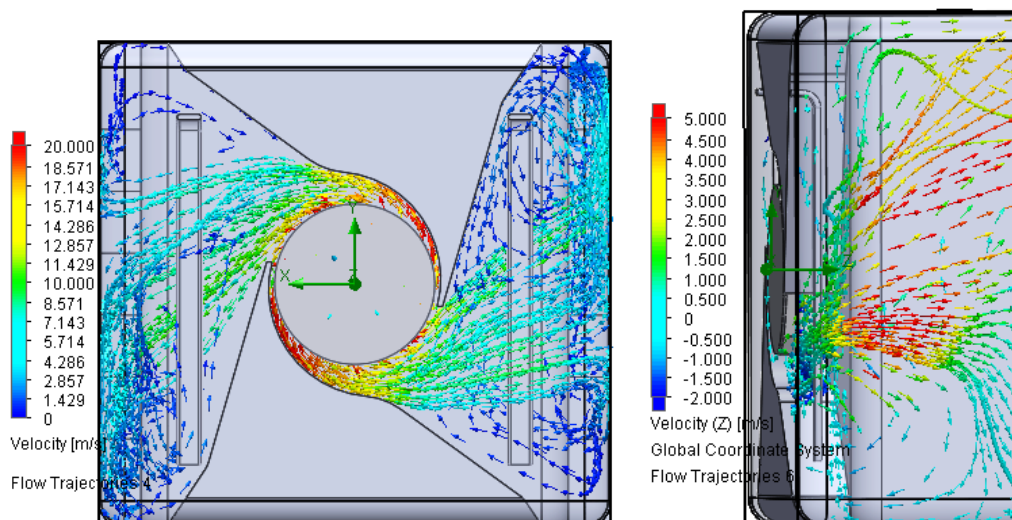
$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Qm} = \frac{157 \cdot 0,248}{0,109} = 357 \frac{W}{kg/s}$$

Patobulinus ventiliatoriaus darbo ratą pavyko jo naudingumą padidinti 7 W/kg/s, o debitą 0,003 kg/s. Dėl padidėjusio debito išaugo oro srauto greitis. Dėl šių priežasčių reikia nežymiai modifikuoti suspaudimo kamerą (**4.37 pav.**), sumažinti uždengimo kampą bei padidinti atstumą tarp darbo rato ir suspaudimo kameros vietoje, kur oras palieka ventiliatorių.



4.37 pav. Patobulintam darbo ratui adaptuota suspaudimo kamera

Ventiliatoriaus su modifikuota suspaudimo kamera generuojami oro srautai pavaizduoti **4.38 pav.** Srautai su patobulinta suspaudimo kamera pasiskirstė daug tolygiau.



4.38 pav. Oro srautas ir oro greitis (absolūtus kairėje ir išilgai krosnies dešinėje), kai naudojamas patobulinta darbo ratas ir patobulinta suspaudimo kamera

Pagal (1.3) formulę apskaičiuotas ventiliatoriaus su patobulintu darbo ratu ir patobulinta suspaudimo kamera naudingumas:

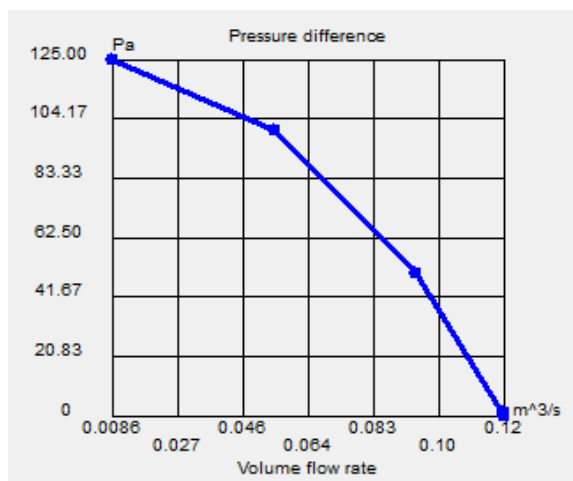
$$\eta_p = \frac{\omega \cdot M}{Q_m} = \frac{157 \cdot 0,247}{0,109} = 356 \frac{W}{kg/s}$$

Patobulinta suspaudimo kamera netik pagerino oro srautų pasiskirstymą, bet ir nežymiai (1W/kg/s) pagerino efektyvumą.

4.4. ORO SRAUTŲ NUKREIPIMO PARINKIMAS

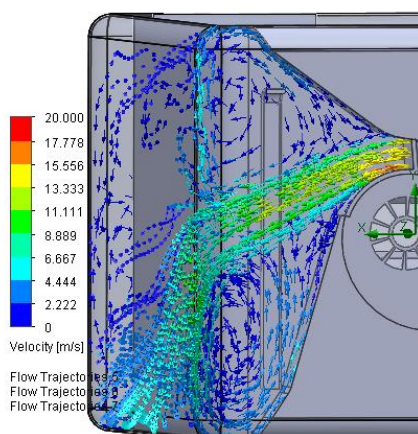
Norint tolygiau ir stabiliau paskirstyti srautus reikia juos nukreipti. Atliekant simuliacijas, kurių metu parenkama orų srautų valdymo sistema, pravartu turėti teorinį ventiliatoriaus modelį. Jo dėka galima stipriai supaprastinti skaičiavimo modelį, taip bus paspartinti skaičiavimai. Kuriant teorinį ventiliatoriaus modelį, reikia slėgio skirtumų ir debito grafikų. Šiam tikslui, atliktos kelios simuliacijos, kurių metu buvo pakeistas pasipriešinimo slėgis ir apskaičiuotas debitas. Debito priklausomybės nuo slėgių skirtumo grafikas pavaizduotas. Nesant slėgių skirtumui, debitas 0,239 m³/s, skirtumui siekiant 50 Pa, debitas 0,190 m³/s, skirtumui esant 100 Pa debitas krenta iki 0,100

m^3/s , o skirtumui išaugus iki 125 Pa, debitas sumažėja net iki $0,0171 \text{ m}^3/\text{s}$. Kadangi šiose simuliacijose bus skaičiuojama tik puse domeno, ventiliatoriaus debitas sumažintas du kartus.



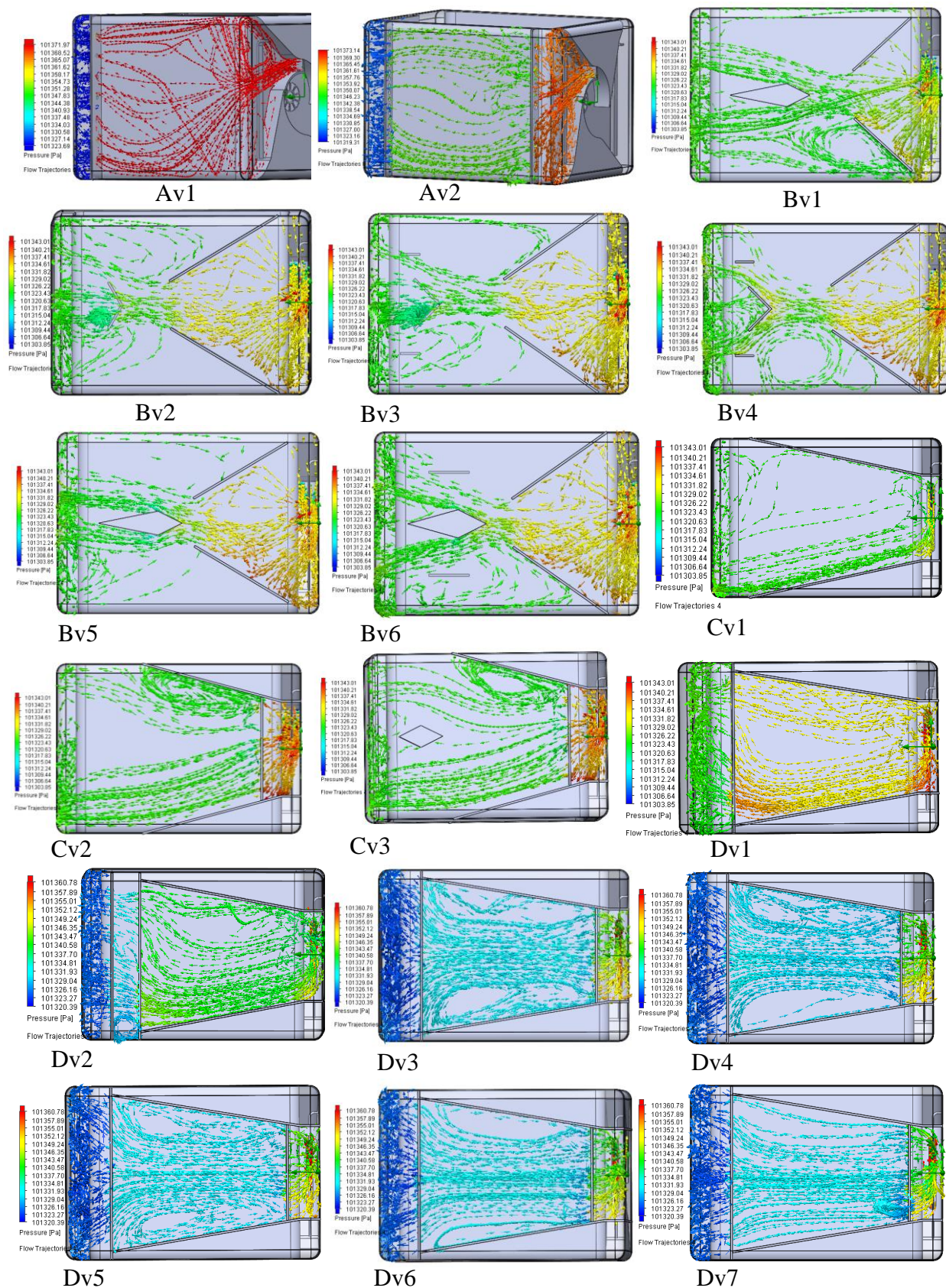
4.39 pav. Ventiliatoriaus slėginė charakteristika

Sukūrus teorinį ventiliatoriaus modelį, reikia jį integruoti į skaičiuojamąjį modelį. Oro išėjimo paviršius sudarytas toks, kad kuo tiksliau atkartotų ventiliatoriaus oro srautą. Atlikus kelis bandymus, buvo parinkta geometrija, kurios generuojamas oro srautas pavaizduotas **4.40 pav.**



4.40 pav. Teorinio ventiliatoriaus oro srauto greitis

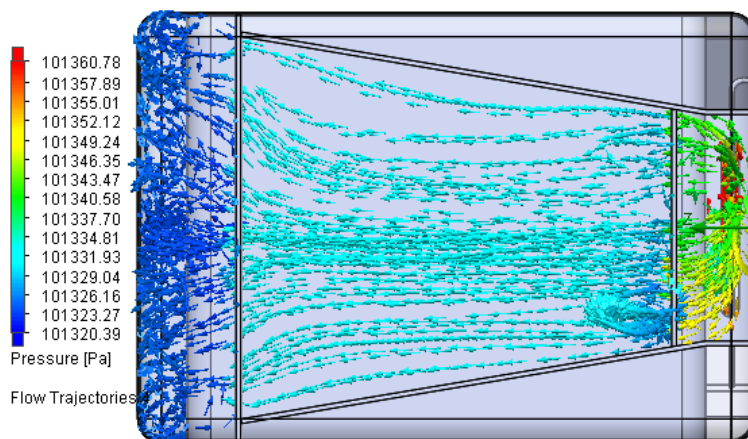
Renkant tinkamiausią oro srautų nukreipimo sistemą buvo atlikta įvairių konfigūracijų ir dizaino šoninių oro srauto kanalų simuliacijų. Buvo naudojami įvairūs srautų kreiptuvai, užtvaros. Naudotos formos pateiktos **4.41 pav.**



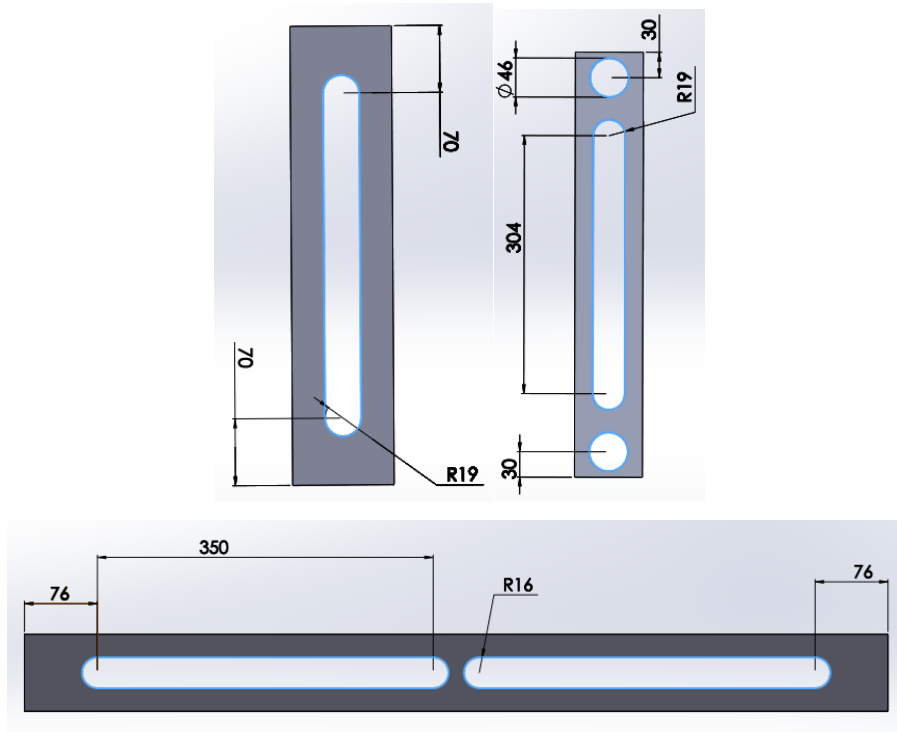
4.41 pav. Bandytos srautų valdymo konstrukcijos

Renkant srauto nukreipimo elementus buvo atsižvelgta į srauto pasiskirstymą ir sukuriama pasipriešinimą. Tolygiausias srautas buvo pasiektas įdėjus pertvarą, kuri srauto debitą (skaičiuojant

abi puses) sumažino net iki 0,0132 kg/s (0,0290 m³/s), toks mažas srautas yra nepakankamas. Daugumoje kitų atvejų, nebuvo tenkinami srauto tolygumo ir/arba srauto debito reikalavimai. Pasirinktas variantas Dv7, kuris geriausiai atitiko keliamus srauto tolygumo ir pralaidumo reikalavimus (**4.42 pav.**). Skaičiuojant abi puses, toks srauto kreipimo sistema gali užtikrinti srauto 0,0861 kg/s (0,189 m³/s) debitą. Kreiptuvą sudarantys elementai pavaizduoti **4.43 pav.**



4.42 pav. Pasirinkto srautų kreiptuvo Cv7 oro srautai ir jų slėgio pasiskirstymas



4.42 pav. Oro srautų kreipimo elementai

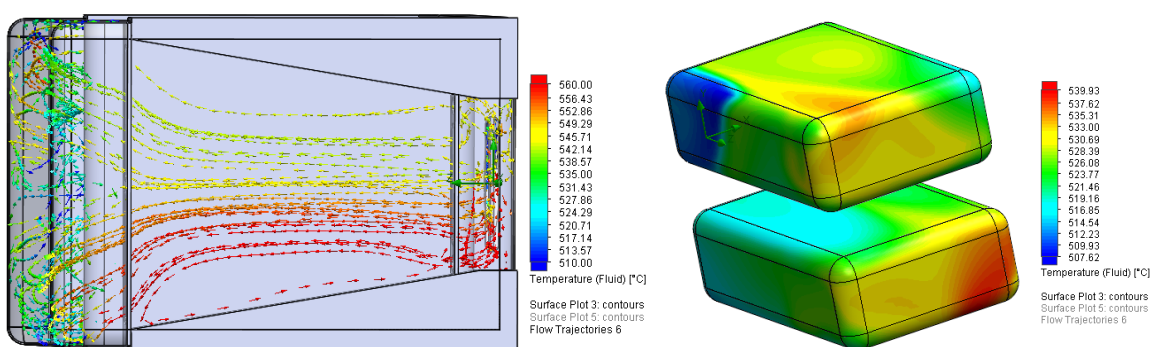
4.5. IŠVADOS

Tobulinant kamerinės konvekcinės krosnies oro srautus, sumodeliuotas ventiliatorius (darbo ratas ir suspaudimo kamera), ventiliatoriaus naudingumą padidino 20 %, taip pat pavyko tolygiau paskirstyti oro srautą. Sumodeliavus oro nukreipimo sistemą, pavyko pasiekti patenkinamą oro srauto tolygumą debitui sumažėjus tik $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ (nuo $0,239 \text{ m}^3/\text{s}$ iki $0,189 \text{ m}^3/\text{s}$).

5. TEMPERATŪROS PASISKIRSTYMO PATOBULINTOJE KAMERINĖJE KONVEKCIŖJE KROSNYJE TYRIMAS

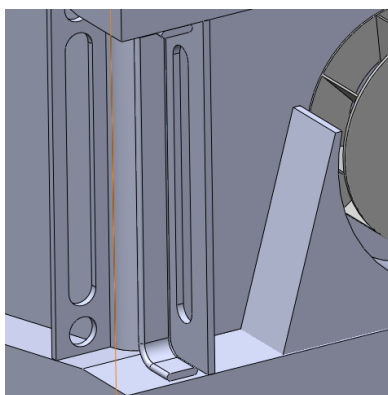
5.1. PAKEISTOS KAMERINĖS KONVEKCIŖNĖS KROSNIES SKAIĀIAVIMAI

Simuliacijos rezultatai gauti apjungus ankšĉiau padarytus patobulinamus gauti ne tokie kokių tikėtasi. Dėl netolygaus oro srauto pasiskirstymo ties kaitintuvu, oras išyla nevienodai (**5.1 pav.**), todėl oro temperatūros pasiskirstymas ties kaitinamu objektu yra labai netolygus (**5.1 pav.**). Netolygumas siekia 32°.

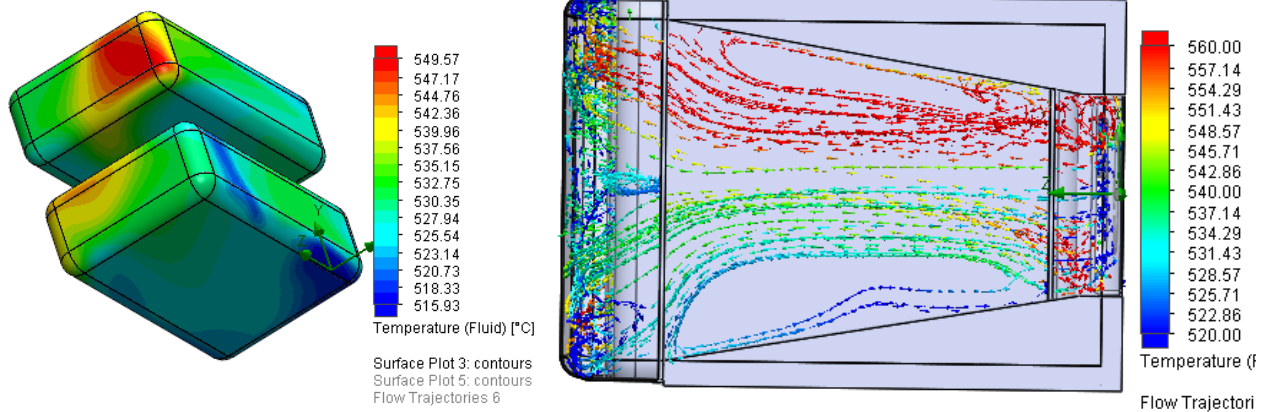


5.1 pav. Temperatūrų pasiskirstymas

Pakeitus šildytuvo vietą – jį perstačius tarp dviejų oro srauto pertvarų (**5.2 pav.**), didelio pokyĉio oro srauto temperatūros pasiskirstyme nebuvo (**5.3 pav.**), netolygumas ties kaitinamais objektais padidėjo iki 33°.



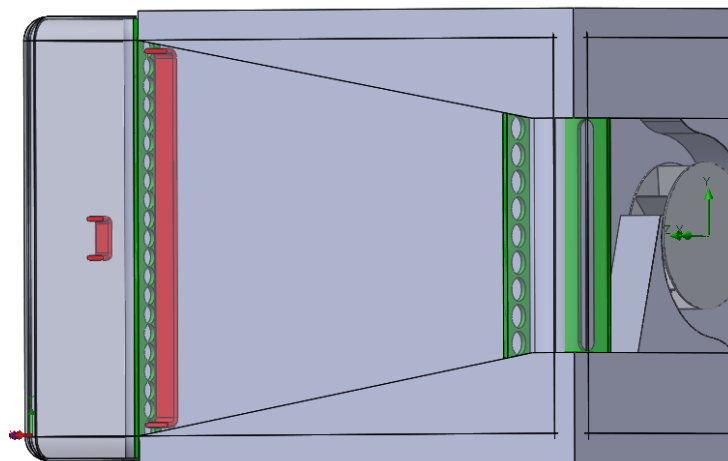
5.2 pav. Perkelta kaitintuvo vieta



5.3 pav. Temperatūrų pasiskirstymas

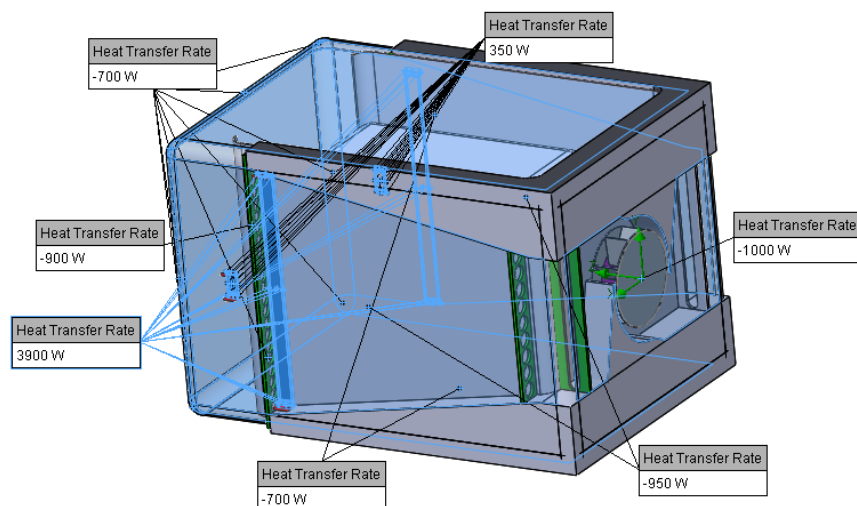
Norint padidinti temperatūrų pasiskirstymo tolygumą reikia atlikti daugiau pakeitimų kameroje.

Todėl šildytuvas buvo perkeltas prieš paskutinę pertvarą, įdiegtas papildomas šildytuvas (**5.4 pav.**), kuris kompensuotų srauto temperatūros netolygumą dėl skirtingo oro greičio aptekant pagrindinį šildytuvą. Taip pat buvo padidintas kameros priekio tūris, nežymiai pakeistos esamos užtvartos ir pridėta pertvara pagrindinėje krosnies kameroje prieš ventiliatoriaus oro įsiurbimo angą ir padidintas ventiliatoriaus sukimosi greitis iki 1800 aps/min.



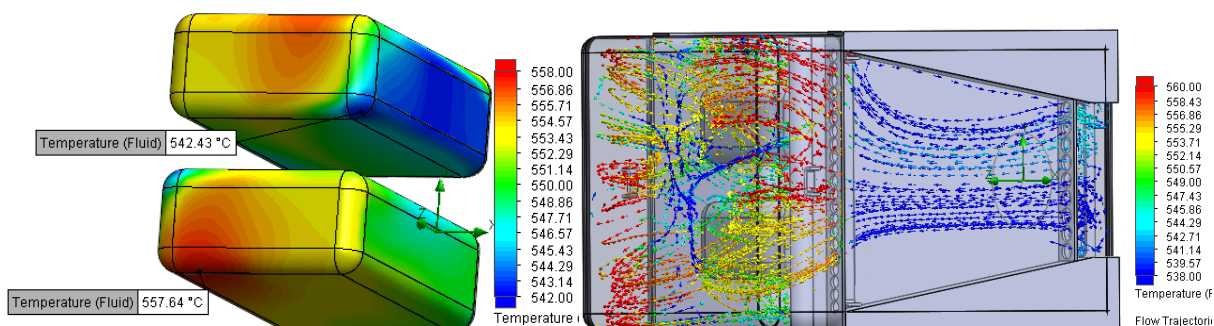
5.4 pav. Pakeistos krosnies patobulinimai (raudona spalva kaitintuvai, žalia užtvartos)

Atikus šiuos pakeitimus, buvo prie jų adaptuotos ir pradinės sąlygos. Siekiant išlaikyti šilumos balansą, buvo pakeisti paviršių šilumos šaltinių galios parametrai (**5.5 pav.**).



5.5 pav. Šilumos paviršinių šaltinių galios parametrai

Atikus simuliacija su nauja kamera, gauti temperatūros pasiskirstymo rezultatai pateikti **5.6 pav.**

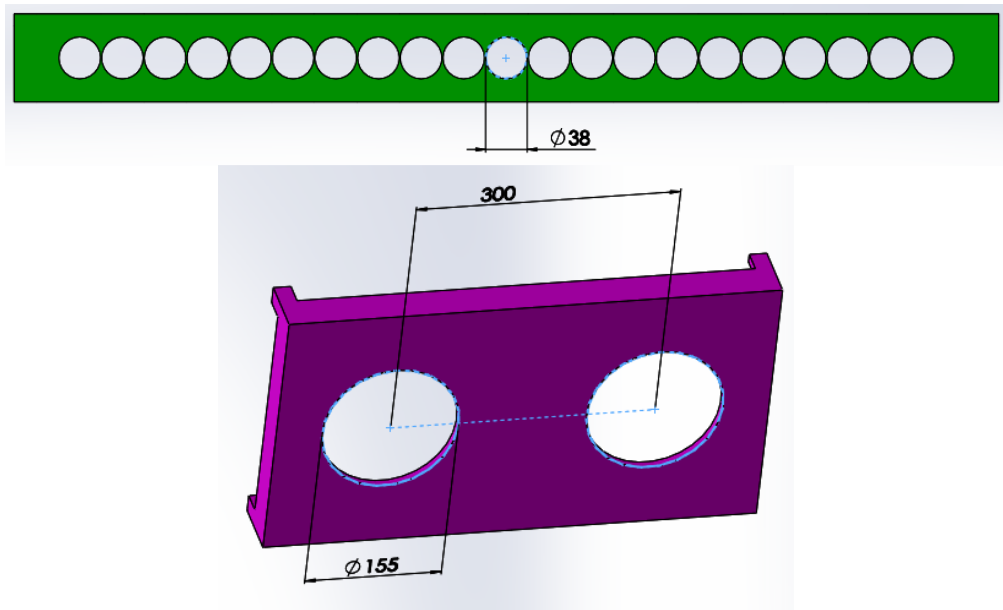


5.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas patobulintoje pakeistoje krosnyje

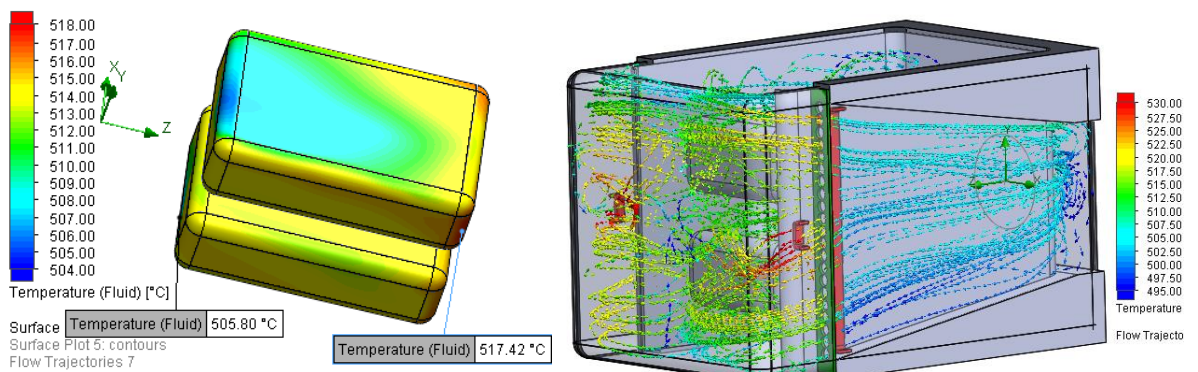
Oro temperatūros skirtumai prie kaitinamo objekto svyruoja $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ nuo $558\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $542\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jis 20% geresnis nei buvo pradinėje kameroje.

5.2. PATOBULINTOS KAMERINĖS KONVEKCIINĖS KROSNIES ANALIZĖ

Perkėlus kaitintuvus arčiau krosnies priekio nebeliko tolygaus oro srauto poreikio prie ventiliatoriaus. Pasikeitus kameros konstrukcijai, galima pašalinti oro užtvaras prie ventiliatoriaus. Palikta tik modifikuota priekinė užtvara, ir dangtis prie ventiliatoriaus įsiurbimo angos (**5.8 pav.**). Atlikus simuliaciją, gauti temperatūros pasiskirstymo rezultatai pateikti **5.7 pav.**



5.8 pav. Oro užtvaros kameroje



5.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas patobulintoje pakeistoje krosnyje

Temperatūros netolygumas siekia 11 °C. Tai yra 45% geresnis tolygumas nei pradinėje krosnyje (20 °C).

IŠVADOS

Siekiant suprojektuoti kamerinę konvekcinę krosnį, kuri atitiktų aukštus kokybinius reikalavimus ir būtų konkurencinga kainos atžvilgiu, reikia taikyti inovatyvius konstrukcinius sprendimus. Tolygų temperatūros pasiskirstymą gali užtikrinti naši priverstinės konvekcijos sistema. Kadangi srautų dinamika yra sudėtinga mokslo šaka, aukštos kokybės kamerinių konvekcinių krosnių projektavimas reikalauja daug žinių, komplikuoatų analizių atlikimo.

Skaičiuojant kamerinės konvekcinės krosnies temperatūros pasiskirstymą, patogiu naudotis skaitinės analizės metodų pagrindu sukurtomis programomis. Programa „SOLIDWORKS“ galima atlikti ne vien projektavimo darbus, bet ir skysčių dinamikos skaičiavimus pagrįstus baigtinių tūrių metodu.

Atlikus tipinio, įmonėje „Termoskalė“ projektuojamų, priverstinės konvekcinės krosnių kameros dizaino analizę, gauti rezultatai parodė, kad tokio dizaino kameros neužtikrina aukštų kokybės reikalavimų. Oro temperatūros skirtumai, prie ruošinių paviršiaus siekia virš 20 °C. Oro srauto dinamika kameroje yra nestabili, beveik neįmanoma suprojektuoti universalios tokio dizaino kameros, nes oro tėkmės parametrams labai didelę įtaką daro joje esantys objektai. Priverstinę konvekciją kuriantis ventiliatorius neturi suspaudimo kameros, todėl nėra efektyvus. Aukštus kokybinius reikalavimus atitinkančią krosnį, kuri būtų universali, galima suprojektuoti tik iš esmės pakeitus kameros konstrukcijos dizainą.

Suprojektavus naują ventiliatoriaus darbo ratą, kurio mentės paverstos 33° kampu atgal bei suspaudimo kamerą, kurios pagrindinės dalys yra puslankiai elementai, pavyko ventiliatoriaus efektyvumą padidinti 20 %. Iš tokio ventiliatoriaus išeinantis oras pasiskirsto tolygiau.

Pakeitus krosnies pagrindinės kameros geometriją, perkėlus kaitintuvus arčiau priekio, tarp kaitintuvų ir pagrindinės kameros įstačius oro užtvarą, padidinus ventiliatoriaus sukimosi greitį bei uždėjus oro nukreipimo kanalus, pavyko temperatūros pasiskirstymo tolygumą aplink kaitinimą objektą padidinti 45%, nuo 20 °C iki 11 °C, toks tolygumas tenkina užduotą 15 °C tolygumo sąlygą.

LITERATŪRA

1. MASIOKAS, S. *Elektrotechnika: Vadovėlis. 2-asis patasis. ir papild. leid. ed.* Kaunas: Candela, 1994 ISBN 9986400007.
2. ŠVENČIANAS, P. ir ADOMAVIČIUS, A. *Inžinerinė Termodinamika, Vadovėlis. 1-a laida. ed.* Kaunas: Technologija, 2013 ISBN 9786090208816.
3. *Design and Fabrication of Multi Engine Air Compressor.* Elektrononos išteklius [žiūrėta 2015.05.5], 2015 Prieiga per: <http://ephjournal.com/EPH-Pdf/International-Journal-of-Science-and-Engineering/June-2015/International-Journal-of-Science-and-Engineering-3.pdf>.
4. *Screw Air Compressor Elements (Air-Ends) | Air Compressor Guide.* Elektroninis išteklius [žiūrėta 2015.04.20], 2015 Prieiga per: <http://www.air-compressor-guide.com/learn/compressor-types/rotary-screw-compressor/screw-air-compressor-element>.
5. *Roots Superchargers - how Superchargers Work | HowStuffWorks.* Elektroninis išteklius [žiūrėta 2016.04.20]. , 2006 Prieiga per: <http://auto.howstuffworks.com/supercharger2.htm>.
6. *Centrifugal Fan / Ventilation / Blow-Off / with Forward-Curved Blades - DYF-146-QD - Wenling Dayang Electric Appliances Factory.* Elektroninis išteklius [Žiūrėta 2015.05.4], 2013 Prieiga per: <http://www.directindustry.com/prod/wenling-dayang-electric-appliances-factory/product-99295-1030727.html>.
7. *Big Idea, Small Compressor: Silent Fan Inspired by Nature.* Elektroninis išteklius [Žiūrėta 2015.05.01]. , 2013 Prieiga per: <http://www.thecompressedairblog.com/big-idea-small-compressor-silent-fan-inspired-by-nature/>
8. NELIK, L. *Centrifugal & Rotary Pumps: Fundamentals with Applications.* CRC Press, 1999 ISBN 0-8493-0701-5.
9. *Chamber Furnace / Heating / Gas-Fired / Forced Convection - Max. 750 °C | DU Series - Ceradel Industries.* Elektroninis išteklius [Žiūrėta 2015.04.05], 2013 Prieiga per: <http://www.directindustry.com/prod/ceradel-industries/product-68368-1043425.html>.
10. *Centrifugal Vs. Vane-Axial Fans.* Elektroninis išteklius [2015.04.05], 2006 Prieiga per: <http://ateam.lbl.gov/Design-Guide/DGHtm/centrifugalvs.vane.axialfans.htm>.
11. *Value in the Air. Why Direct Drive Backward Curved Plenum Fans?* Elektroninis išteklius, 2011 Prieiga per: http://www.esmagazine.com/ext/resources/ES/Home/Files/PDF/WP_AAon.pdf.
12. *Fans and Blowers: Types, Performance Evaluation, Efficient System Operation, Flowcontrol Strategies and Energy Conservation Opportunities.* Elektroninis išteklius [žiūrėta 2016.03.20], 2013 Prieiga per: <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2011/09/Chapter-3.5-Fans-Blowers.pdf>.
13. *Fans for Ducted Ventilation Systems.* Elektroninis išteklius [žiūrėta 2016.04.20], 2011 Prieiga per: <http://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2011-12/>.
14. *Centrifugal Fan.* Elektroninis išteklius [žiūrėta 2016.04.20], 2014 Prieiga per: <http://www.hvaceducationaustralia.com/Resources/Images/Centrifugal Fan x 3.bmp>.

15. *Promotion Keep it Hot - BINDER Drying Ovens, Heating Chambers*. Elektroninis išteklius [žiūrėta 2016.03.02], 2015 Prieiga per: <http://www.binder-oven.us/oven/>.
16. ŽDANKUS, N. ir ŽDANKUS, T. *Skysčių Mechanika: Mokomoji Knyga*. Kaunas: Technologija, 2011 ISBN 9786090205020.
17. R. BARAUSKAS. *Skysčių Tėkmės Uždaviniai*. Elektroninis išteklius [žiūrėta 2015.02.20], 2014 Prieiga per: oras.if.ktu.lt/moduliai/T210M009/Mechanikos%20fak/P16_Skyscio_tekmes_uzdaviniai.ppt.
18. PLETCHER, R.H., ANDERSON, D.A. ir TANNEHILL, J.C. *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*. 3rd ed. ed. Boca Raton Fla: CRC Press, 2013 ISBN 9781591690375.