



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

**Laura Mingilaitė**

**ŠILUMOS ATIDAVIMO SKAITINIS MODELIAVIMAS SAULĖS  
KOLEKTORIAUS ELEMENTUOSE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. Robertas Poškas

**KAUNAS, 2017**

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

**ŠILUMOS ATIDAVIMO SKAITINIS MODELIAVIMAS SAULĖS  
KOLEKTORIAUS ELEMENTUOSE**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (kodas 621E30001)

**Vadovas**

(parašas) Doc. Robertas Poškas  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Lekt. L. Paukštaitis  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Laura Mingilaitė  
(data)

**KAUNAS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

---

Laura Mingilaitė

(Studento vardas, pavardė)

Termoinžinerija, 621E30001

---

„Šilumos atidavimo skaitinis modeliavimas saulės kolektoriaus elementuose“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 17 m. gegužės 23 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Lauros Mingilaitės**, baigiamasis projektas tema „Šilumos atidavimo skaitinis modeliavimas saulės kolektoriaus elementuose“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)



Mingilaitė, Laura. Šilumos atidavimo skaitinis modeliavimas saulės kolektoriaus elementuose. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Robertas Poškas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: saulės oro kolektorius, šilumos mainai, konvekcija, modeliavimas, ANSYS Fluent.

Kaunas, 2017. 64 p.

## SANTRAUKA

Saulės įrenginių šilumos atidavimo proceso intensyvumo didinimo tyrimai atliekami jau senai. Galimybė pagerinti šilumos atidavimo procesą, nenaudojant papildomo šilumos šaltinio, nagrinėjama pagerinant kolektoriaus elementų konstrukciją kliūtimis. Fluidui tekant kolektoriaus elemente susidaro pasienio sluoksnis, kuris mažina šilumos atidavimo proceso intensyvumą. Kolektoriuje su kliūtimis laminarinis pasienio sluoksnis yra suardomas turbulentinio fluido tekėjimo, todėl padidėja šilumos atidavimo procesas tarp fluido ir absorberio sienelės.

Šiame projekte tiriamas šilumos atidavimo procesas „galinio srauto“ (*angl. back-pass*) oro kolektoriaus elemento modelyje. Sukurti trys patobulintos konstrukcijos skaitiniai kolektoriaus elemento modeliai su kliūtimis, kai atstumas tarp jų kinta kas 0,08, 0,16 ir 0,24 m. Kolektoriaus elemento skaitinis modelis sudarytas naudojant ANSYS Fluent programinį paketą bei  $k-\varepsilon$  skaitinį tekėjimo modelį.

Tyrimo metu gauta, kad toks kolektoriaus konstrukcijos patobulinimas padidina šilumos atidavimo proceso intensyvumą tarp kolektoriuje tekančio fluido ir absorberio plokštelės, todėl padidėja ir bendras kolektoriaus efektyvumas. Taip pat nustatyta, kad esant didesniai fluido masiniam debitui vidutinė šilumnešio temperatūra sumažėja bei padidėja absorberio plokštelės temperatūra, todėl šilumos atidavimo procesas tampa spartesnis.

Mingilaitė, Laura. The Numerical Modelling of Heat Transfer in Solar Collector Elements: Master's thesis / supervisor doc. Robertas Poškas. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Energy Engineering

Key words: solar air collector, heat transfer, convection, modeling, ANSYS Fluent.

Kaunas, 2017. 64 p.

## **SUMMARY**

Heat transfer enhancement in solar technologies have been carried put in some applications all around the world. A possibility for increasing heat transfer with fluid without external energy supply is an endeavor in solar collector with battles. When fluid flows in a channel, baffles break the laminar sub-layer and create wall turbulence flow separation and resistance and augment the heat transfer.

A numerical modelling was carried out to study the thermal performance of a back-pass air collector with rectangular baffles. Construction of the model was improved by baffles which were set out in 0,08, 0,16 and 0,24 m distance. Attachment of baffles create a technique witch increase heat transfer between the fluid and the absorber in the solar collector. To solved this, was used the finite volumes method and low Reynolds number k- $\epsilon$  model in ANSYS FLUENT program.

In this paper, the results indicate that this collector design increased the enhancement of heat transfer process and solar collector's efficiency. Also, this study revealed that the flow and heat transfer characteristics are strongly dependent on mass flow rate of air.

## TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS .....	10
SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI .....	11
ĮVADAS .....	12
1 LITERATŪROS ANALIZĖ .....	14
1.1 Atsinaujinantys energijos ištekliai.....	14
1.1.1 AEI naudojimo poreikis .....	14
1.2 Saulės energija.....	15
1.2.1 Saulės energijos potencialas Lietuvoje.....	17
1.2.2 Saulės energijos panaudojimo būdai .....	19
1.2.2.1 Saulės kolektoriai.....	20
1.2.2.1.1 Plokštieji saulės kolektoriai .....	24
1.2.2.1.1.1 Orą šildantys saulės kolektoriai .....	26
1.2.2.1.2 Šilumos atidavimo proceso tyrimai atlikti plokščiojo tipo saulės kolektoriuose.....	29
2 TYRIMO METODIKA .....	33
2.1 ANSYS Fluent programinis paketas .....	33
2.1.1 Šilumos atidavimo proceso diferencialinių lygčių sistema .....	34
2.1.1.1 Šilumos mainų lygtis .....	34
2.1.1.2 Energijos lygtis .....	34
2.1.1.3 Judesio kiekio lygtis.....	35
2.1.1.4 Fluido vientisumo lygtis .....	35
2.2 Skaičiavimo modelis $k$ - $\epsilon$ .....	36
2.3 Modeliavimo eiga .....	37
3 TIRIAMOJO OBJEKTO SKAITINIS MODELIS .....	39
3.1 Kolektoriaus elemento geometrinis modelis .....	40
3.2 Kolektoriaus elemento skaičiavimo tinklelis.....	40

3.3	Modeliavimo kraštinės sąlygos .....	41
4	TYRIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ.....	43
4.1	Standartinės konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus elementas .....	43
4.1.1	Hidrodinaminiai aspektai.....	43
4.1.2	Temperatūrinis laukas.....	45
4.1.3	Šilumos atidavimo proceso intensyvumas.....	47
4.1.4	Kolektoriaus efektyvumas .....	48
4.2	„Galinio srauto“ kolektoriaus elementai su kliūtimis .....	49
4.2.1	Hidrodinaminiai aspektai.....	49
4.2.2	Temperatūrinis laukas.....	54
4.2.3	Šilumos atidavimo proceso intensyvumas.....	57
4.2.4	Kolektoriaus su kliūtimis efektyvumas .....	57
4.3	Standartinio ir patobulinto saulės kolektoriaus elementų palyginamoji analizė	58
	IŠVADOS .....	60
	LITERATŪROS SĄRAŠAS .....	61



## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Lietuvos energijos balansas 2015 metais [4].	15
1.2 pav. Saulės spinduliuotės pasiskirstymas Žemės atmosferoje [7, 8].	16
1.3 pav. Metinis Saulės energijos intensyvumas, kWh/m <sup>2</sup> [11].	17
1.4 pav. Saulės energijos intensyvumo priklausomybė nuo atmosferinių sąlygų ir paros laiko [5].	18
1.5 pav. Saulės energijos panaudojimo sritys [13].	19
1.6 pav. Saulės kolektorių klasifikacija.	21
1.7 pav. Fokusuojančių saulės kolektorių klasifikacija pagal konstrukciją [13, 17].	22
1.8 pav. Koncentruojantis saulės kolektorius [18].	22
1.9 pav. Vakuuminių saulės kolektorių klasifikacija pagal konstrukciją [13].	23
1.10 pav. Vakuuminių saulės kolektorių pavyzdžiai (dešinėje – tiesioginis jungimas; kairėje – sausasis jungimas) [5, 17].	24
1.11 pav. Standartinės konstrukcijos plokščiasis saulės kolektorius [19].	24
1.12 pav. Plokščiųjų saulės kolektorių klasifikacija pagal naudojimo būdą [5, 13].	25
1.13 pav. Plokščiojo saulės kolektorius konstrukcijos variantai: a – viengubo srauto kolektorius, b – dvigubo srauto kolektorius, c – viengubo srauto su recirkuliacija kolektorius. Paveikslėlyje: 1. Stiklas, 2. Izoliacijos sluoksnis, 3. Absorberio plokštelė [5, 20].	27
1.14 pav. Trombė ir Saulės sienos konstrukcija.	28
1.15 pav. „Galinio srauto“ oro kolektorius [21].	29
2.1 pav. ANSYS Fluent modeliavimo algoritmas.	38
3.1 pav. Kolektoriaus elementų principinės schemas: a – standartinis „galinio srauto“ tipo oro saulės kolektoriaus elementas; b – patobulintos konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus elementas. Paveiksle: L – kolektoriaus elemento ilgis, B – kolektoriaus elemento aukštis, H – fluideo elemento plotis, e – kliūtis aukštis, w <sub>b</sub> – kliūtis storis, l – atstumas tarp dviejų kliūčių; q – šilumos srautas.	39
3.2 pav. Saulės kolektoriaus elemento geometrinis modelis.	40
3.3 pav. Sudaryto tinklelio pavyzdys, kai tarp kliūčių yra 0,16 m atstumas.	41
4.1 pav. Greičio kontūras elemento pradžioje (greitis, m/s).	43
4.2 pav. Greičių profiliai elemento pradžioje (x=0,01 m).	44
4.3 pav. Greičių profilio pasikeitimas elemente.	45
4.4 pav. Fluideo temperatūrinis kontūras elemento pradžioje.	46
4.5 pav. Fluideo temperatūrinis kontūras elemento pabaigoje.	46
4.6 pav. Absorberio sienelės temperatūros priklausomybė nuo fluideo tekėjimo greičio.	47
4.7 pav. Vidutinio Nuselto kriterijaus priklausomybė nuo masinio debito.	48

4.8 pav. Standartinės konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus efektyvumas. ....	48
4.9 pav. Greičio kontūras elemente (m/s). ....	49
4.10 pav. Greičio kontūras elemente (m/s). ....	49
4.11 pav. Greičio kontūras elemente (m/s). ....	50
4.12 pav. Greičių vektorių išsidėstymas elemente su 0,08 m atstumu tarp kliūčių (m/s). ..	50
4.13 pav. Greičių vektorių išsidėstymas elemente su 0,16 m atstumu tarp kliūčių (m/s). ..	51
4.14 pav. Greičių vektorių išsidėstymas elemente su 0,24 m atstumu tarp kliūčių (m/s). ..	51
4.15 pav. Greičių profiliai prieš pirmąją kliūtį, srauto pradinis greitis 0,8 m/s. ....	52
4.16 pav. Greičių profiliai tarp pirmos ir antros kliūties. ....	53
4.17 pav. Greičių profilio priklausomybė nuo srauto masinio debito elemento pradžioje (x=0,12 m). ....	53
4.18 pav. Greičių profilio priklausomybė nuo srauto masinio debito, elemento pradžioje (x=0,2 m). ....	54
4.19 pav. Temperatūros kontūras kolektoriaus elemente su kliūtimis (atstumas tarp kliūčių 0,08 m). ....	55
4.20 pav. Temperatūros kontūras (atstumas tarp kliūčių 0,24 m). ....	55
4.21 pav. Absorberio ir kliūčių temperatūros kitimas kolektoriaus elemento ilgyje (fluido greitis 0,8 m/s). ....	56
4.22 pav. Vidutinio Nuselto priklausomybė nuo masinio debito. ....	57
4.23 pav. Kolektorių su kliūtimis efektyvumas. ....	57
4.24 pav. Vidutinės Nuselto reikšmės priklausomybė nuo fluido masinio debito. ....	58
4.25 pav. Kolektorių efektyvumas. ....	59

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

0.1 lentelė. Bendra galutinė AEI suvartojimo dalis, lyginant su bendru galutiniu suvartojimu 2010–2015 metais [2, 3, 4]. ....	12
1.1 lentelė. AEI panaudojimo būdai. ....	14
1.2 lentelė. Lietuvos regionų perspektyvumas pagal Saulės energijos išteklius [7, 9, 11]. ..	18
1.3 lentelė. Saulės kolektorių tipų pagrindinių parametrų reikšmės [4]. ....	21
1.4 lentelė. Kolektorių klasifikacija pagal šilumos perdavimo terpę [10]. ....	26
1.5 lentelė. Skirtingų tipų oro kolektorių sistemų palyginimas pagal paskirtį [20]. ....	27
3.1 lentelė. Duomenų tikslumo priklausomybė nuo tinklelio skaičiaus. ....	41
3.2 lentelė. Pagrindiniai skaičiavimo parametrai. ....	43
4.1 lentelė. Fluido greičio priklausomybė nuo srauto masinio debito. ....	45
4.2 lentelė. Vidutinės fluido ir absorberio temperatūros. ....	47
4.3 lentelė. Fluido temperatūros ....	56

## SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

AEI	-	Atsinaujinantieji energijos ištekliai
ES (EU)	European Union	Europos Sąjunga
FE (PV)	Photovoltaic element	Fotoelektros elementas
CFD	Computational fluid dynamics	Skaičiuojamoji fluidų dinamika

## IVADAS

Energija naudojama visoje pasaulio infrastruktūroje: nuo ūkio iki paslaugų sektorių. Norint užtikrinti šių sektorių funkcionavimą reikalingas pakankamas energijos išteklių kiekis. Dėl didėjančios energijos poreikio sunaudojama vis daugiau tradicinių išteklių. Senkantys jų resursai gali nebeužtikrinti ateities kartoms reikalingo energijos poreikio bei aplinkosauginių reikalavimų. Energijos gamyba naudojant tradicinius šaltinius pasižymi tuo, kad šaltiniai ir jų junginiai virsta šiltnamio dujomis be to per energijos gamybos procesą į aplinką patenka daug įvairių teršalų. Akivaizdu, kad jų naudojimas kelia klimato kaitos grėsmės lygį, aplinkos taršą, energijos tiekimo saugumo problemas. Dėl šių priežasčių vis labiau skatinamas atsinaujinančiųjų energijos šaltinių (AEI) vartojimas. AEI šaltinių panaudojimas taip pat aktualus ir šalims neturinčios tradicinių energijos šaltinių ir priklausančioms nuo jų importavimo [1,2].

Atsinaujinančios energijos išteklių gali padėti išspręsti klimato kaitos ir ateities energijos poreikio problemas bei padėti šalims plėtoti energetinę nepriklausomybę. Paskaičiuota, kad per 50 metų tradicinių išteklių bendrosios sąnaudos padidėjo 6 kartus, todėl buvo pradėta matyti, kad energijos išteklių drastiškai sumažėja. Pasaulio valstybės bendrai nusprendė, kad tradicinius energijos šaltinius bei energetikos technologijas reikia keisti į AEI. Lietuvos Respublika 2009 m. balandžio 23 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva pasižadėjo, kaip Europos Sąjungos narė padidinti privalomuosius bendruosius nacionalinius planinius rodiklius AEI. Šis rodiklis iki 2020 metų bendrame energijos suvartojimo balanse turi siekti ne mažiau kaip 23 procentus. Remiantis Lietuvos statistikos departamento paskelbtais duomenimis, Lietuva užsibrėžtą tikslą pasiekė 2014 m. AEI dalis bendrame šalies energijos balanse viršijo penktadalį ir sudarė 23,66 proc. (padidėjo 0,91 proc. lyginant su 2013 m.) [1,2,3].

0.1 lentelė. Bendra galutinė AEI suvartojimo dalis, lyginant su bendru galutiniu suvartojimu 2010–2015 metais [2, 3, 4].

	2010 metais	2011 metais	2012 metais	2013 metais	2014 metais	2015 metais
Bendra galutinio AEI suvartojimo dalis, lyginant su bendru galutiniu energijos suvartojimu (proc.)	19,8	20,2	21,7	23,0	23,6	25,8

Atsinaujinantieji energijos šaltiniai – gamtos išteklių, kurių atsiradimą ir atsinaujinimą sąlygoja gamtoje vykstantys procesai: Saulės šviesa, vėjas, biomasė, geoterminė, vandens judėjimo, jūros bangų bei potvynių ir atoslūgių energija. Saulė yra vienas svarbiausių AEI šaltinių, nes ji yra beveik visų kitų AEI energijos šaltinių (išskyrus geoterminę) pradinis šaltinis. Šios rūšies energija yra gausi, neišsenkanti ir neteršianti aplinkos. Saulės šiluminė energija turi didžiausią potencialą už bet kurią kitą atsinaujinančios energijos rūšį (440000 TWh). Jei žmonija sugebėtų panaudoti bent du procentus tos energijos, kurią Žemei siunčia Saulė, tai tos energijos užtektų patenkinti visiems

žmonių poreikiams. Egzistuoja tik viena problema – kaip ją paimti ir panaudoti. Ilgai tiesioginis efektyvus Saulės energijos panaudojimas nebuvo galimas dėl techninių ir ekonominių priežasčių. Visgi, natūralios šviesos arba Saulės energija gali būti naudojama tiesiogiai namų ir kitų pastatų šildymui bei apšvietimui, elektros energijos ir vandens šildymo, aušinimo, ir įvairių komercinių bei pramonės reikmių tenkinimui [4, 5, 6].

Viena iš galimų alternatyvų Saulės energijai panaudoti – saulės kolektoriai. Saulės kolektorių naudojimas yra vienas iš ekologiškiausių atsinaujinančios energijos naudojimo būdų. 2015 metais saulės kolektorių generuota šiluminė energija sudarė daugiau kaip 22 % visos pasaulyje panaudotos atsinaujinančios energijos. Lietuvoje iki 2015 m. įrengta 7 MW instaliuotos galios saulės kolektorių (saulės elektrinių instaliuotoji 79,09 MW galia). Lietuvoje saulės energetikos potencialas yra beveik nenaudojamas, nes vyrauja nuomonė, kad saulės technologijos yra brangios ir Lietuvos klimatas netinkamas šiai AEI sričiai plėtoti. Ši nuomonė nėra pagrįsta, nes Lietuvoje metinis Saulės energijos kiekis, krentantis į horizontalų paviršių yra panašus kaip kaimyninėse šalyse ir kai kuriose ES šalyse, pavyzdžiui, Vokietijos pietinėje dalyje metinė Saulės energija yra tik 20 proc. didesnė nei Lietuvos, o lyginant su šiaurės Vokietija Lietuvos metinė Saulės energija yra 5 proc. didesnė. Šie duomenys parodo, kad klimatinės sąlygos saulės energetikos plėtojimui Lietuvoje yra panašios į Vokietijos [2, 5, 8].

Taigi, metinė Saulės spinduliuotė pasiskirsto skirtingai klimato juostose ir yra kintanti visus metus. Ir gaunamas antrinės energijos kiekis saulės kolektoriuose yra nepastovus, todėl norint optimaliai išnaudoti Saulės energiją reikia užtikrinti Saulės energijos konversijos įrenginių (kolektorių, fotoelementų) kuo didesnę efektyvumą. Vienas iš būdų efektyvumui tobulinti yra pagerinti saulės kolektoriuose vykstančius šilumos mainus.

Šio **projekto tikslas** – sudaryti šilumos atidavimo skaitinį modelį pasirinktame saulės kolektoriaus elemente. Norint pasiekti šį tikslą suformuluojami tokie uždaviniai:

1. įvertinti Saulės energijos potencialą Lietuvoje;
2. išanalizuoti saulės kolektorių rūšis ir pasirinkti kolektoriaus tipą modeliavimui;
3. parengti tyrimo metodologiją saulės kolektoriaus šilumos atidavimo veiksmui nustatyti;
4. sukurti skaitinį pasirinkto saulės kolektoriaus elemento (elementas – kolektoriaus dalis, kuria teka šilumnešis) modelį;
5. pasirinktus vieną iš šilumos atidavimo proceso intensyvavimo būdų, pritaikyti jį sudarytam kolektoriaus elemento modeliui;
6. išanalizuoti gautus skaitinius rezultatus.

# 1 LITERATŪROS ANALIZĖ

## 1.1 Atsinaujinantys energijos ištekliai

Energijos ištekliai – tai pirminės ar antrinės energijos dalis, kuri gali būti panaudota kaip naudinga energija tiesiogiai arba ją konvertuojant į kitas energijos rūšis. Energijos šaltiniai yra skirstomi į tradicinius (baigtinius) ir atsinaujinančius. Tradiciniams energijos išteklams priskiriami ištekliai, kurie yra iškasami ar kitaip išgaunami iš žemės gelmių: akmens anglis, nafta, gamtinės dujos, skalūnai, urano rūda ir durpės. Tradiciniai ištekliai dar vadinami iškastiniu kuru. Jų vartojimas lemia globalinio atšilimo proceso susidarymą, padidėjusią aplinkos (oro) taršą bei šalių, neturinčių tradicinių energijos išteklių, energetinę priklausomybę nuo jų importavimo [1, 5].

Atsinaujinantieji energijos ištekliai – ištekliai, kurie atsinaujina nuolatos ar per trumpą laiką ir gali būti naudojami neribotai ilgai (Saulė, vėjas, vanduo, biomasė, geoterminė, jūros bangos bei potvyniai). Jų svarba energetikoje ypač išryškėjo senkant tradiciniams energijos šaltiniams, didėjant energijos suvartojimui, atsiradus tikslui sustabdyti klimato kaitos procesą bei atsisakant branduolinės energetikos plėtros taip pat sprendžiant šalių energetinės nepriklausomybės problemas [1, 2, 5].

Išskiriami trys energijos panaudojimo būdai: elektros gamyba, šildymas/aušinimas bei energijos panaudojimas kaip transporto priemonių kuras. Tiesa, ne visi energijos ištekliai gali būti vartojami visais trimis būdais (1.1 lentelė). Pavyzdžiui, bioenergija ir saulės energija yra vienintelės iš atsinaujinančių energijos rūšių, kurias galima panaudoti visais trimis būdais. Visas egzistuojančias AEI energijos rūšis galima konvertuoti į elektros energiją, o šiluminės energijos tiekimui tinkama bioenergija, saulės ir geoterminė energijos. Akivaizdu, kad Saulės energiją galima panaudoti įvairiais būdais, konvertuojant ją į pasirinktą energijos formą.

1.1 lentelė. AEI panaudojimo būdai.

Energijos rūšys	Transporto kuras	Šiluma	Elektra
Bioenergija	+	+	+
Saulės	+	+	+
Geoterminė		+	+
Vėjo		+	+
Vandenynų bangų			+
Hidroenergija			+

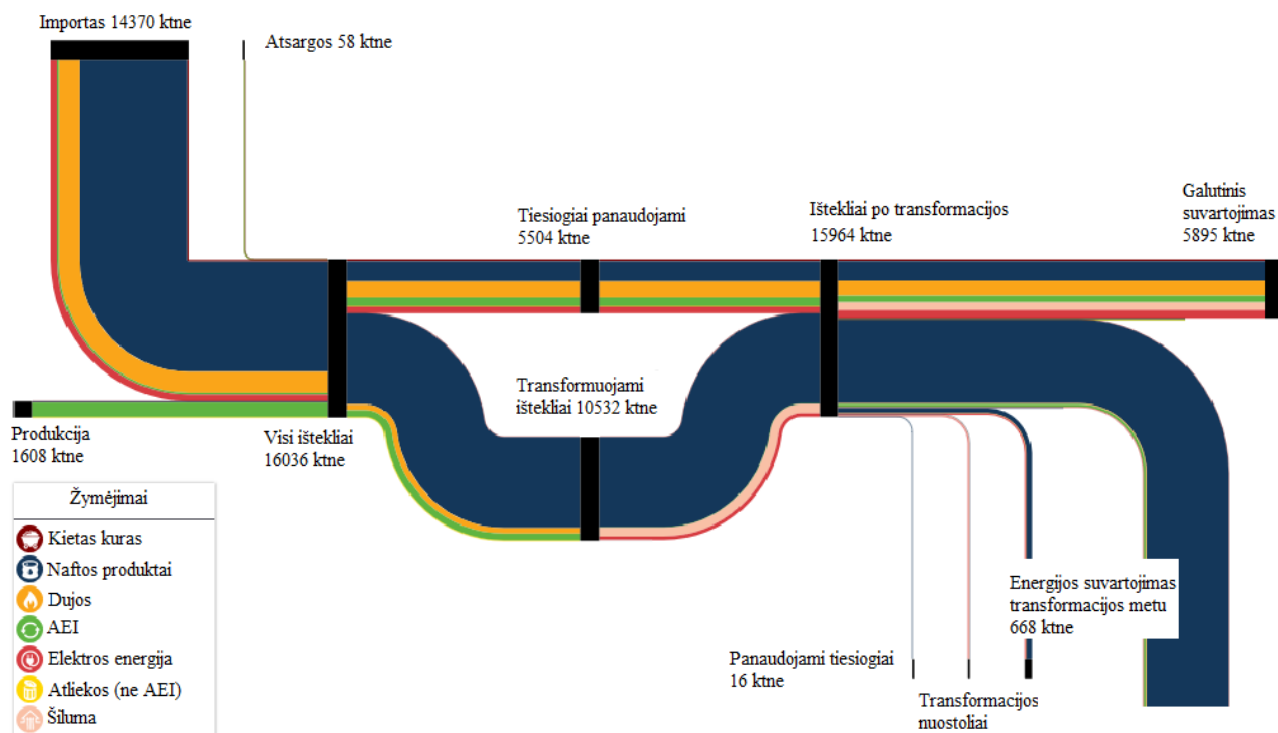
### 1.1.1 AEI naudojimo poreikis

Didžioji dalis Europos sąjungos narių yra priklausomos nuo tradicinių išteklių importo. 2015 metais ES narės (tarp jų ir Lietuva) importavo daugiau nei 50 procentų energijos gamybai reikalingų

energijos išteklių (1.1 pav.). Daugiau nei 70 procentų visos ES suvartojamos energijos pagaminama iš iškastinio kuro. Atsižvelgus į šiuos duomenis, galima daryti išvadą, kad ES yra energetiškai priklausoma nuo tradicinių išteklių bei jų importavimo iš kitų šalių. Importuojant išteklius galimi tiekimo sutrikimai dėl kainų svyravimų ar politinių priežasčių, todėl būtina turėti energijos atsargų padengti energijos poreikį sutrikus išteklių importui [3, 4].

Žinoma, kad deginant iškastinį kurą į aplinką išsiskiria teršalai (CO<sub>2</sub> ir kita), kurie skatina klimato kaitos procesą. Naudojant AEI išsiskiria labai nedidelis teršalų kiekis arba neišsiskiria visai, todėl didinant AEI naudojamą bus galima stabilizuoti klimato kaitos procesą dėl sumažėjusių šiltnamio dujų kiekio bei oro taršos [4].

Šios priežastys lėmė AEI plėtrą, siekiant pakeisti tradicinius išteklius atsinaujinančiais. ES narės taps mažiau priklausomos nuo išteklių importo ir galės padengti reikiamą energijos poreikį, pasigaminant jį iš nuosavų gamtinių išteklių.

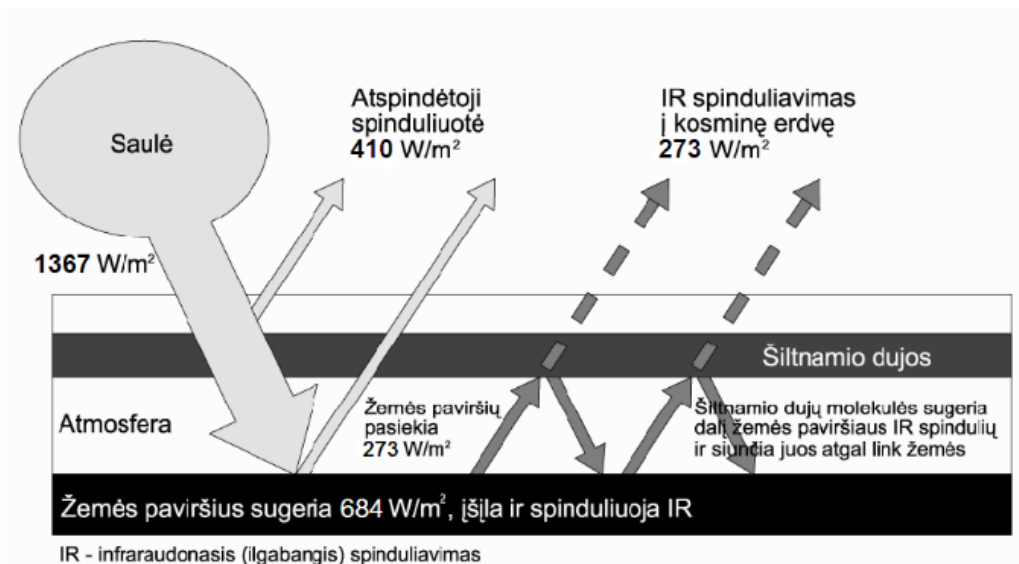


1.1 pav. Lietuvos energijos balansas 2015 metais [4].

## 1.2 Saulės energija

Saulė – pagrindinis ir pats galingiausias atsinaujinantysis energijos išteklius. Nors Saulė yra 1,5 mlrd. km. nuo Žemės, jos energija pasiekia Žemę per 8 minutes. Per metus viršutinę Žemės atmosferos ribą pasiekia  $5,6 \cdot 10^{24}$  J Saulės energijos srautas. Tai yra tik 0,027 % Saulės spindulinės energijos, tačiau jos užtektų patenkinti mūsų planetos poreikiams [5, 8].

Saulės energijos radiacijos tankis, pasiekiantis Žemės atmosferos paviršių vadinamas Saulės konstanta ( $1367 \text{ W/m}^2$ ). Dalis šio tankio yra atspindimas ir absorbuojamas atmosferos oro ir debesų. Dar dalį atspindi Žemės paviršius ir tik likusi 49-51 % ( $684 \text{ W/m}^2$ ) dalis yra sugerama Žemės paviršiaus (1.2 pav.). Ši energijos dalis lemia visus klimatinius procesus: vandens judėjimą, fotosintezės procesą, sausumos ir vandenynų paviršiaus šildymą ir vėjų bei vandenynų srovių susidarymą [1, 5, 8].



1.2 pav. Saulės spinduliuotės pasiskirstymas Žemės atmosferoje [7, 8].

Maksimali Saulės radiacija (intensyvumas) tenka tik tai Žemės paviršiaus daliai, kuri tuo momentu būna statmenoje į spindulius plokštumoje. Tačiau dėl Žemės rutulio formos į likusį jos paviršių spinduliavimo intensyvumas mažėja proporcingai paviršiaus plokštumos ir spindulių kritimo kampui. Kitaip tariant, jis priklauso nuo paros laiko ir metų laiko. Taip pat saulės spindėjimo intensyvumas priklauso ir nuo meteorologinių sąlygų. Didžiausias Saulės intensyvumas pasiekiamas, kai Saulė atsiduria aukščiausiam dangaus skliauto taške ir kai spinduliavimui netrukdo atmosferos užterštumas ar debesuotumas. Taip yra todėl, kad Saulės spinduliai nebūna išsklaidyti ir didesnis jų kiekis pasiekia Žemės paviršių. Apytiksliai apskaičiuota, kad esant debesuotam orui beveik visas Saulės radiacinis tankis gali būti absorbuotas net nepasiekęs Žemės paviršiaus: Žemės paviršiuje – 10–50 % (atsispindėtas debesyse – 30–60 %), debesyse – 10–20 % [4, 8].

Kiekviename Žemės rutulio taške Saulės energijos kiekiai skiriasi ne tik maksimaliomis ar vidutinėmis vertėmis, bet ir tų reikšmių kitimui per metus. Kuo arčiau Žemės ekvatoriaus, tuo didesnis Saulės spinduliavimo intensyvumas ir tuo mažesnis jo kitimo diapazonas. Vidutinis metinis Saulės intensyvumas ant Žemės paviršiaus kinta nuo  $400 \text{ kWh/m}^2$  iki  $2200 \text{ kWh/m}^2$  per metus [8].

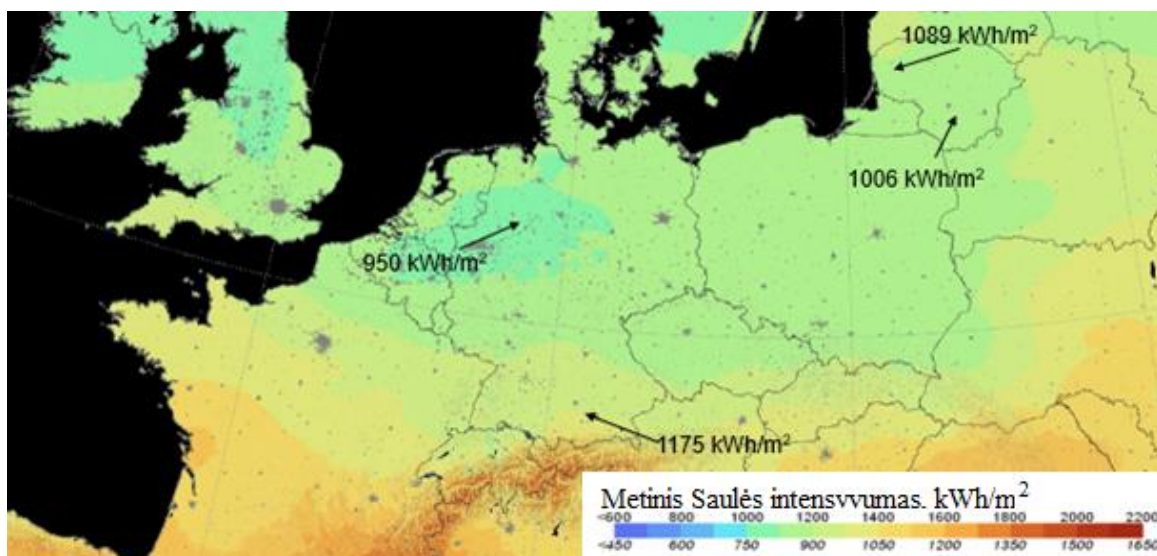


### 1.2.1 Saulės energijos potencialas Lietuvoje

Lietuvos geografinėje platumoje vienam kvadratiniam metrui tenka apie 3,62 GJ Saulės energijos per metus (1006,4 kWh/m<sup>2</sup>). Palyginus su šalimis, esančiomis arčiau ekvatoriaus, pavyzdžiui, Graikijoje 5,4 GJ, tai nėra didelis kiekis. Taip yra todėl, kad Lietuvoje Saulės energija yra išsklaidyta didesniame paviršiaus plote negu tose geografinėse platumuose, kuriose Saulė vidurdienį pasiekia zenitą. Lietuvoje Saulės spinduliai turi nukeliauti didesnę kelią kol pasiekia Žemės paviršių, todėl patiria didesnius energijos nuostolius absorbcijos bei difuzijos būdais [6,8].

Saulės energijos srautas, pasiekiantis Žemės paviršių Lietuvos teritorijoje, matuojamas Kauno ir Šilutės meteorologinėse stotyse. Pagal pateikiamus duomenis skirtinguose šaltiniuose Lietuvoje vidutinis metinis suminės Saulės energijos kiekis, krintantis į horizontalų paviršių, kinta nuo 970 kWh/m<sup>2</sup> (Šilutėje) iki 1042 kWh/m<sup>2</sup> (Nidoje). Lietuvos miestų Saulės vidutinė metinė spinduliuotės ekspozicija nurodyta 1.2 lentelėje.

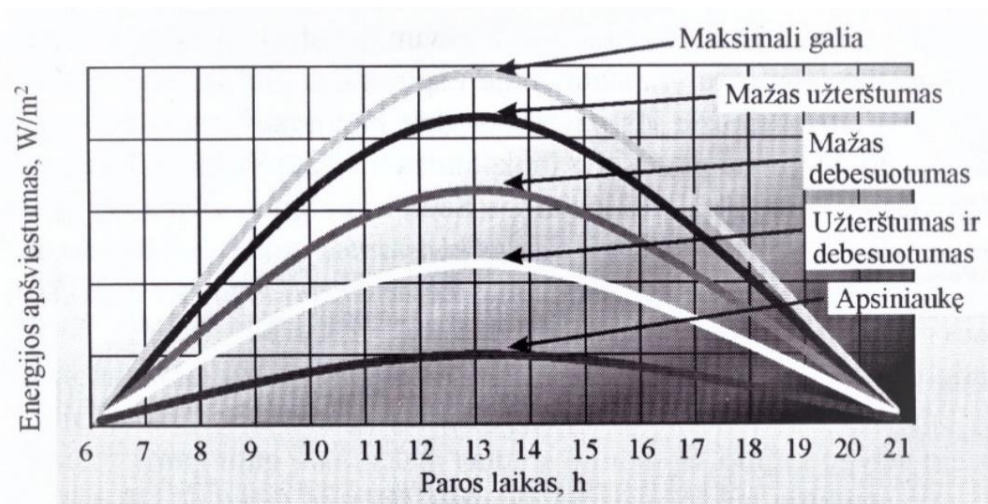
Metinis Lietuvos Saulės energijos potencialas yra 1000 kWh/m<sup>2</sup>, todėl Lietuva patenka į ES Saulės intensyvumo vidurkį. Europoje jis siekia 830–1100 kWh/m<sup>2</sup>. Vasarą Lietuvoje vidutinis spinduliuotės intensyvumas esant giedram orui – 810 iki 850 W/m<sup>2</sup>. Saulės energijos potencialo pasiskirstymas Europoje pavaizduotas 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Metinis Saulės energijos intensyvumas, kWh/m<sup>2</sup> [11].

Saulės energijos panaudojimą sunkina tiek paros, tiek ir metų Saulės energijos intensyvumo netolygus pasiskirstymas. Didžiausias intensyvumas pastebimas gegužės, birželio, liepos mėnesiais, o mažiausias – gruodžio, lapkričio, sausio mėnesiais. Taip pat didelę įtaką turi ir meteorologinės sąlygos (1.4 pav.). Esant dideliam oro ar debesuotumui Saulės energijos intensyvumas mažėja, didėjant šiems meteorologiniams rodikliams.

Meteorologiniai stebėjimai rodo, kad saulėtų dienų skaičius Lietuvoje pasiskirstęs nevienodai. Saulėtų dienų skaičius per metus Lietuvoje kinta nuo 1400-1900 valandų. Šalies rytiniame pakraštyje jis neviršija 1650 val. per metus. Lyginant saulėtų valandų skaičių Vilniuje (1690 val. per metus) su Europos miestų duomenimis (Mančesteryje, Didžiojoje Britanijoje, saulėtų valandų per metus yra 1360, Hamburge, Vokietijoje – 1570, Ženevoje, Šveicarijoje – 1500, Karūnoje, Švedijoje – 1470) matyti, kad Saulės išteklių Lietuvoje kiekis yra panašus [6, 8, 9, 10, 11].



1.4 pav. Saulės energijos intensyvumo priklausomybė nuo atmosferinių sąlygų ir paros laiko [5].

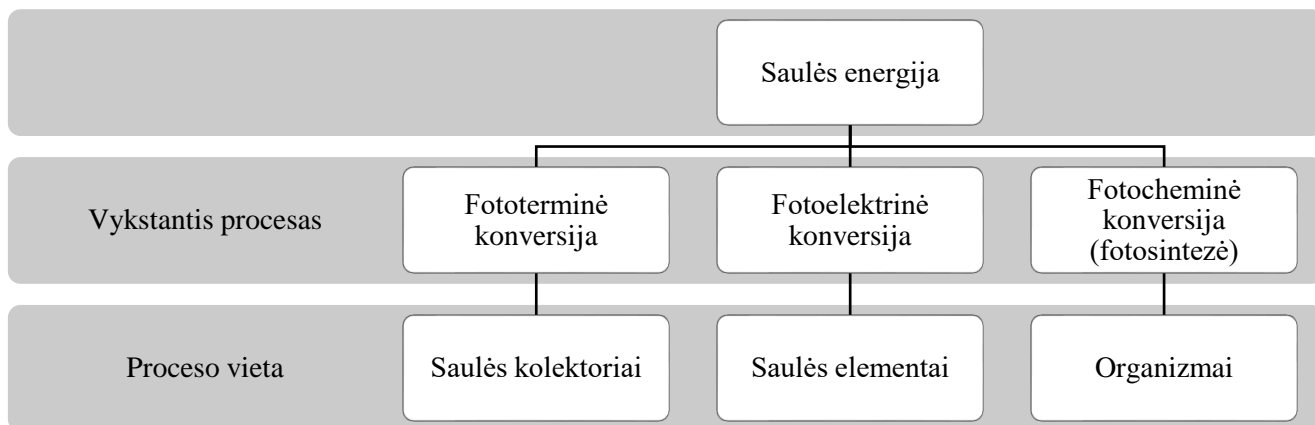
1.2 lentelė. Lietuvos regionų perspektyvumas pagal Saulės energijos išteklius [7, 9, 11].

Lietuvos miestai	Pilnutinė spindulinė energija per metus, kWh/m <sup>2</sup>	Perspektyva
Klaipėda, Kybartai, Telšiai, Lazdijai, Šilutė, Nida	1015–1042	Didžiausia
Utena, Kaunas, Vėsausiai, Dotnuva, Šiauliai	946–1042	Vidutinė
Biržai, Varėna, Dūkštas, Vilnius	926–939	Mažiausia

Įvertinus saulėtų dienų, Saulės intensyvumo pasiskirstymo statistikos duomenis, pateiktus VŠĮ Perspektyvinių technologinių taikomojo tyrimo instituto, galima pastebėti, kad Saulės energetika gali būti sėkmingai plėtojama ir Lietuvoje, nes čia pagrindiniai Saulės energijos parametrai per metus būna panašūs ar net geresni, negu kai kuriose ES šalyse, kurios sparčiai ir sėkmingai plėtoja šią energetiką [2, 4,12].

## 1.2.2 Saulės energijos panaudojimo būdai

Saulės energijos konversija gali vykti trimis skirtingais būdais: chemine, elektrine bei termine (1.5 pav.). Fotocheminė konversija vyksta organizmuose, kuriuose vykstant fotosintezės procesui iš sugertos Saulės energijos yra absorbuojamos reikalingos medžiagos, kurios reikalingos palaikyti organizmo gyvybę (medžių lapai). Kitų dviejų tipų konversijos vykdomos mechaniniuose įrenginiuose, kurie skirstomi pagal panaudojimo būdus į dvi rūšis [12, 13].



1.5 pav. Saulės energijos panaudojimo sritys [13].

Saulės energija panaudojama trimis būdais: aktyviai, pasyviai ir kombinuotai. Pasyvus Saulės energijos naudojimo būdas, kai ši energija yra naudojama tiesiogiai dėl vykstančių fizikinių procesų, pavyzdžiui, pastatas, kurio viduje sugeriami ir sulaikomi Saulės spinduliai. Aktyvus būdas – Saulės energija naudojama pasitelkiant specialią įrangą šilumos/vėsos ar elektros energijos gamybai. Aktyvių sistemų pavyzdžiai: saulės kolektoriai, saulės fotoelementai ir kita.

Kiekviena Saulės sistema turi vykdyti pagrindines funkcijas: sugebėti sugerti Saulės spinduliuotę ir ją paversti kito tipo energija; akumuliuoti šią energiją, kai spinduliuotė yra nepastovi; tiekti terminę ar elektrinę energiją vartotojams norimu kiekiu [13].

Pagrindiniai Saulės energijos panaudojimo būdai yra jos konvertavimas į elektrinę ar terminę energiją. Saulės energija konvertuojama į elektros energiją panaudojant fotoelementus. Saulės elementas arba fotoelektros elementas FE (*angl. solar cell, PV cell*) – tai mažos galios elementarus keitiklis, tiesiogiai keičiantis šviesos energiją į nuolatinės srovės elektros energiją. Iš pradžių saulės elementai buvo naudojami mažos galios laikrodžiams, kalkuliatoriams ir kitai elektroninei aparatūrai maitinti, vėliau didesnės galios – kosminiuose laivuose, o dar vėliau ir energetikoje – saulės spindulinę energiją tiesiogiai konvertuoti į elektros energiją. Vienas iš minusų tokios elektros energijos, tai kad ją reikia akumuliuoti. Iki 2016 metų Lietuvoje įrengtos 2291 saulės elektrinės, kurių instaliuota galia siekia 73,09 MW, tačiau jose pagaminamas elektros energijos kiekis sudarė tik 4,3 % procentus visos 2015 metais pagamintos elektros energijos kiekio [3, 13, 14].

Terminė energija gaunama konvertuojant Saulės energiją saulės kolektoriuose. Saulės kolektorius – žinomiausias įrenginys, naudojantis tiesioginę Saulės energiją, sugalvotas maždaug prieš 200 metų. Saulės spindulių energija kolektoriuose transformuojama į šilumą, kurią į šildymo sistemą tiekia šilumnešis (tai gali būti oras, vanduo ar kitas skystis).

Lietuvoje Saulės energija naudojama pastatams ir vandeniui šildyti, aušinti, elektrai gaminti ir kitos reikmės patenkinti. Lietuvoje daugiau naudojami PV modeliai nei saulės kolektoriai, tačiau vykdant namų renovacijos procesą vis daugiau daugiabučių įsirengia saulės kolektorines sistemas buitinio vandeniui šildymui arba hibridines sistemas, jungiančias ne tik vandens šildymo, bet ir elektros gamybos funkcijas [13, 15].

### 1.2.2.1 Saulės kolektoriai

Saulės kolektoriai skirstomi į tris pagrindines rūšis (1.6 pav.). Kai kuriose šalyse saulės kolektoriams priskiriami ir saulės elementai, nors jų veikimo principas yra visiškai kitoks. Lietuvoje PV elementai laikoma atskira Saulės energijos transformavimo grupe, todėl šiame darbe jie nėra nagrinėjami.

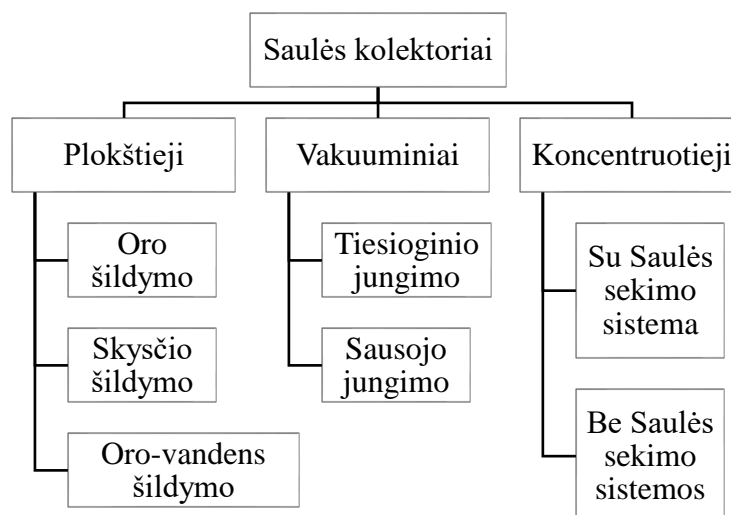
Saulės kolektorių darbo kokybė apibūdinama šiais pagrindiniais parametrais: efektyvumu, konversijos koeficientu, šilumos nuostolių koeficientu. Skirtingų kolektorių pagrindiniai parametrai nurodyti 1.3 lentelėje [5,16].

Saulės kolektoriaus efektyvumas nusakomas, kaip kolektoriaus pagamintos energijos kiekio ir Saulės spinduliuotės krentančios į kolektoriaus paviršių santykis. Kolektoriaus efektyvumas riboja Saulės spinduliuotės ir šilumos nuostoliai kolektoriuje. Jis apskaičiuojamas formule:

$$\eta = \frac{mc_p(T_f - T_a)}{IA_c} \quad (1.1)$$

čia:  $\eta$  – efektyvumo koeficientas;  $m$  – masinis srauto debitas, kg/s;  $T_f$  – kolektoriaus šilumnešio galinė temperatūra, K;  $T_a$  – pradinė šilumnešio temperatūra, K;  $I$  – saulės spinduliuotės intensyvumas, W/m<sup>2</sup>;  $A_c$  – kolektoriaus plotas, m<sup>2</sup>.

Kolektoriaus šilumos nuostolių koeficientas  $b$  yra išreiškiamas kaip kolektoriaus efektyvaus ploto vidutinių nuostolių ir temperatūrų skirtumo tarp kolektoriaus ir aplinkos santykis. Šilumos nuostoliai atsiranda kolektoriaus absorberijoje dėl spinduliuotės dalinio praradimo per kolektoriaus stiklo dangą ir izoliacijos sluoksnį trimis keliais: dėl išspinduliavimo į aplinką infraraudonųjų bangų diapazonu; dėl perdavimo į aplinką kontaktinio laidumo keliu; dėl perdavimo į aplinką konvekcijos keliu. Šviesos nuostoliai gali siekti 20 % viso į kolektorių patenkančio šviesos srauto dydžio. Šis dydis nepriklauso nei nuo aplinkos ar kolektoriaus temperatūrų, o priklauso nuo kolektoriaus konstrukcijos, jo pagaminimo kokybės ir gamybai panaudotų medžiagų savybių [10, 12].



1.6 pav. Saulės kolektorių klasifikacija.

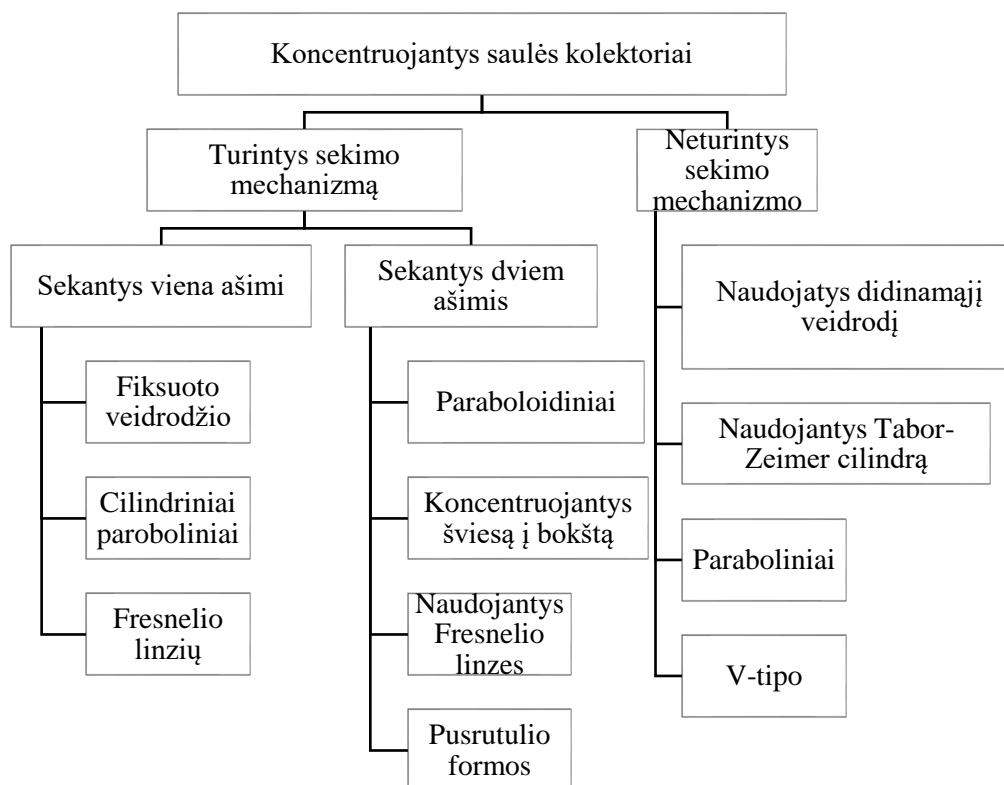
Kolektoriaus konversijos koeficientas  $\eta_{max}$  – dydis, nurodantis maksimalų kolektoriaus efektyvumą, kai šilumnešio vidutinė temperatūra lygi aplinkos temperatūrai, o Saulės intensyvumas siekia  $1000 \text{ W/m}^2$ . Efektyvumas ir konversijos koeficientas yra skirtingas kiekvienam pagamintam saulės kolektoriui dėl skirtingų eksploatacinių parametų ir sąlygų [5, 13, 17].

1.3 lentelė. Saulės kolektorių tipų pagrindinių parametų reikšmės [4].

Kolektoriaus tipas	Konversijos koeficientas, $\eta_{max}$	Šilumos nuostolių koeficientas $b$ , $\text{W/m}^2\text{K}$	Vartotojui tiekiamų fluidų temperatūrų diapazonas, $^{\circ}\text{C}$
Plokščiasis skysčio	0,66–0,80	2,9–5,3	20–80
Vakuuminis	0,62–0,84	0,7–2,0	50–120
Koncentruotas	0,56	2,4	20–70
Plokščiasis oro	0,55–0,65	8,0–30,0	20– 50

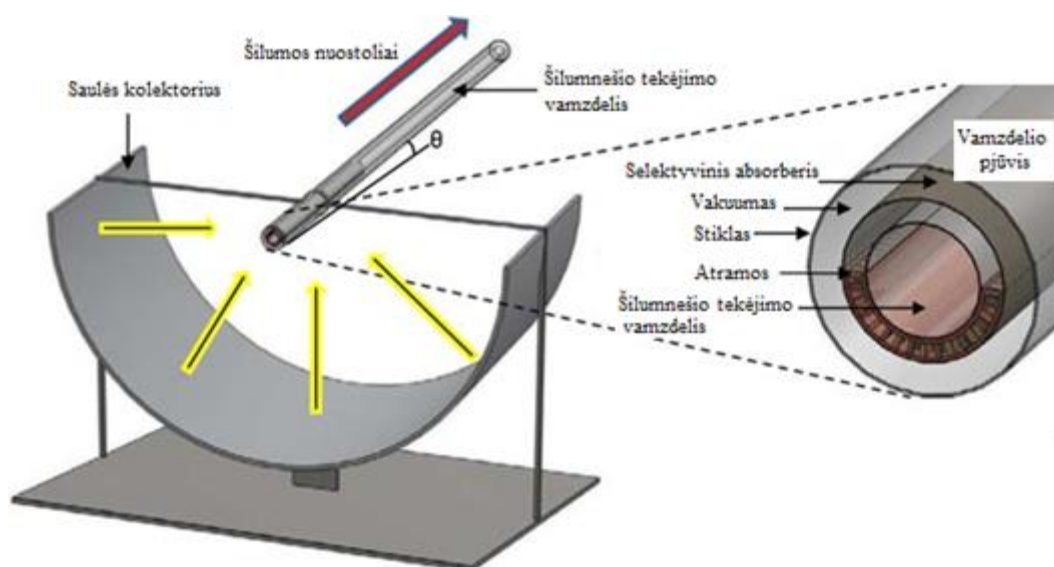
Visus saulės kolektorius sudaro pagrindinės dalys: absorberis, kuris sugeria spinduliuotės energiją ir perduoda ją judančiam šilumos nešėjui; skaidri dangą, laidį Saulės spinduliams ir jos paskirtis yra sumažinti (vėjo) konvekcinius bei šiluminius nuostolius; korpusas, skirtas pritvirtinti absorberį ir skaidrią dangą prie konstrukcijos.

**Koncentruojantys saulės kolektoriai.** Koncentruojantys (fokusuojantys) saulės kolektoriai (1.8 pav.) naudoja parabolinius veidrodžius, kurių dėka atspindėję Saulės spinduliai yra sukonzentruojami į vieną tašką sistemoje. Taškas dažniausiai yra vamzdelis, apdengtas selektyviu absorberiu, kuriame teka šilumnešis. Sukonzentruota Saulės energija sušildo absorberį iki vidutinės ar aukštos temperatūros ir vykstant šilumos atidavimo bei laidumo procesams nuo absorberio šiluma yra perduodama šilumnešiui [4, 10, 16, 17].



1.7 pav. Fokusuojančių saulės kolektorių klasifikacija pagal konstrukciją [13, 17].

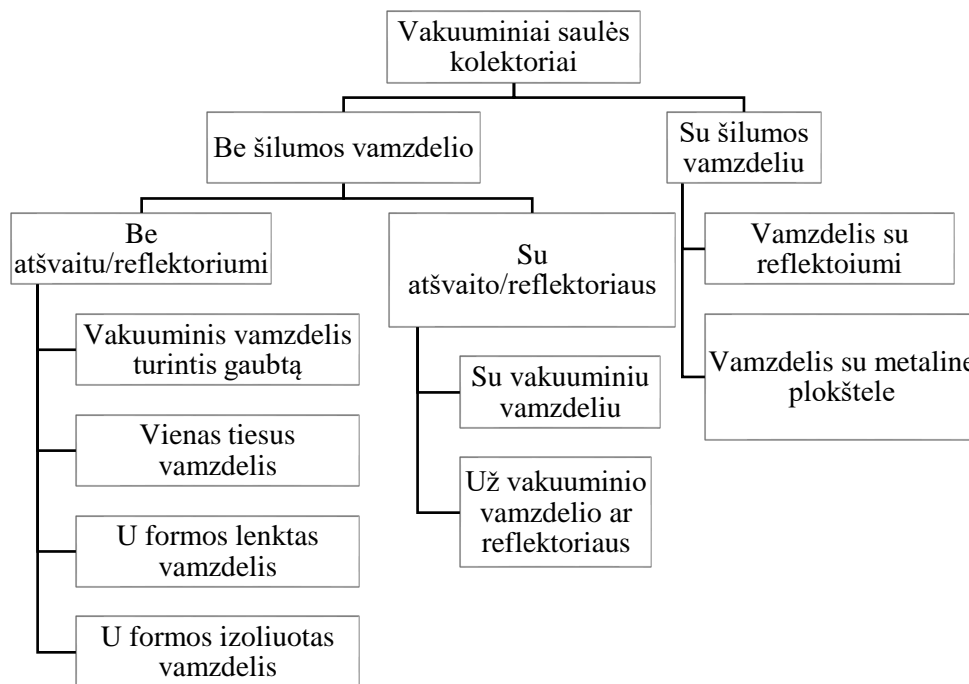
Šio tipo kolektoriams būtina, kad Saulės energiją atspindintys veidrodžiai sektų Saulę, tai yra jiems būtina papildoma sistema, kuri nuolat orientuotų juos į Saulę. Kitu atveju, šių saulės kolektorių efektyvumas sparčiai sumažėtų, nes šio tipo kolektoriai nepriima išskaidytų Saulės spindulių, o tik tiesioginius. Lietuvos geografinėje platumoje išsklaidyti Saulės spinduliai sudaro iki 40 procentų žemei tenkančios Saulės spinduliuojamos energijos, todėl norint šį kolektorių tipą pritaikyti naudojimui Lietuvoje privalomas Saulės sekimo prietaisai [13, 17].



1.8 pav. Koncentruojantis saulės kolektorius [18].

Fokusuojantys saulės kolektoriai dažniausiai naudojami Saulės šilumos elektros gamybos sistemose ir pramonėje technologiniam garui gaminti [4,13].

**Vakuuminiai saulės kolektoriai.** Alternatyva koncentruotiems saulės kolektoriams yra vakuuminiai saulės kolektoriai (1.10 pav.). Jų naudingumo koeficientas yra gali siekti 0,84, o cirkuliuojantis šilumnešis gali būti pašildomas iki 150-200 °C temperatūros [5, 13, 17].

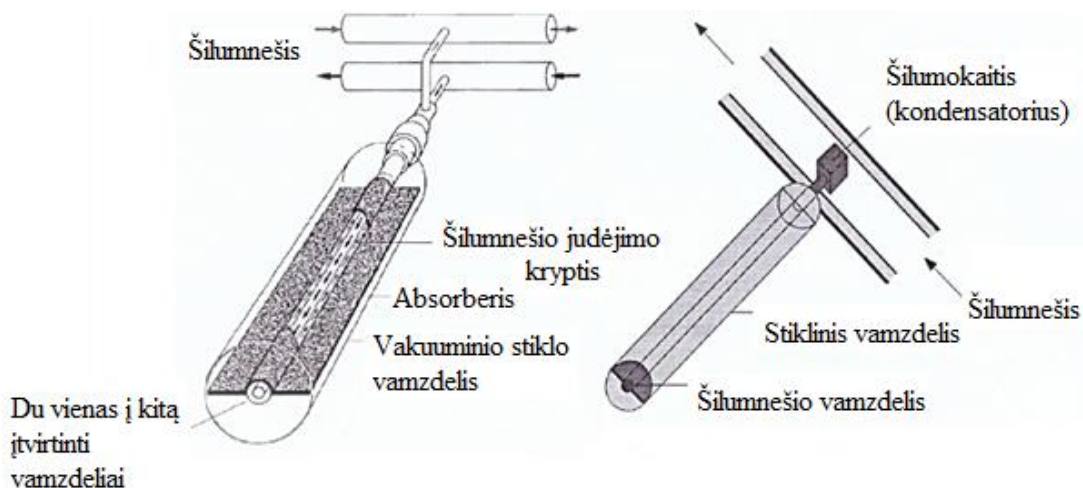


1.9 pav. Vakuuminių saulės kolektorių klasifikacija pagal konstrukciją [13].

Vakuuminiai saulės kolektoriai sudaryti iš grūdinto stiklo arba metalo vamzdelių. Kiekviename vamzdelyje yra įstatytas kitas vamzdelis su šilumą pernešančiu skysčiu bei absorberiu (helio ar titano danga). Tarp šių dviejų vamzdelių sudaromas vakuumas ( $10^{-3}$ - $10^{-2}$  Pa). Vakuumas kolektoriaus vamzdelyje naudojamas kaip šilumos izoliacinė medžiaga, kuri smarkiai sumažina šilumos nuostolius dėl laidumo ir konvekcijos. Dėl savo sudėtingos konstrukcijos šie kolektoriai yra brangūs, lyginant su kitomis kolektorių rūšimis [5, 13, 17].

Vakuuminiai vamzdeliai su šilumos nešėjo sistema gali būti jungiami dviem būdais: tiesioginiu (be šilumos vamzdelio) ir sausoju (su šilumos vamzdeliu). Tiesioginis jungimo būdo metu vakuuminis vamzdelis yra tiesiogiai sujungtas su šilumnešio magistrale ir šiluma yra tiesiogiai nuvedama nuo absorberio plokštelės į šilumnešį. Sausojo jungimo metu šilumos vamzdelis yra užpildomas garuojančio skysčio, kuris veikiamas šilumos garuoja ir pasiima vakuuminio vamzdelio bei absorberio sugertą šilumą. Susidarę skysčio garai kyla į viršų, kur kondensuojasi ir perduoda šilumą pagrindinio naudojimo kontūro šilumnešiui ar neužšalšančiam šildymo kontūro skysčiui. Kondensatas suteka žemyn ir ciklas kartojasi. Tokia vakuuminio kolektoriaus konstrukcija pasižymi nemažai pranašumų. Vienas iš jų tai, kad kolektoriui nebūtina sudėtinga apsauga nuo perkaitimo,

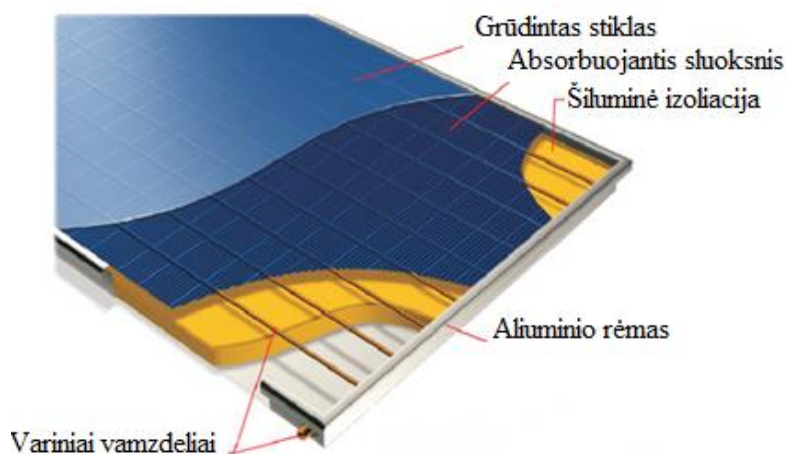
nes tokios konstrukcijos kolektoriuje šilumos perdavimas vyksta tik viena kryptimi. Kondensatoriai skysčio tekėjimo elemente sukuria papildomą turbulenciją ir pagerina šilumos perdavimą. Šis jungimo būdas yra ekonomiškėsnis nei tiesioginis, nes pažeidus vieną vakuuminį vamzdelį nereikia stabdyti viso kolektorių. Galima pažeistą kolektoriaus elementą pakeisti kolektoriui dirbant. Tačiau kolektoriai turi ir trūkumų: kolektorių pasvirimo kampas turi būti ne mažesnis kaip  $20^\circ$ , kad jis veiktų; efektyviam jų veikimui būtina didelė energetinė apšvita, nes nepasiekus tarpinio agento virimo temperatūros kolektorių paprasčiausiai neveikia [5, 13, 17].



1.10 pav. Vakuuminių saulės kolektorių pavyzdžiai (dešinėje – tiesioginis jungimas; kairėje – sausasis jungimas) [5, 17].

### 1.2.2.1.1 Plokštieji saulės kolektoriai

Plokštieji saulės kolektoriai (1.11 pav.) yra labiausiai pasaulyje paplitęs ir naudojamas kolektorių tipas. Šie kolektoriai pasižymi šiomis savybėmis: nereikalauja daug dėmesio eksploatacijos metu, sugeria išskaidytą ir tiesioginę Saulės energiją, ilgas eksploataavimo laikotarpis bei platus panaudojimo pobūdis.

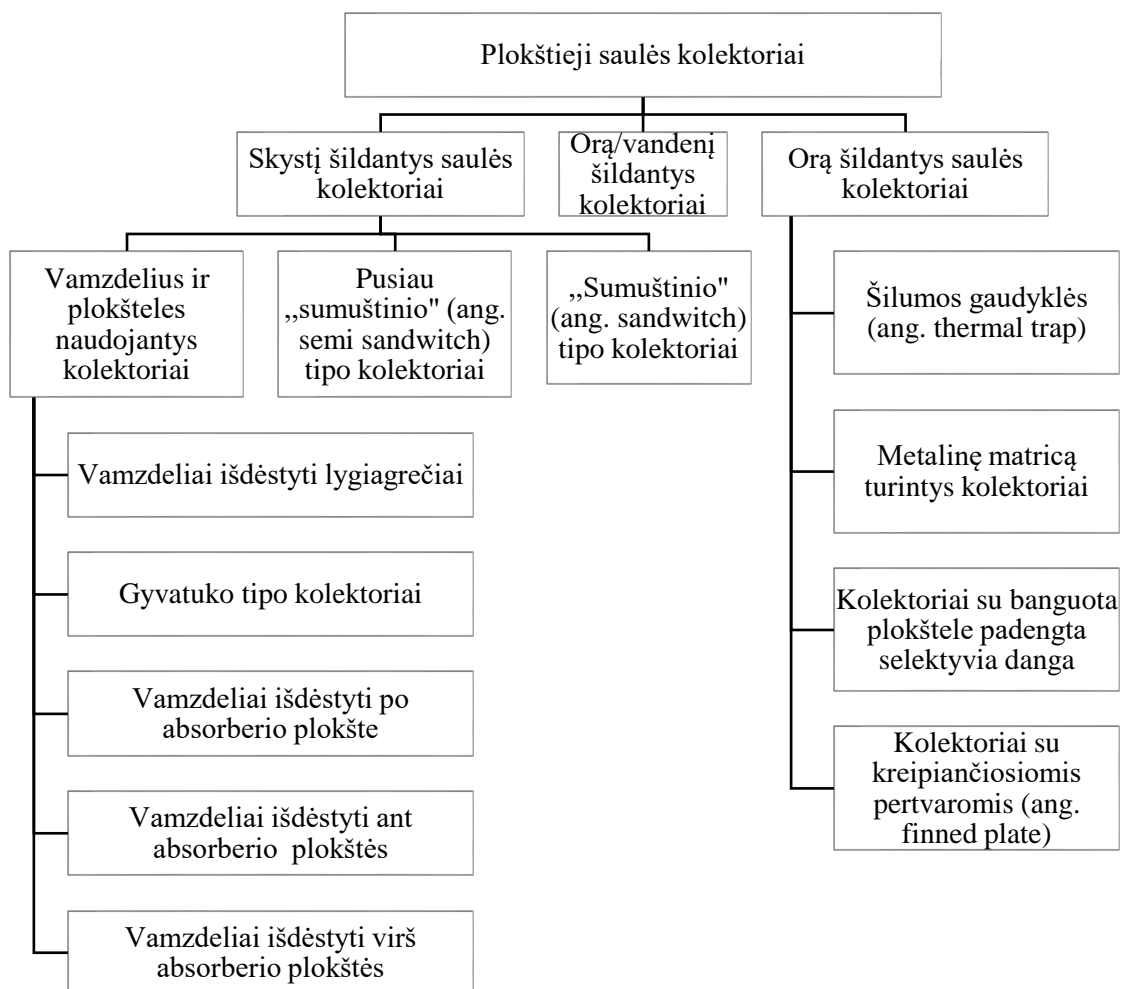


1.11 pav. Standartinės konstrukcijos plokščiasis saulės kolektorius [19].



Plokščiuosius saulės kolektorius galima skirstyti įvairiai: pagal konstrukciją (atvirieji ir įstiklinti), pagal naudojimo pobūdį ir kitus parametrus. Dažniausiai jie skirstomi pagal naudojamą šilumnešio tipą (1.12 pav.). Atsižvelgiant į fizikines šilumnešio charakteristikas kinta ir kolektoriaus efektyvumas (1.4 lentelė).

Pagrindiniai plokščiąjį kolektorių sudarantys elementai yra šie: absorberis, vamzdeliai su šilumnešiu, skaidrus dangtis, šilumos izoliacijos sluoksnis ir korpusas. Absorberio paskirtis yra sugerti saulės spinduliuotę ir šilumos pavidalu ją perduoti, absorberyje cirkuliuojančiam, šilumos nešėjui. Absorberiu naudojamoms medžiagoms (varis, aliuminis) turi būti atsparios korozijai ir gerai praleisti šilumą taip pat pasižymėti mažu emisijos laipsniu (išspinduliuotos ir sugertos energijos santykis). Siekiant sumažinti emisiją bei užtikrinti aukštą Saulės energijos konversijos į šilumą efektyvumą absorberis padengiamas selektyvia danga (juodu chromu, juodu nikeliumi). Senesnių modelių kolektoriuose absorberio plokštuma formuojama iš atskirų skardos juostų ir užpildoma oru. Naujuose modeliuose absorberio plokštuma – vientisas lakštas ir oras pakeičiamas kriptono dujomis. Taip sumažinami emisijos nuostoliai ir padidinamas kolektoriaus efektyvumas [4, 10, 15].



1.12 pav. Plokščiųjų saulės kolektorių klasifikacija pagal naudojimo būdą [5, 13].

1.4 lentelė. Kolektorių klasifikacija pagal šilumos perdavimo terpę [10].

Šilumos nešėjas	Efektyvumas, %	Darbinė šilumnešio temperatūra, °C
Skystis	30 – 75	75 – 1500 ir daugiau
Oras	30 – 65	30 – 80

Dangčio paskirtis sulaikyti absorberio išspinduliuotą ir nesugertą Saulės energiją ir taip sumažinti šilumos nuostolius. Danga padengiama selektyviu dažų sluoksniu arba paliekama skaidri. Naudojamai skaidriai dangai taikoma sąlyga, kad jos gamybai naudojamos medžiagos turi praleisti kuo didesnę kiekį trumpųjų Saulės spindulių (pralaidumas turi viršyti 89 procentus).

Kolekatoriaus rėmo pagrindinė paskirtis yra sujungti absorberį ir kanalus bei išlaikyti juos bendroje sistemoje. Norint sumažinti šilumos nuostolius kolekatoriaus rėmas izoliuojamas panaudojant izoliacines medžiagas (mineraline vilna, poliuretano putplasčiai, stiklo vilna, stiklo pluoštas ir kitas izoliacines medžiagas). Izoliacija dedama po absorberiu ir iš visų kolekatoriaus šonų [13, 15].

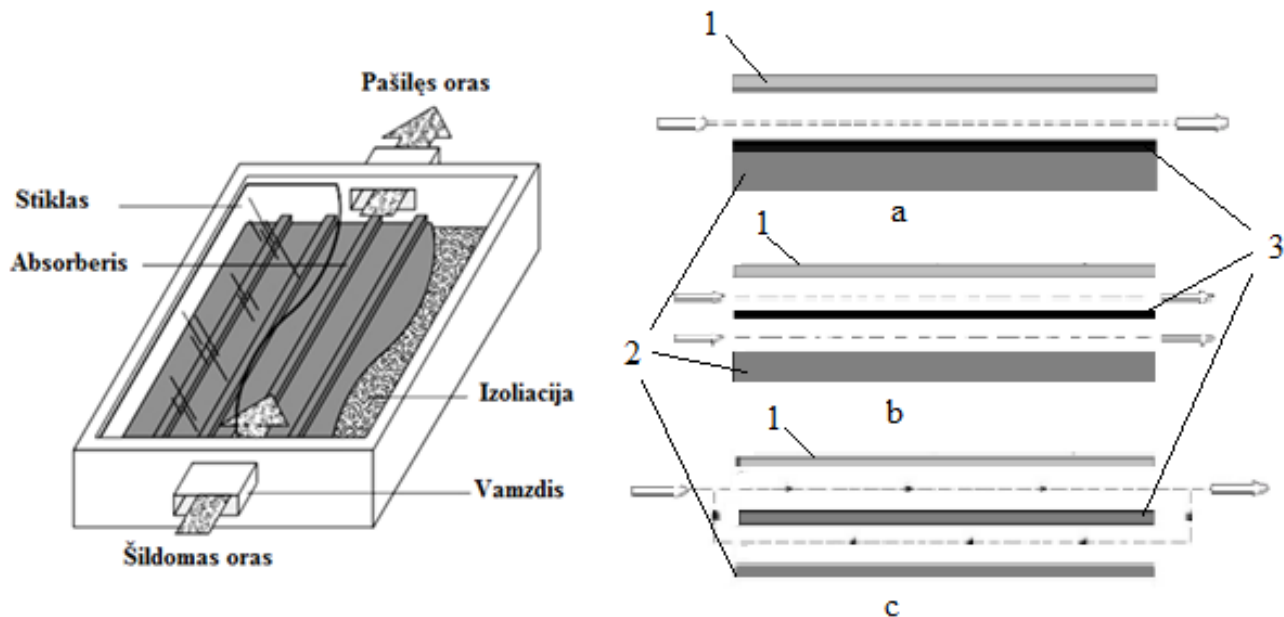
#### **1.2.2.1.1.1 Orą šildantys saulės kolektoriai**

Norint pasiekti baigiamojo projekto tikslą, reikia pasirinkti modeliuojamo kolekatoriaus rūšį. Įvertinus atskirų kolektorių rūšis bei jų konstrukciją, nuspręsta modeliuoti plokščiojo tipo saulės kolektorių. Šie kolektoriai yra plačiai paplitę Lietuvoje dėl paprastos konstrukcijos bei platesnių panaudojimo galimybių Lietuvos klimatinėmis sąlygomis. Detalizuojant koks plokščiojo kolekatoriaus tipas bus nagrinėjamas toliau, buvo atsižvelgta į kolekatoriaus efektyvumą. Iš 1.4 lentelės matoma, kad oro šildymo kolektorių efektyvumas mažesnis nei vandens kolektorių, todėl priimama išvada, kad oro kolekatoriaus šilumos atidavimo procesą būtina gerinti.

Oro saulės kolektoriai (1.14 pav.) yra plokščiųjų saulės kolektorių vienas iš tipų. Jie skiriasi nuo vandens ir skysčių šildymui naudojamų kolektorių šiomis savybėmis: jų konstrukcija panaši, tačiau oro kolektoriuje gali nebūti vamzdelių, kuriais teka pagrindinis šilumos nešėjas; jų sistema neturi cirkuliacinio siurblio, todėl jie yra lengvesni; naudojamas papildomas oro cirkuliaciją sukeliantis ventiliatorius; ypač tinkami integravimui į pastato karkasą. Kadangi, saulės kolektoriai naudoja orą kaip šilumos pernešėją išvengiama šilumos nešėjo užšalimo ir kolekatoriaus perkaitimo problemų. Šiuos kolektorius galima naudoti pastatų ventiliacijai, šildymui arba agrokultūros džiovinimui [5, 20].

Oro šildymo kolektoriai sandara (1.14 pav. kairėje) nesiskiria nuo vandens šildymo kolektorių. Kolektorių sudaro stiklas, absorberis, izoliacija ir elementas, kuriame teka šilumnešis (oras). Elementas gali būti stačiakampio ar kitos formos, pavyzdžiui, cilindro. Taip pat galimi įvairūs kolekatoriaus konstrukcijos modifikavimo būdai (1.14 pav. dešinė), pavyzdžiui, elemente

šilumnešis recirkuliuoja (1.14 pav. c) taip pat šilumnešis gali būti tiekiamas dviem kanalais (1.14 pav. b) ir kitokiais būdais.



1.13 pav. Plokščiojo saulės kolektoriaus konstrukcijos variantai: a – viengubo srauto kolektorius, b – dvigubo srauto kolektorius, c – viengubo srauto su recirkuliacija kolektorius. Paveikslėlyje: 1. Stiklas, 2. Izoliacijos sluoksnis, 3. Absorberio plokštelė [5, 20].

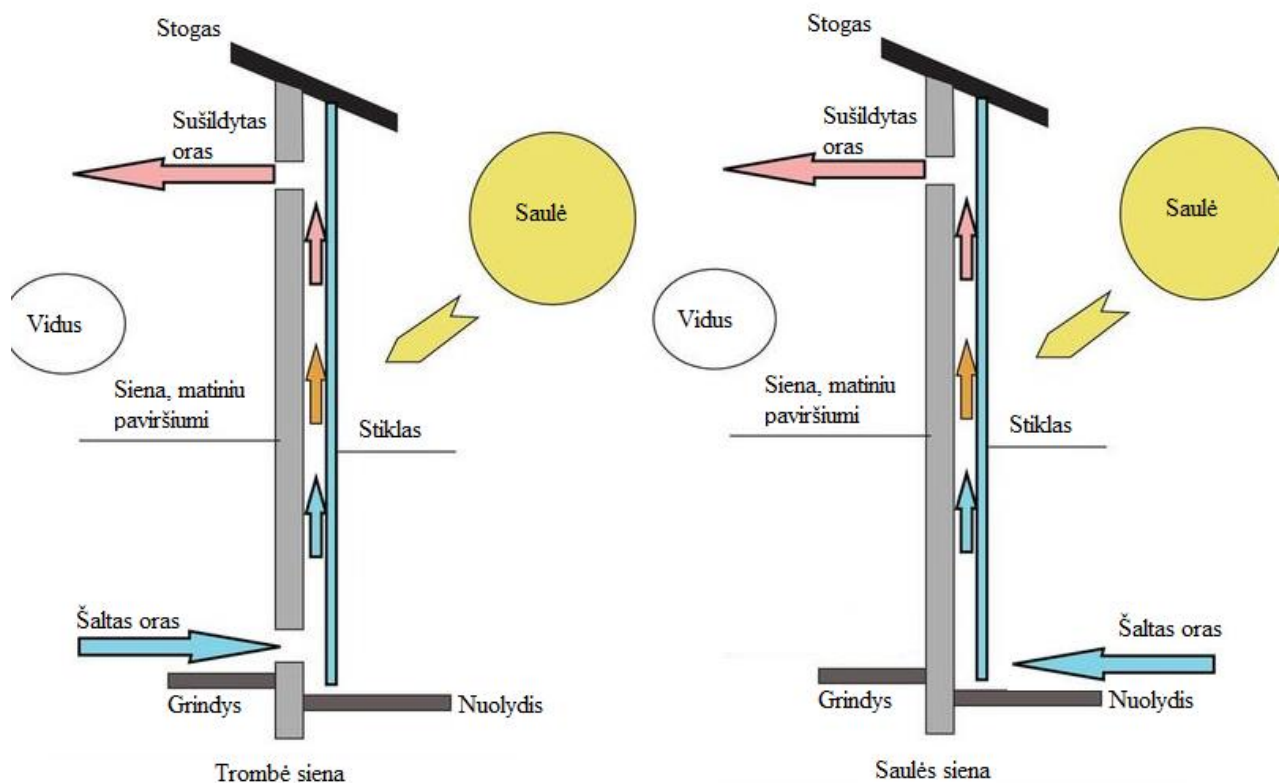
Kai kuriuose nagrinėtuose šaltiniuose Saulės sistemos veikiančios panašiu principu yra vadinamos oro kolektorinėmis sistemomis, pavyzdžiui, Saulės siena, trombė siena (1.16 pav.). Oro šildymo kolektorinių sistemų efektyvumo palyginimas pateiktas 1.5 lentelėje. Šios sienos yra pasyvaus šildymo/vėdinimo sistemos, atliekančios šilumos akumulatoriaus funkciją. Jos dėl didelio Saulės intensyvumo ir galimybės panaudojant patalpose esantį orą, statomos pietinėje namo pusėje.

1.5 lentelė. Skirtingų tipų oro kolektorių sistemų palyginimas pagal paskirtį [20].

Kolektoriaus tipas	Ventiliacija	Šildymas	Džiovinimas
Neįstiklintas	Didelis efektyvumas	Neefektyvus	Didelis efektyvumas
Įstiklintas	Vidutinis efektyvumas	Neefektyvus	Vidutinis efektyvumas
„Galinio srauto“ ( <i>angl. back-pass</i> )	Vidutinis efektyvumas	Vidutinis efektyvumas	Didelis efektyvumas
Trombė siena	Vidutinis efektyvumas	Vidutinis efektyvumas	-

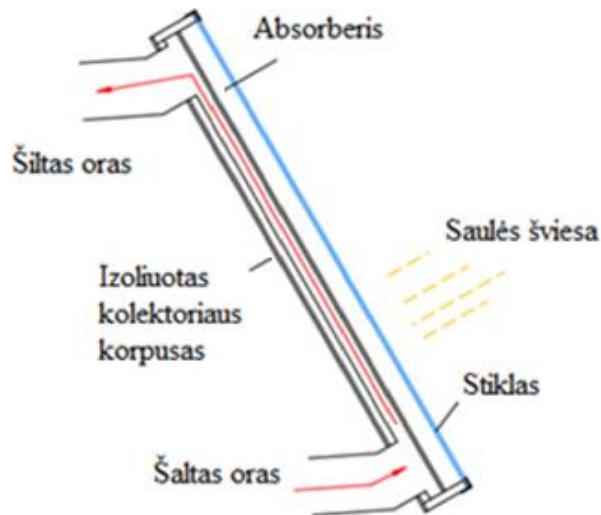
Jų sandara primena oro saulės kolektorių. Siena (betonas, plytos, statybiniai blokai) padengiama matiniu paviršiumi, kuris efektyviai sugeria Saulės šviesą (absorberis). Oras tekdamas tarpe tarp sienos ir stiklo nuveda šilumą nuo jos ir pašyla. Kadangi, šilumos atidavimo procesas vyksta lėčiau nei Saulės energijos absorbavimo procesas, siena šilumą išlaiko ilgiau ir šildymo procesas vyksta visą parą.

Skirtumas tarp trombės sienos ir „saulėtos erdvės“ yra oro cirkuliacijos pobūdis (1.14 pav.). „Saulės siena“ naudojama daugiau, kaip uždaras šilumos akumulatorius, tai yra išilęs oras sulaikomas uždaroje erdvėje ir pašilusio oro cirkuliacija į pastatą vykdomas papildomais įrengimais. Trombė siena naudojama oro vėdinimui bei šildymui, tai yra oro cirkuliuoja natūraliai tiesiogiai pastato viduje ir į trombės sieną atiteka vis mažesnį temperatūrinį potencialą turintis oras.



1.14 pav. Trombė ir Saulės sienos konstrukcija.

Tradicinių oro kolektorių sandara remiasi ir „galinio srauto“ oro srauto kolektoriai. Šie kolektoriai naudojami įmontuojant juos į pastato karkasą. Jų sandara pavaizduota 1.15 paveiksle. Juos sudaro stiklas, absorberis, izoliacija bei korpusas. Skirtumas tarp šio tipo kolektorių ir tradicinių yra šilumnešio tekėjimo vieta kolektoriuje bei šilumnešio cirkuliacinis kontūras. Šilumnešis teka tarpe tarp absorberio ir izoliuoto kolektoriaus korpuso, o ne tarp absorberio ir skaidrios dangos. Kolektoriaus šilumnešis cirkuliuoja pastato viduje, todėl jo kiekis yra normuojamas ventiliais, kurie įrengiami kolektoriuje šilumnešio tekėjimo elemente.



1.15 pav. „Galinio srauto“ oro kolektorius [21].

Didžiausią efektyvumą turi kombinuotos paskirties plokštieji saulės kolektoriai. Tokie kolektoriai dažniausiai naudojami oro ir vandens šildymui. Jų konstrukcija yra identiška tradicinių plokščiųjų vandens šildymo kolektorių konstrukcijai. Yra tik vienas skirtumas, kad šilumnešis teka tarpe tarp stiklo ir izoliuoto korpuso. Tokios konstrukcijos kolektoriuje privalomas papildomas įrenginys (ventiliatorius), kuris priverstų orą cirkuliuoti [5, 13, 20].

#### 1.2.2.1.2 Šilumos atidavimo proceso tyrimai atlikti plokščiojo tipo saulės kolektoriuose

Saulės sistemų efektyvumui pagerinti siūlomi du būdai. Vienas iš jų yra plėsti jau turimą sistemą ir taip pagerinti bendros sistemos efektyvumą. Šis būdas yra ekonomiškai nuostolingas, nes išauga tokios sistemos kapitaliniai bei eksploataavimo kaštai taip pat patiriami didesni energetiniai nuostoliai. Kitas būdas yra gerinti šilumos atidavimo procesą ir taip pagerinti bendrą sistemos efektyvumą. Šiame baigiamajame darbe nagrinėjamas antrasis būdas, todėl atliekama mokslinių tyrimų analizė šia tema pasirinktam kolektoriaus tipui – oro saulės kolektoriui.

Fanas kartu su mokslininkų grupe atliko eksperimentinius bei skaitinius tyrimus, susijusius su šilumnešio srauto pasiskirstymu plokščiam ore saulės kolektoriuje. Tyrimo metu buvo nagrinėjama, kaip skirtingi srauto greičiai bei kolektoriaus posvyrio kampai daro įtaką šilumos atidavimo procesui. Darbų metu buvo įrodyta, kad mažėjant srauto greičiui buvo stebimas stiprėjantis termogravitacijos reiškinys. O tai sukelia didesnę srautų maišymąsi ir padidina šilumos atidavimo procesą. Taip pat įrodyta, kad pasvirimo kampas turi didelės įtakos srauto pasiskirstymui ne ties didesniais, bet ties mažesniais srauto greičiais. Sandhu kartu su Siddiqui bei Garcia parodė, kad posvyrio kampo kitimas turi įtakos termogravitacijos jėgos sukulto srauto trajektorijai bei dydžiui. Nepaisant darbinio skysčio judėjimo, kai kolektoriaus padėtis yra horizontali, termogravitacinio srauto dydis labiausiai ribojamas vertikaloje plokštumoje, kuri atitinka

kolektoriaus vamzdelio skersinį pjūvį. Didėjant kolektoriaus pasvirimo kampui, padidėja ir vertikali plokštumos plotas, kuris lemia išaugusį termogravitacijos jėgos sukeltą antrinį srautą. Dėl šios priežasties sukuriama geresnis srautų maišymosi procesas bei gaunamas didesnis šilumos atidavimo koeficientas [22, 23, 24].

Gunniewieko atliko oro saulės kolektoriaus šilumos balanso lygties skaičiavimą ir palygino gautus analitinius rezultatus su eksperimentiniais. Šie parodė, jog kolektoriaus efektyvumas yra mažai veikiamas išorinės konvekcijos, kuri vyksta tarp stiklo plokštės ir oro (vėjo), kai kolektoriaus šilumnešio tekėjimo greitis viršija 0,05 m/s. Iš sudarytos efektyvumo lygties buvo pastebėta, kad sumažinus tiekiamo oro greitį į kolektorių sumažėja jo efektyvumas. Buvo priimta prielaida, kad taip atsitinka dėl sumažėjusio šiluminio potencialo nuvedimo nuo kolektoriaus paviršiaus. Dėl šios priežasties kolektoriaus paviršiaus temperatūra išauga ir kolektorius pradeda reaguoti į vėjo sukeltą konvekciją [25].

Shuilian Lu ir Hui Wang atliko saulės oro kolektoriaus tyrimą, kuriame nagrinėjo šilumos atidavimo proceso intensyvumo priklausomybę nuo absorberio plokštelės paviršiaus formos. Pastebėta, kad kolektoriaus šilumos atidavimo procesas padidėja esant didesniai absorberio paviršiaus plotui. Panašų skaitinį modeliavimą atliko Singhas ir Nayakas. Jie ištyrė saulės oro kolektoriaus efektyvumo priklausomybę nuo srauto debito ir kolektoriaus konstrukcijos patobulinimo. Šiuo atveju buvo keičiama ne absorberio plokštelės forma, o ant jos pritvirtintos kliūtys. Tyrimo metu pastebėta, kad kliūtys padeda turbulizuoti srautą bei sukuria recirkuliacines zonas prie kurių padidėja srauto temperatūra sumažėjus srauto greičiui, o tai lemia kolektoriuje vykstančio šilumos atidavimo proceso intensyvumo padidėjimą. Saini ir Verma atliko eksperimentą, kurio metu keistas absorberio plokštelės šiurkštumas ir jo daroma įtaka kolektoriaus šilumos perdavimo procesui. Gauta, kad didinant šiurkštumą sukuriama turbulentinis fluido srautas ir taip, pagerinamas šilumos nuvedimas nuo absorberio plokštelės. Youcef-Ali ir Desmonas savo tyrimu patvirtino Singho ir Navakio daryto bandymo rezultatus. Jie gavo, kad stačiakampio formos kliūtys padeda turbulizuoti srautą, todėl padidinamas šilumos atidavimo procesas tarp absorberio ir plokštelės bei fluido. Rachidas ir Abboudi atliko oro kolektoriaus su kliūtimis eksperimentinį bandymą, kurio tikslas buvo ištirti kliūčių daromą įtaką šilumos perdavimo procesui. Gauta, kad patobulinus kolektoriaus konstrukciją kliūtimis ir ortakiais padidėja šilumos atidavimo procesas. Įvertinus kolektoriaus konstrukcijos pakeitimo išlaidas buvo gauta, kad kolektoriaus eksploatacinės bei kapitalinės išlaidos smarkiai padidėja [25, 26, 27, 28, 29].

Busedra ir Solimanas analizavo fluido tekėjimo greičio laukus plokščiojo uždaro kolektoriaus viduje, esant skirtingiems krintančio šiluminio spinduliavimo srautams ir skirtingoms mišrios konvekcijos sąlygoms. Tyrimo metu sudarytas šilumos mainų esant mišriai konvekcijai skaičiavimo algoritmas. Tyrimų rezultatai parodė, kad kolektoriaus Saulės intensyvumas pastebimai

pakeičia vidutinio greičio lauko struktūrą ir dydį bei lemia šilumos atidavimo dydį darbiniam skysčiui. Pastebėta, kad kolektoriaus šildymas sukuria vidutinio greičio profilių asimetriją Reinoldso skaičių intervale ir sukelia šilumos atidavimo sąlygų pokyčius [30].

Mohammedas ir Salmanas atliko eksperimentus, susijusius su mišrios konvekcijos tyrimu horizontaliame cilindriniam vamzdelyje esant besivystančiam ir visiškai išsivysčiusiam laminarinio tekėjimo režimui. Šiuo atveju oras buvo laikomas darbinio fluidu. Nustatyta, jog sumažint oro srauto vertę padidėja sienelės temperatūra. Taip pat pastebėta, kad laisvoji konvekcija turi įtakos šilumos perdavimo sumažėjimui, kai srauto vertės yra nedidelės. Atlikta lyginamoji analizė parodė, kad mišrios konvekcijos šilumos perdavimo mechanizmas vamzdelio viduje sukuria didesnę Nuselto skaičių (pilnai išvystytame regione, esant šoniniam šilumos perdavimui) nei jis yra fiksuojamas horizontaliame elemente su tolygiai kaitinama sienele. Termogravitacijos jėga kartu su šilumos srauto trajektorija prisideda prie antrinio srauto padidėjimo, o tai savo ruožtu pagreitina šilumos atidavimo ir perdavimo procesus [31].

Benderradję nagrinėjo tėkmės modelius laminarinės mišrios konvekcijos horizontaliame stačiakampio formos elemente priklausomybę nuo kintančio Relėjaus skaičiaus. Pastebėta, kad laisvoji konvekcija pirmiausiai suformuoja du išilginius sūkurius, kuriuose padidėja srauto temperatūra ir dėl to padidėja Nuselto skaičiaus vertė. Panašų eksperimentą atliko ir Patelas kartu su Vijay Babu. Jie nagrinėjo kombinuotą laisvosios ir priverstinės konvekcijos atvejį laminarinio tekėjimo srityje, stačiakampio formos horizontaliame vamzdelyje. Šiuo atveju darbinis skystis buvo vanduo su etilenglikoliu. Pastebėta, kad paviršinis šilumos perdavimas auga iki mišrios konvekcijos ribos, o sumažėja esant tik priverstinei konvekcijai. Panaudojus glikolį pastebėta, kad mišri konvekcija pastebima esant mažesniems Reinoldso skaičiams lyginant su eksperimentiniais duomenimis gautais naudojant vandenį [23, 32].

Aldabbagha ir kiti nagrinėjo saulės oro vėdinimo kolektoriaus efektyvumo priklausomybę nuo fluido tekėjimo greičio. Tyrimo metu stendą sudarė saulės kolektorius su 6 kliūtėmis (1,50 m ilgio). Buvo fiksuojama kaip pasikeičia tiekiamo fluido temperatūra kintant saulės intensyvumui ir fluido masės debitui. Apskaičiuotas naudingumo koeficiento reikšmių pasikeitimas. Pastebėta, kad mažinant oro tekėjimo greitį temperatūros skirtumas tarp fluido įtekėjimo ir ištekėjimo temperatūrų didėja. Taip pat pastebėta, kad efektyvumas didėja didinant kliūčių skaičių kolektoriuje, kai yra nekeičiamas fluido tekėjimo debitas [32].

Eryener D. ir kiti teoriškai ir eksperimentiškai ištyrė oro kolektoriaus pritaikymo galimybes kapiliariniam šildymui. Tyrimo metu fiksuotas kapiliarų ir saulės kolektoriaus efektyvumas dirbant skirtingais režimais bei keičiant fluido debitą ir jo temperatūrą. Tyrimo metu pastebėta, kad esant didesnei fluido temperatūrai, bet mažesniai fluido srautui šilumos mainai yra intensyvesni.

Kapiliarinės šildymo sistemos su saulės kolektoriumi šilumos perdavimo koeficientas yra didesnis nei klasikinės kapiliarinės šildymo sistemos [33].

Achmidas kartu su Abboudi atliko skaitinį oro vėdinimo saulės kolektoriaus modeliavimą SIMPLE programa. Tyrimo metu tiriama šilumos perdavimo koeficiento priklausomybė nuo fluido (oro) ir kolektoriaus absorberio temperatūrų, kai pasinaudojant kolektoriaus kliūtimis ir turbulizatoriais sudaroma priverstinė oro konvekcija. Gauta, kad didinant turbulizatorių skersmenį ir kliūčių storį padidėja šilumos srauto perdavimas taip pat padidėja ir kolektoriaus efektyvumas. Įvertinus kapitalinius kaštus kolektoriaus konstrukcijos pakeitimui buvo priimta išvada, kad perdaryti turimą kolektoriaus tipą į modeliuojamąjį yra nuostolinga [33].

Vijayakumaras atliko bandymą, kurio metu buvo siekiama padidinti kolektoriaus šilumos atidavimo intensyvumą naudojant susuktą vielos ritę kolektoriaus cilindrinio vamzdelio viduje. Bandymo metu gauta, kad vielos buvimas kolektoriaus elemente sukelia slėgio kritimą kolektoriuje, kuris lemia šilumos atidavimo padidėjimą. Taip pat vielos buvimas srauto tekėjimo vietoje padeda sukurti turbulentinį srautą, kuris padidina šilumos atidavimo procesą. Panašų bandymą atliko ir Hobbi ir Siddiqui, tačiau jų gauti rezultatai parodė, kad tokio tipo papildomi priedai plokščiuose saulės kolektoriuose nepasiekia akivaizdaus poveikio šilumos atidavimo procesui [34, 35].

Fanas ir Furbo tyrimo metu nagrinėjo laisvosios konvekcijos įtaką saulės kolektoriaus veikimui. Atlikus modeliavimą paaiškėjo, kad sumažinus debito srautą ir keičiant termogravitacinių jėgų dydį, natūrali konvekcija daro įtaką fluido pasiskirstymui tyrimo kolektoriaus elementuose. Šiltesnis skystis yra sulaikomas viršutinėje kolektoriaus dalyje, o žemesnės temperatūros fluidas nusėda vamzdelio apačioje. Taigi, buvo priimta prielaida, kad mažėjantis srautas ir didėjanti jo temperatūra padidina kolektoriaus efektyvumą dėl aktyvesnės natūralios konvekcijos kolektoriuje. Pasiėkus tam tikrus masinio srauto dydžius pastebimas temperatūros išaugimas ties kolektoriaus viršutine dalimi. Tai gali lemti kolektoriaus perkaitimą bei jo efektyvumo sumažėjimą [36].

Apibendrinant visus nagrinėtus tyrimus pastebima, kad dažniausiai siekiant padidinti kolektoriaus šilumos atidavimo proceso efektyvumą plokščiojo tipo saulės kolektoriuose naudojami keli būdai: visiškai turbulentinio srauto sukūrimas, absorberio plokštelės paviršiaus formos pakeitimas, didesnės trinties tarp fluido ir absorberio plokštelės sukūrimas, temperatūrinio skirtumo tarp fluido ir paviršiaus didinimas, gravitacinių jėgų padidinimas ir kiti būdai. Daugiausia tyrimų atliekama eksperimentiniu tyrimo metodu, mažiausiai – skaičiuojant empirines formules. Tyrimo metu dažniausiai nagrinėjamos sistemos pritaikytos konkrečioms panaudojimo būdams bei sąlygoms, nesigilinant į šilumos mainus ar jų intensyvinimą.

Įvertinus atliktus šilumos atidavimo proceso tyrimus plokščiuose kolektoriuose pasirenkama, kad šilumos atidavimo proceso skaitinis modeliavimas atliekamas „galinio srauto“



oro kolektoriui. Siekiant ištirti, kaip pasikeičia šilumos atidavimo proceso intensyvumas jame priimama, kad jo konstrukcija bus patobulinta kliūtėmis.

Taigi, galutinis šio **baigiamojo projekto tikslas** – sudaryti šilumos atidavimo skaitinį modelį „galinio srauto“ oro šildymo kolektoriaus elementuose.

## 2 TYRIMO METODIKA

Saulės energijos sistemos visą laiką tobulėja ir darosi efektyvesnės. Žinoma, gerėjančių rodiklių nebūtų įmanoma pasiekti neatliekant sistemos tyrimų be jų projektavimo, gamybos, diegimo ar eksploatavimo metu surinktų žinių ir pastebėjimų.

Pasaulyje yra nemažai tyrimų metodų, kurie skiriasi savo metodologija, požiūriu į nagrinėjamą objektą ir į žmogiškuosius išteklius. Nors tyrimo metodo pasirinkimas daugiausia priklauso nuo atliekamo darbo tikslo, tačiau dažniausiai pasitaikantys yra eksperimentinis bei skaitinis modeliavimo būdai.

Skaitiniui modeliavimui naudojami paketai turi turėti galimybę nagrinėti pasirinktas sistemas pagal vartotojo užsiduodamą būdą. Nuo pasirinkto sistemos nagrinėjamo būdo priklauso kompiuterio resursų pasiskirstymas bei gaunamų rezultatų tikslumas. Pagal šias sąlygas išskiriamos šios programos naudojamos skaitiniui saulės kolektorių modeliavimui: TRINSYS, WATSUN, Polysun, F-Chart ir ANSYS CFX [37].

Pagrindiniai skirtumai tarp šių programų yra tyrimo tikslas: Polysun ir F-Chart programos naudojamos saulės sistemų bendram sistemos efektyvumui modeliuoti, kai reikiama apskaičiuoti jų ekonominius rodiklius; TRINSYS ir ANSYS programų pagalba galima nagrinėti sistemoje esančio fluido judėjimą ir šilumos mainų procesus tarp sistemos komponentų. Dėl šios priežasties ir programos prieinamumo skaitinis saulės kolektoriaus elemento modelis kuriamas, naudojant ANSYS Fluent programine įranga.

### 2.1 ANSYS Fluent programinis paketas

ANSYS Fluent yra bendros paskirties skaičiuojamosios skysčių dinamikos programinės įrangos paketas, kuris pasirinktas šio projekto tikslo įgyvendinimui. Fluent naudojamas didžiosiose pramonės šakose, tokiose kaip automobilių, aviacijos, chemijos ir medžiagų perdirbimo, elektros energijos gamybos, biomedicinos, šildymo ir elektrotechnikos. Fluent pasižymi dideliu modeliavimo tikslumu bei didelėmis modeliavimo, projektavimo ir analizės galimybėmis. Šios programinės įrangos pagalba galima modeliuoti skysčių tekėjimo srautus, šilumos perdavimą ir kitus sudėtingus procesus [38].

ANSYS Fluent remiasi skysčių dinamikos CFD (*angl. Computational Fluid Dynamics*) kompiuteriniu kodu. Šiame kode fluido tekėjimas apibūdinamas trimis fundamentaliais dėsniais:

- masės tvermės dėsniu (arba tolydumo dėsniu): fluido įtekėjusio ir ištekėjusio tūrio masė yra pastovi;

- Niutono antrasis dėsnis (arba impulso tvermės dėsnis): fluideo impulso pokytis proporcingas fluideo veikiančių jėgų sumai;
- energijos tvermės dėsnis (arba pirmuoju termodinamikos dėsnis tekančiam dujų srautui): fluidei suteiktos šiluminės energijos ir slėgio jėgų atlikto darbo suma turi būti lygi techniniam ir trinties jėgų darbui bei potencinės padėties, vidinės ir kinetinės energijų pokyčių sumai.

Šie dėsniai yra išreiškiami matematinėmis lygtimis, kurios bendru pavidalu yra išreiškiamos dalinių išvestinių lygtimis. Kiekvieną lygčių sistemą tenka skaičiuoti priartėjimo būdu (iteracijos). Skaičiuojant šias lygtis rankiniu būdu būtų neišvengiama žmogiškųjų klaidų bei tai pareikalautų labai daug žmogiškųjų išteklių, o tai paveiktų rezultatų tikslumą. Taigi, lygčių sistemos skaičiavimo darbas patikimas ANSYS FLUENT programiniam paketui [39].

### 2.1.1 Šilumos atidavimo proceso diferencialinių lygčių sistema

Skaičiuojant ar vertinant bet kokį vienfazio srauto tekėjimą galima nagrinėti jį, naudojantis šilumos mainų, srauto vientisumo, judėjimo ir energijos lygtis [39, 40].

#### 2.1.1.1 Šilumos mainų lygtis

Žinant, kad fluidei aptekant paviršių, jo tekėjimo greitis prie paviršiaus tampa beveik lygus nuliui ir šiluma per paviršutinius fluideo sluoksnius yra pernešama tik laidumo būdu. Todėl specifinį šilumos srautą per paviršių išreiškia Furjė dėsnis,  $W/m^2$ :

$$q = -\lambda(\text{grad}T)_p \quad (2.2)$$

čia:  $\lambda$  – fluideo šilumos laidumo koeficientas,  $W/(m \cdot K)$ ;  $(\text{grad}T)_p$  - fluideo temperatūros gradientas prie paviršiaus,  $K/m$ .

Specifinis šilumos srautą per paviršių galima išreikšti ir pagal Niutono dėsnį. Tuomet gaunama šilumos mainų diferencialinė lygtis:

$$\alpha \Delta T + \lambda(\text{grad}T)_p = 0 \quad (2.3)$$

čia:  $\alpha$  – šilumos atidavimo koeficientas,  $W/(m^2 \cdot K)$ .

#### 2.1.1.2 Energijos lygtis

Norint apskaičiuoti  $\alpha$  iš 2.3 lygties, reikia žinot temperatūros gradientą prie paviršiaus. Jis randamas iš diferencialinės energijos lygties. Ji sudaryta remiantis energijos tvermės dėsnis: fluidei suteiktos šiluminės energijos ir slėgio jėgų atlikto darbo suma turi būti lygi techniniam ir trinties jėgų darbui bei potencinės padėties, vidinės ir kinetinės energijų pokyčių sumai.

Tekant fluidei, į bet kokį erdvės elementą, nejudantį koordinatinių atžvilgiu, šiluma bus įnešama (išnešama) ne tik laidumo, bet ir konvekcijos būdu. Bendras energijos lygties pavidalas [39, 40]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

čia:  $\tau$  – laiko koordinatė;  $x$ ,  $y$  ir  $z$  – erdvės koordinatės.

### 2.1.1.3 Judesio kiekio lygtis

Energijos lygtyje atsiranda trys nežinomieji  $w_x$ ,  $w_y$  ir  $w_z$ , norint juos surasti reikia žinoti judančio fluideo greičių lauką. Ši aprašo judėjimo lygtis. Ši lygtis sudaroma remiantis antruoju Niutono dėsnium: bet kurį judančio fluideo elementą veikiančių jėgų atstojamoji yra lygi to elemento masei, padaugintai iš pagreičio. Bet kurį judančio fluideo elementą paprastai veikia trys jėgos: žemės traukos, slėgio ir trinties jėgos, kurios sukelia elemento pagreitį. Tuo remiantis sudaromos  $x$ ,  $y$ ,  $z$  ašių kryptimis judėjimo diferencialinės lygtys [40]:

$$\begin{aligned} \rho - \frac{Dw_x}{d\tau} - \rho g_x + \frac{\partial p}{\partial x} - \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) &= 0 \\ \rho - \frac{Dw_y}{d\tau} - \rho g_y + \frac{\partial p}{\partial y} - \mu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) &= 0 \\ \rho - \frac{Dw_z}{d\tau} - \rho g_z + \frac{\partial p}{\partial z} - \mu \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

čia:  $\rho$  – fluideo tankis,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  – laisvasis kritimo pagreitis,  $\text{m/s}^2$ ;  $\mu$  – dinaminis klampos koeficientas,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $p$  – fluideo slėgis,  $\text{Pa}$ ;  $w_x$ ,  $w_y$  ir  $w_z$  – greičio projekcijos į  $x$ ,  $y$  ir  $z$  ašis,  $\text{m/s}$ .

Šias tris lygtis galima pakeisti viena vektorine lygtimi, kuri vadinama Navje-Stokso lygtimi:

$$\rho \frac{D\vec{w}}{d\tau} - \rho \vec{g} + \nabla p - \mu \nabla^2 \vec{w} = 0 \quad (2.6)$$

čia:  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$  – operatorius.

### 2.1.1.4 Fluideo vientisumo lygtis

Judėjimo lygtyje atsirado dar vienas nežinomas  $p$ . Norint, kad lygčių sistema būtų išsprendžiama reikia sudaryti dar vieną lygtį, nebeįvedant naujų nežinomųjų. Ši lygtis yra fluideo vientisumo lygtis. Vientisumo arba nepertraukiamumo lygtį sudarė L. Euleris, pritaikęs materijos tvermės dėsnį. Pagal šį dėsnį izoliuotos sistemos masė  $m$  laikui bėgant nekinta.

$$\frac{dm}{d\tau} = 0 \quad (2.7)$$

čia:  $m$  – fluideo masė,  $\text{kg}$ .

Taigi, suslegiamo nestacionaraus fluideo vientisumo lygtis išreiškiama:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (w_x \rho)}{\partial x} + \frac{\partial (w_y \rho)}{\partial y} + \frac{\partial (w_z \rho)}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

Esant stacionaram fluido tekėjimui pirmas 2.8 lygties narys yra lygus nuliui. Kai slėgio laukas stacionarus ir aplinka nesuspaudžiama (tankis yra pastovus), vientisumo lygtis virsta nesuslegiamo fluido lygtimi [39]:

$$\frac{\partial(w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(w_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

Taigi, šilumos atidavimo procesas aprašomas diferencialinių lygčių sistema sudaryta iš 2.3, 2.4, 2.6, 2.9 lygčių. Atsižvelgiant į fluido tekėjimo pobūdį šios lygtys papildomos naujais parametrai, kurie įvertina turbulentinį tekėjimą [39, 40].

Naudojant ANSYS Fluent programinį paketą šios lygtys yra papildomas pagal vartotojo pasirinktą fluido tekėjimo modelį bei užsiduodamas kraštines sąlygas.

## 2.2 Skaičiavimo modelis $k-\varepsilon$

Tyrimo metu pasirinktas  $k-\varepsilon$  tekėjimo modelis.  $k-\varepsilon$  yra dažniausiai turbulentiniam fluido tekėjimo modeliavimui naudojamas modelis. Dviejų lygčių  $k-\varepsilon$  turbulentinis modelis remiasi gradiento difuzijos hipoteze, siekiant nustatyti ryšį tarp Reinoldso įtempimų ir vidutinių greičio gradientų bei turbulentinės klampos. Naudojant šį skaičiavimo modelį fluidų judėjimą aprašančios lygtys (2.1 skyrius) įgauna naują formą dėl papildomų turbulentinį tekėjimą apibūdinančių, kintamųjų: turbulentinės kinetinės energijos ir turbulentinės kinetinės energijos išskaidymo greičio. Turbulentinė kinetinė energija žymima  $k$  raide ( $m^2/s^2$ ). Šio fizikinis dydis nurodo srauto greičio svyravimo kitimą. Kinetinės energijos išskaidymo greitis žymima  $\varepsilon$  ( $m^2/s^3$ ) [48, 49].

Įvedus papildomus kintamuosius fluido tekėjimą aprašančių lygčių sistema pasikeičia ir lygtys įgauna tokį pavidalą:

Fluido vientisumo lygtis:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_k) = 0 \quad (2.10)$$

Judesio lygtis:

$$\frac{\partial \rho w_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho w_i w_j) = - \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2.11)$$

čia:  $S_M$  – fluidą veikiančios suminės jėgos atliktas darbas;  $\mu_{eff}$  – efektyvioji klampa, naudojama turbulencijos skaičiavimui, Pa;  $p'$  - modifikuotas slėgis, Pa, kuris išreiškiamas:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial w_k}{\partial x_k} \quad (2.12)$$

Turbulentinės kinetinės energijos ir jos išskaidymo greičio vertės apskaičiuojamos iš 2.13 lygčių:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho w_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho w_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{sb}) \quad (2.13)$$

čia:  $\sigma_k$  – k-ε modelio konstanta,  $\sigma_k=1$ ;  $\sigma_\varepsilon$  – k-ε modelio konstanta;  $\sigma_\varepsilon=1,3$ ,  $C_{\varepsilon 1}$  – k-ε modelio konstanta,  $C_{\varepsilon 1}=1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2}$  – k-ε modelio konstanta,  $C_{\varepsilon 2}=1,92$  [38, 41].

Šilumos mainus intensyvumą apibūdina Nuselto kriterijus. Šiuo kriterijumi palyginamas šilumos mainų intensyvumo padidėjimas dėl konvekcijos su grynu šilumos laidumo intensyvumu. Fluidui tekant uždarais kanalais (elementais) Nuselto kriterijus apskaičiuojamas pagal 2.14 formulę:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda} = \frac{q d_e}{\lambda (T_w - T_f)} \quad (2.14)$$

čia:  $T_w$  – sienelės temperatūra, K;  $T_f$  – vidutinė fluideo temperatūra, K;  $q$  – šilumos kiekis, W/m<sup>2</sup>.

### 2.3 Modeliavimo eiga

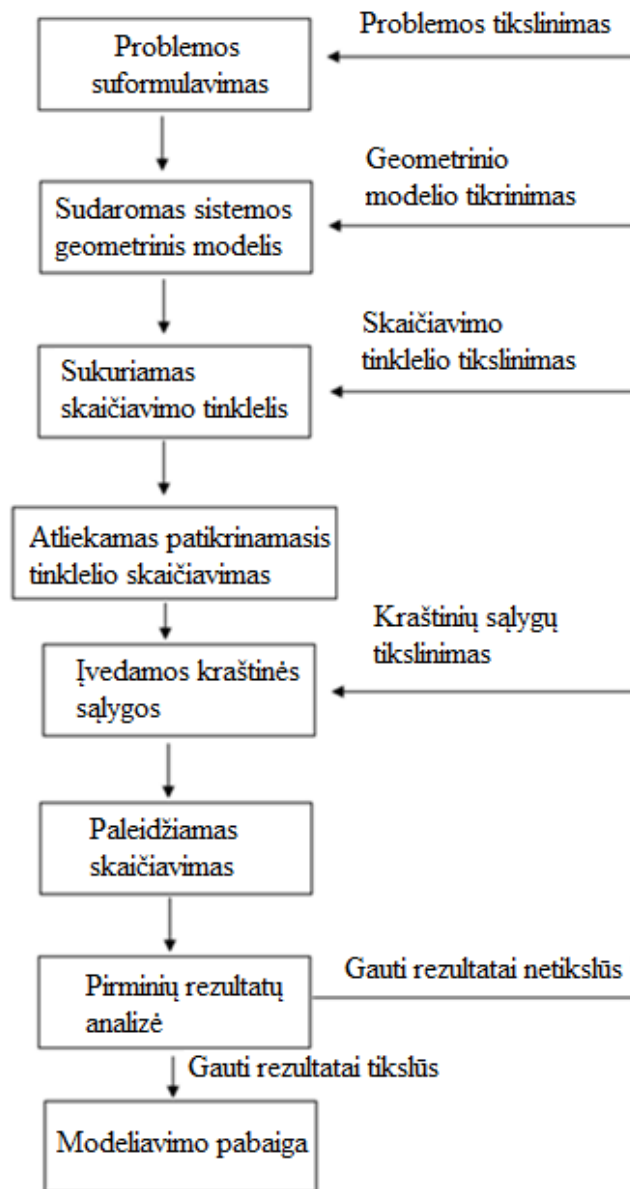
Naudojant ANSYS Fluent programą modeliavimo procesas atliekamas laikantis skaičiavimo algoritmo pateikto 2.1 paveiksle.

Pirmiausia apibrėžiama problema (pagal modeliuojamą situaciją) ir sudaromas problemos geometrinis modelis. Šį modeliavimo eigos etapą galima atlikti ir pasinaudojus kitomis, geometriją modeliavimui aprašančiomis, programomis (AutoCad, SolidWorks). Atlikus tai, parenkamas reikiamas skaičiavimo tinklelis. Jį sudaro baigtiniai elementai. Modelio skaidymas į baigtinius elementus yra svarbus, nes nuo jo priklauso problemos sprendimo eiga ir gautų rezultatų tikslumas. Taip pat tai nulemia kompiuterinių išteklių dydį bei apkrovimą, todėl prieš atliekant kitą etapą atliekamas tinklelio patikrinamasis skaičiavimas, kad būtų gaunami optimaliai tikslūs rezultatai neviršijant turimų kompiuterinių bei žmogiškųjų išteklių. Modelio tinklelis suskaidomas skirtingais metodais: baigtinių elementų, spektrinių elementų ir kitus. Šiame metode galioja sąlyga, kad paviršinis tūrinio debito integralas statmenai elemento paviršiui yra lygus nuliui bei įtekančio ir ištekančio iš elemento srautai yra lygūs.

Sudarius skaičiavimo tinklelį atliekamas problemos kraštinių sąlygų nustatymas. Šiame etape tiksliai nurodomi srauto įtekėjimo ir ištekėjimo (ar simetrijos) paviršiai, sistemą sudarančios medžiagos ir jų savybės, fluideo srautas bei jo žinomi parametrai (temperatūra, greitis, debitas ir kita), parametrų tarpusavio priklausomybės bei kitimas laike. Taip pat nurodomos vykstančios cheminės reakcijos, šilumos mainai ir/ar jų paviršiai, nurodoma srauto tekėjimo zona bei parenkamas turbulentiškumo ar kitas skaičiavimo modelis.

Kaip ir buvo minėta, skaičiavimas atliekamas naudojant kompiuterinius išteklius. ANSYS Fluent programoje skaičiavimai atliekami tol, kol gaunami iteracijų rezultatai konverguoja arba kol pasiekama užsiduota skaičiavimo paklaida. Paklaidos atsiranda dėl rezultatų apvalinimo, kraštinių sąlygų netikslumo, geometrijos supaprastinimo ir kitų priežasčių. Taip pat yra galimybė vartotojui skaičiavimą nutraukti bet kuriuo skaičiavimo metu, kai gautų rezultatų tikslumas tenkina vartotoją.

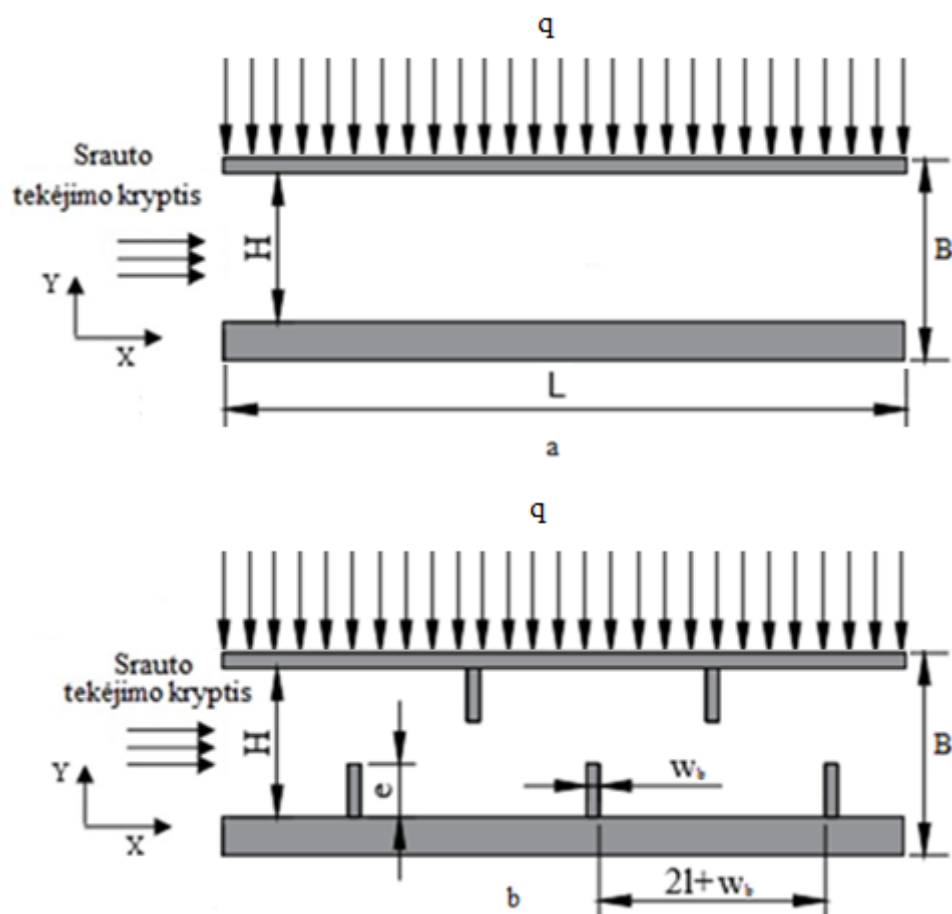
Sustabdžius skaičiavimą rezultatai apdorojami naudojant ANSYS programos vartotojo sąsają. Braižomi pasirinktų dydžių grafikai ant sudaryto modelio arba atskirai, išskaičiuojami ieškomi kintamieji nurodytose modelio vietose, sudaromos rezultatų lentelės ir atliekami kitokie rezultatų apdorojimo procesai. Jei turimi rezultatai tenkina vartotoją skaičiavimas pabaigiamas, jei ne – atliekamas modelio problemos, geometrinio modelio, kraštinių sąlygų ar skaičiavimo tinklelio tikslinimo procesai.



2.1 pav. ANSYS Fluent modeliavimo algoritmas.

### 3 TIRIAMOJO OBJEKTO SKAITINIS MODELIS

Tiriamasis objektas – „galinio srauto“ (*angl. back-pass*) oro šildymo kolektorius. Šilumos atidavimo procesas tiriamas tarp dviejų šio kolektoriaus plokštelių, t.y absorberio ir izoliacijos.



3.1 pav. Kolektoriaus elementų principinės schemos:  $a$  – standartinis „galinio srauto“ tipo oro saulės kolektoriaus elementas;  $b$  – patobulintos konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus elementas. Paveiksle:  $L$  – kolektoriaus elemento ilgis,  $B$  – kolektoriaus elemento aukštis,  $H$  – fluideo elemento plotis,  $e$  – kliūtis aukštis,  $w_b$  – kliūtis storis,  $l$  – atstumas tarp dviejų kliūčių;  $q$  – šilumos srautas.

Norint įvertinti kaip pasikeis šilumos atidavimo proceso intensyvumas „galinio srauto“ saulės kolektoriaus elemente, jo konstrukcija yra patobulinama kliūtimis (kliūtimis, 3.1 pav.). Konstrukcijoje kliūtys išdėstomos vidinėje gretimų plokštelių pusėse. Viršutinės kliūtys išdėstytos per apatinių kliūčių centrą.

Modeliavimui priimama, kad:

1. viršutinė plokštelė yra sugėrusi Saulės energiją, kurios dydis nekinta laike,
2. apatinė plokštelė yra tobulai izoliuota (nėra šiluminių nuostolių per ją).
3. tekantis srautas pasižymi stabiliomis termodinaminėmis savybėmis;

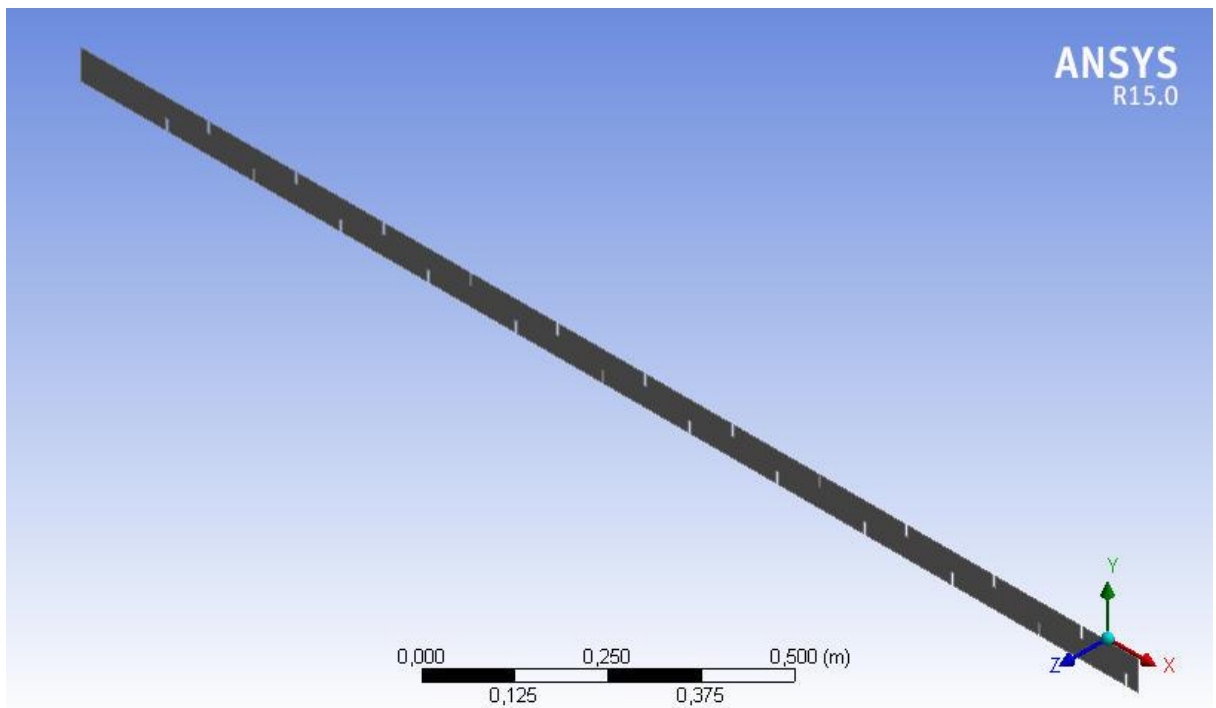
4. cirkuliuojantis oras yra idealios dujos;
5. vėjo daroma įtaka Saulės intensyvumui nevertinama;
6. fluideo (oro) drėgmės kiekis yra nevertinamas;
7. spinduliavimo įtaka nuo karštesnio paviršiaus nevertinama.

Į kolektoriaus elementą įteka fluideo aplinkos temperatūros  $T_i$  greičiu  $w$   $x$  ašies kryptimi (3.1 pav.). Fluideo teka tarp absorberio ir izoliacijos. Tekėdamas yra sušildomas iki temperatūros  $T_a$  ir išteka pro elemento pabaigą. Fluideo teka užpildydamas visą erdvę tarp dviejų plokštelių.

Atliekama skaitinio modelio šilumos atidavimo analizė keičiant tekančio srauto masinį debitą bei kliūčių išsidėstymą kolektoriuje. Gauti rezultatai palyginami su kolektoriaus elemento be kliūčių skaitinio modeliavimo rezultatais.

### 3.1 Kolektoriaus elemento geometrinis modelis

Elemento geometrinis modelis sudaromas naudojantis ANSYS DesignModeler programą. Sudaryti keli modeliai, kurie skiriasi kliūčių išsidėstymu saulės kolektoriaus elemente. Modeliuojami keturi kolektoriaus variantai: kolektoriaus elementas be kliūčių ir kliūtys išdėstytos kas 0,08, 0,16 ir 0,24 metro.



3.2 pav. Saulės kolektoriaus elemento geometrinis modelis.

### 3.2 Kolektoriaus elemento skaičiavimo tinklelis

Sukurtiems saulės kolektoriaus elementams sudaromi skaičiavimo tinkleliai. Naudojant baigtinių tūrių metodą galima sudaryti skirtingų formų ir elementų dydžio tinklelius. Nuo tinklelio

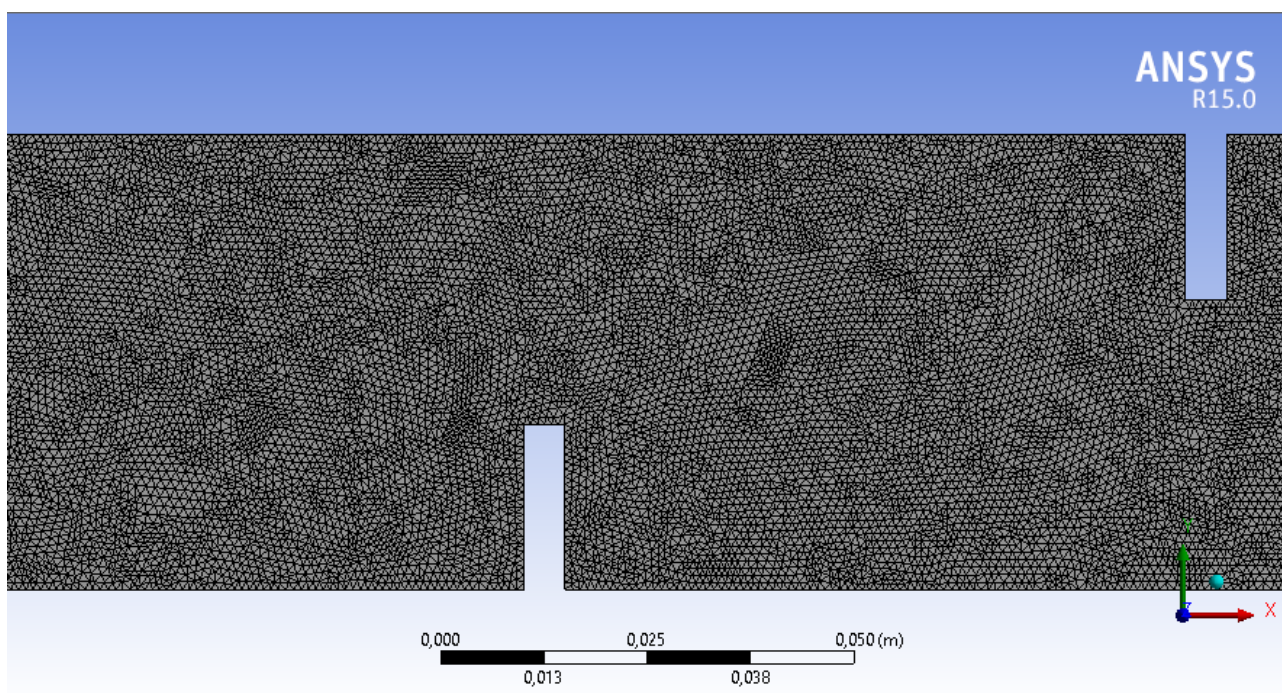


sudarytų elementų kiekio priklausomas problemos rezultatų tikslumas, todėl atliekami keli skaičiavimai su skirtingais tinkeliais (3.1 lentelė) norint įvertinti šią priklausomybę.

Išanalizavus gautų rezultatų tikslumą pasirinktas optimalus variantas, kuris nedaro įtakos rezultatų tikslumui. Taigi, parenkamas skaičiavimo tinkelis, kurį sudaro 168 917 elementai. Sugeneruotas tinkelis vaizduojamas 3.3 paveiksle.

3.1 lentelė. Duomenų tikslumo priklausomybė nuo tinkelio skaičiaus.

	Fluido įtekėjimo temperatūra, K (nustatyta vertė)	Vidutinė fluideo temperatūra, K (suskaičiuota vertė)
Elementų skaičius		
98 742	290,151	312,751
130 684	290,1501	309,575
168 917	290,1501	309,022
264 830	290,1501	308,998



3.3 pav. Sudaryto tinkelio pavyzdys, kai tarp kliūčių yra 0,16 m atstumas.

### 3.3 Modeliavimo kraštinės sąlygos

Atliekant skaitinį modeliavimą yra priimamos geometrinės, fizikinės bei ribinės kraštinės sąlygos.

**Geometriniai parametrai.** Skaičiavimams priimama, kad kolektoriaus elementas yra 2,0 metrų ilgio ir 0,45 m pločio bei 0,055 metrų aukščio. Kolektoriaus elemente įstatytų kliūčių storis yra 0,005 m ir jų aukštis 0,02 m, atstumas tarp kliūčių kintantis nuo 0 iki 0,24 m.

**Fizinės sąlygos.** Įvertinant Lietuvos meteorologines sąlygas pasirenkamas Saulės generuojamas šilumos intensyvumas į kolektoriaus elemento paviršių – 800 W/m<sup>2</sup>. Tai yra vidutinis Saulės intensyvumo dydis Lietuvoje įvertinus meteorologines sąlygas (daugiau nei debesuotą dieną, bet mažiau nei giedrą dieną). Priimama, kad nėra absorbcinių nuostolių per stiklą ir, kad visas kritęs Saulės srautas yra sugeriamas absorberyje.

Kolektoriuje tekantis fluidas – oras. Nevertinamas fluideo drėgmės kiekis, todėl priimama, kad fluidas yra sausas oras. Atsižvelgus į priimtą spinduliuotės dydį parenkama fluideo temperatūra lygi 17 °C (vidutinė oro temperatūra Lietuvoje vasara). Fluideo fizikinės savybės apskaičiuojamos iš šių formulių:

$$c_p = 975,2 + 0,12468 \cdot T_i + 3,3132 \cdot 10^{-6} \cdot T_i^2 \quad (3.1)$$

$$\mu = 4,314 \cdot 10^{-7} + 6,779 \cdot 10^{-8} \cdot T_i - 2,39 \cdot 10^{-11} \cdot T_i^2 \quad (3.2)$$

$$\lambda = 0,003954 + 7,72083 \cdot 10^{-5} \cdot T_i - 1,60822 \cdot 10^{-8} \cdot T_i^2 \quad (3.3)$$

$$\rho = 1,9049 - 3,04328 \cdot 10^{-3} \cdot T_i - 1,3889 \cdot 10^{-6} \cdot T_i^2 \quad (3.4)$$

Šiose formulėse:  $c_p$  – specifinė šiluma, J/(kg·K);  $T_i$  – fluideo įtekėjimo temperatūra, K.

Varinio absorberio šiluminis laidumas priimamas 385 W/(m·K), o mineralinės vatos, naudojamos izoliacijai, šiluminis laidumas – 0,043 W/(m·K).

**Ribinės ir pradinės sąlygos.** Užsidavus, kad fluideo greitis elemente kinta nuo 0,8 m/s iki 4 m/s. Apskaičiuojami pradiniai fluideo parametrai kolektoriaus elemento pradžioje pateikiami 3.3 lentelėje.

Žinant, kad modeliuojamas srauto modelis yra turbulentinis, apskaičiuojamas srauto tekėjimo režimą nurodantis Reinoldso kriterijus. Jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_e}{\nu} = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} \quad (3.5)$$

čia:  $w$  – fluideo greitis, m/s<sup>2</sup>;  $d_e$  – ekvivalentinis skersmuo, m;  $\nu$  – kinematinė klampa, m<sup>2</sup>/s.

3.5 formulėje reikalingas ekvivalentinis skersmuo stačiakampio formos elementams apskaičiuojamas pagal formulę:

$$d_e = \frac{4 \cdot S}{P} = \frac{4 \cdot H \cdot D}{2 \cdot D + 2 \cdot H} \quad (3.6)$$

čia:  $S$  – plotas, per kurį teka fluidas, m<sup>2</sup>;  $P$  – fluideo aptekamo paviršiaus perimetras, m;  $H$  – oro srauto elemento aukštis, m;  $D$  – oro srauto elemento plotis, m.

Gauti srauto įtekėjimo į elementą parametrai pateikti 3.2 lentelėje. Modeliavimo pradžioje buvo priimta, kad bus nagrinėjamas turbulentinis srauto tekėjimo režimas, todėl apskaičiuojamas  $Re$  kriterijus. Iš gautų duomenų matoma, kad kai srauto greitis yra 1, 2 ir 4 m/s susidaro visiškai turbulentinis srautas, o esant srauto greičiui 0,8 m/s susidaro pereinamasis tekėjimo režimas. Matoma, kad 0,8 m/s  $Re$  kriterijus yra tik 2 % mažesnis nei kritinė turbulentinio srauto  $Re$  reikšmė, todėl priimama, kad šis fluideo tekėjimo režimas yra irgi turbulentinis, todėl kolektoriaus elemento modeliavimas atliekamas su visais pasirinktais srauto greičiais.

3.2 lentelė. Pagrindiniai skaičiavimo parametrai.

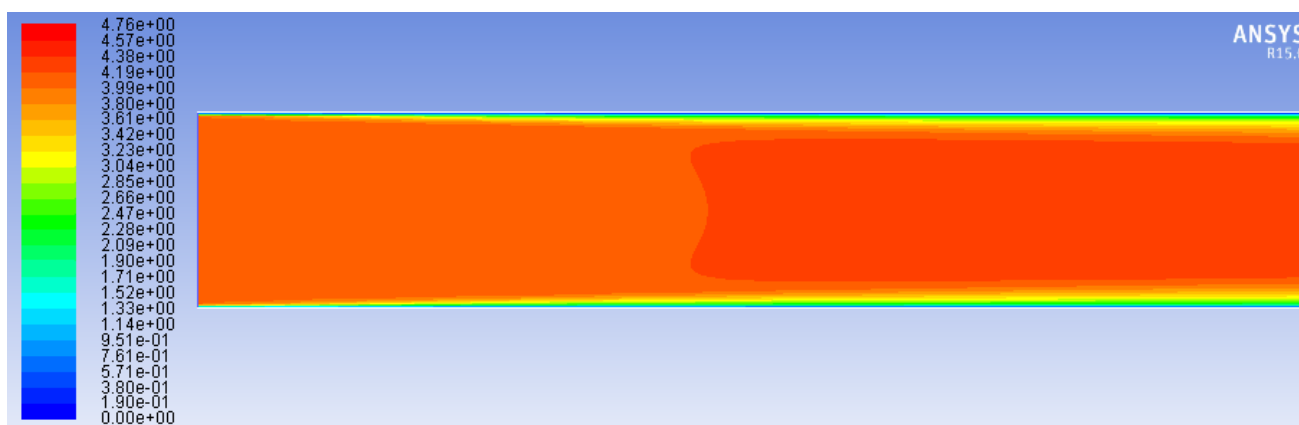
Pradinis srauto greitis, m/s	$d_e$ , m	$Re$	Masinis debitas, kg/s
0,8	0,098	3923	0,018
1		4904	0,022
2		9808	0,045
4		19616	0,090

## 4 TYRIMO REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Šilumos atidavimo procesas yra sudėtingas fizikinis reiškinys, nes jį sudaro hidrodinaminių ir šiluminių procesų visuma, todėl nagrinėjant gautus rezultatus bus išskiriami šie skyriai: hidrodinaminiai aspektai (greičio profilio kitimas bei hidrodinaminio sluoksnio susidarymas), temperatūros laukas (temperatūros gradiento kitimas), šilumos atidavimo procesas (Nuselto kriterijaus įvertinimas) ir pagrindinio kolektoriaus parametro efektyvumo vertinimas.

### 4.1 Standartinės konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus elementas

#### 4.1.1 Hidrodinaminiai aspektai

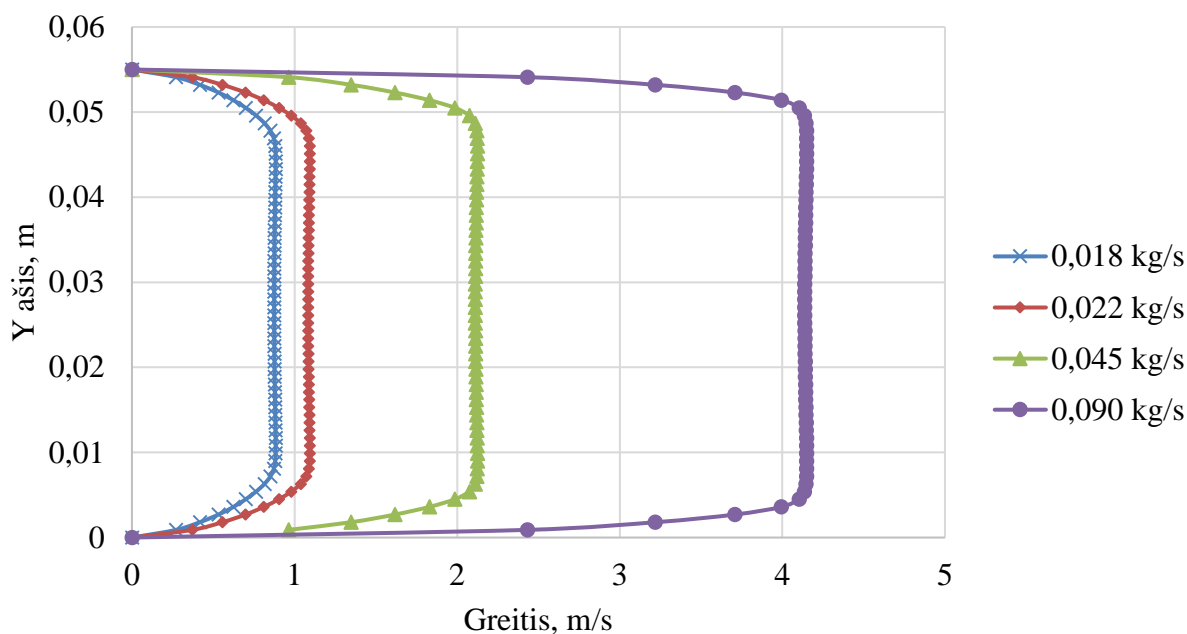


4.1 pav. Greičio kontūras elemento pradžioje (greitis, m/s).

Hidrodinaminiam aspektams priskiriamas hidrodinaminio pasienio sluoksnio susidarymas elemente. Iš 4.1 paveikslo matyti, kad fluidui įtekėjus į elementą pradiniu greičiu, šalia sienelės

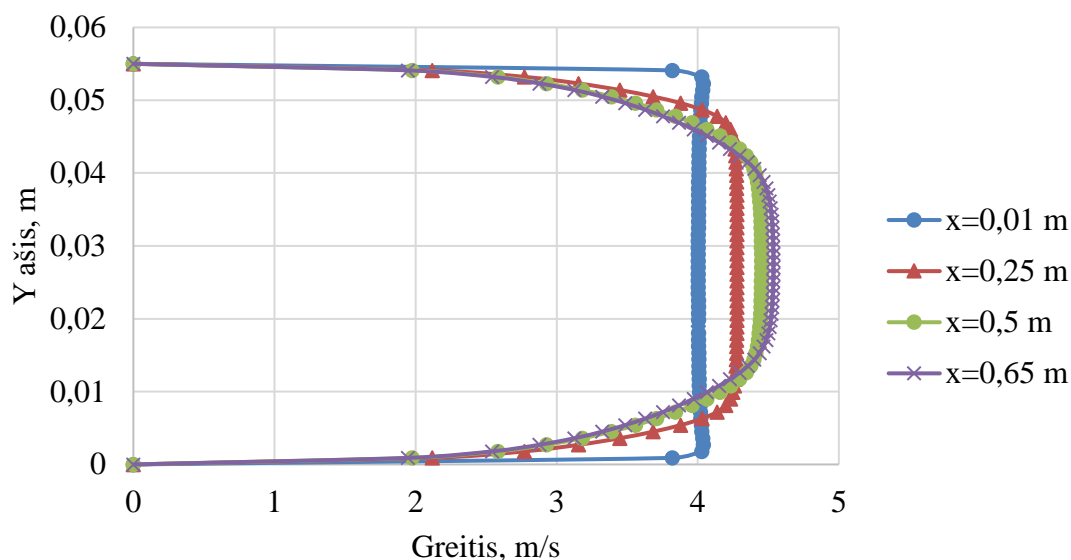
tekančių fluideo sluoksnelių greitis pradeda mažėti, tekant gilyn elementu. Dėl sienelės trinties jėgos ir fluideo klampos jėgos (tarp sienelės ir fluideo sluoksnelių tekančių šalia jos) ploname fluideo sluoksnyje pradeda formuotis hidrodinaminis pasienio sluoksnis, kurio storis didėja tekėjimo kryptimi. Jame fluideo greitis kinta nuo nulio (sienelės paviršiuje) iki įtekančio (nesutrukdyto) fluideo srauto greičio. Tekant toliau ir veikiant trintiems jėgoms greičiai prie sienelių mažėja, o centrinėje fluideo dalyje (šerdyje) didėja, taip yra todėl, nes pratekančio fluideo debitas ir vidutiniai greičiai skerspjūvyje yra pastovūs.

Greičių profilio pasiskirstymas elemento pradžioje ( $x=0,01$  m) pavaizduotas 4.2 paveiksle. Iš 4.2 paveikslo matoma, kad elemento pradžioje susidaro trapecijos formos turbulentinis greičio profilis, kuris tekant toliau elementu (4.3 pav.) pradeda deformuotis dėl didėjančio hidrodinaminio pasienio sluoksnio storio.



4.2 pav. Greičių profiliai elemento pradžioje ( $x=0,01$  m).

Iš 4.3 paveikslo matoma, kad fluidei tekant toliau elementu greičio profilis toliau deformuojasi, kol nusistovi. Iš 4.3 pateikto grafiko duomenų matoma, kad greičių profilis nusistovi, kai fluידas elemente pasiekia 0,5-0,65 m atstumą nuo jo pradžios. Šis atstumas vadinamas hidrodinaminio stabilizacijos ruožu, t.y tokiu šiame atstume galutinai susiformuoja greičių profilis, kuris likusioje elemento dalyje į priekį nesikeičia. Fluideo greitis elemente pasiekia maksimalią reikšmę ir nusistovi turbulentiniam tekėjimui būdingos formos greičių profilis.



4.3 pav. Greičių profilio pasikeitimas elemente.

Fluido vidutinio greičio priklausomybė nuo masinio debito nurodyta 4.1 lentelėje. Matoma, kad didėjant fluido pradiniam greičiui, vidutinis greitis elemento pabaigoje padidėja mažesniu skirtumu. Taip yra todėl, nes fluido kinetinė energija sumažėja dėl mažesnio pernešamo šiluminės energijos kiekio.

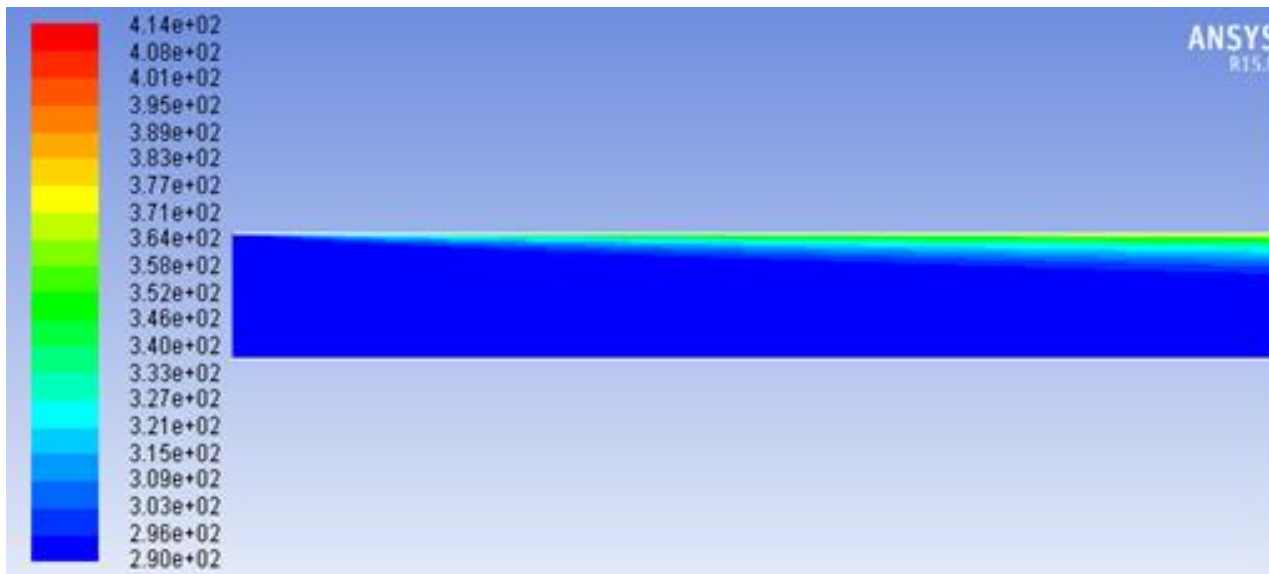
4.1 lentelė. Fluido greičio priklausomybė nuo srauto masinio debito.

Masinis fluido debitas, kg/s	Pradinis greitis, m/s	Vidutinis greitis elemento gale, m/s	Greičio padidėjimas, %
0,018	0,8	0,863	7,8
0,022	1	1,072	7,2
0,045	2	2,103	5,2
0,090	4	4,142	3,4

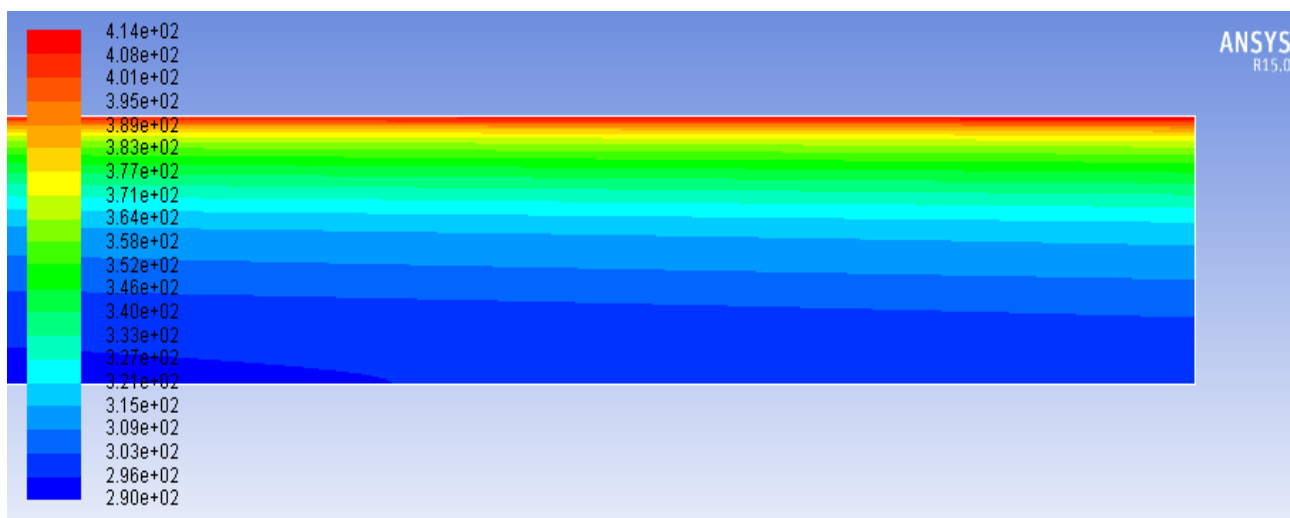
#### 4.1.2 Temperatūrinis laukas

Susidarant hidrodinaminiam pasienio sluoksniui, susidaro ir šiluminis pasienio sluoksnis. Šiluminiame pasienio sluoksnyje kinta temperatūros laukai. Tekant fluidui per elementą jo temperatūra padidėja, nes absorberio plokštei (viršutinė elemento dalis) yra suteikiamas šiluminis potencialas, kuris vykstant šilumos mainų procesui yra perduodamas, konvekcijos būdu, fluidui. Kadangi, fluido temperatūra yra mažesnė nei absorberio, temperatūrinis laukas prie absorberio plokštelės didėja (4.4 ir 4.5 pav.) tol, kol tampa vienodas visame srauto skerspjūvyje. Iš 4.5 paveikslo matoma, kad temperatūrinis srauto laukas nepasisiskirsto vienodai per srauto skerspjūvį,

nes suteiktas šilumos kiekio dydis bei elemento ilgis nėra pakankami, temperatūriniai gradientai pasiskirstyti vienodai.



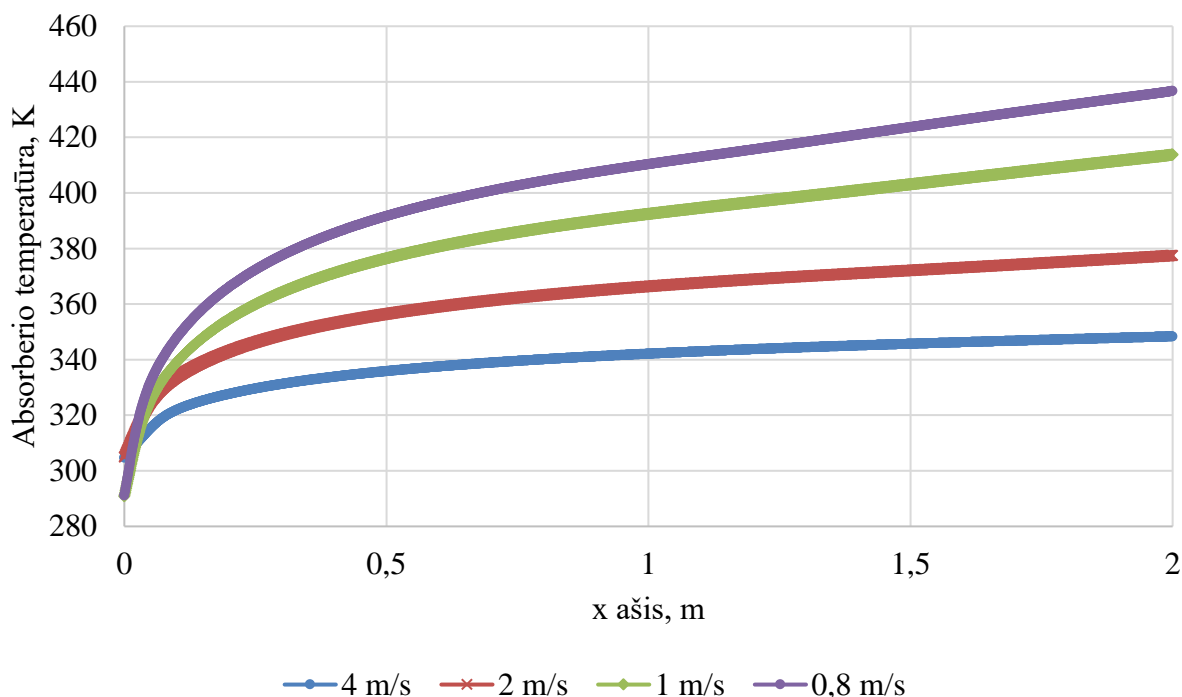
4.4 pav. Fluido temperatūrinis kontūras elemento pradžioje.



4.5 pav. Fluido temperatūrinis kontūras elemento pabaigoje.

Absorberio sienelės temperatūra didėja mažėjant fluido tekėjimo greičiui (4.6 pav.). Per absorberį šiluma perduodama fluidui. Šiuo atveju, sumažėjus fluido greičiui temperatūrinis skirtumas tarp fluido ir absorberio mažėja (4.2 lentelė). Temperatūra absorberio didėja, nes fluidas nenuveda pakankamo šilumos kiekio nuo absorberio, todėl konvekciniai šilumos mainai tarp fluido ir sienelės vyksta lėčiau. Fluido vidutinė temperatūra elemento pabaigoje mažėja, didėjant srauto masiniui debitui (4.2 lentelėje). Matoma, kad didėjant fluido tekėjimo greičiui, fluido vidutinė temperatūra mažėja kaip ir absorberio temperatūra. Tai galima paaiškinti tuo, kad padidinus srauto greitį nuvedama vis daugiau šiluminės energijos, todėl fluido ir absorberio temperatūros mažėja.

Dėl sumažėjusios fluideo bei absorberio temperatūros, sumažėja ir darbinė kolektoriaus temperatūra, todėl gaunami mažesni šiluminiai nuostoliai kolektoriuje ir gaunamas didesnis kolektoriaus efektyvumo koeficientas (4.7 pav.).



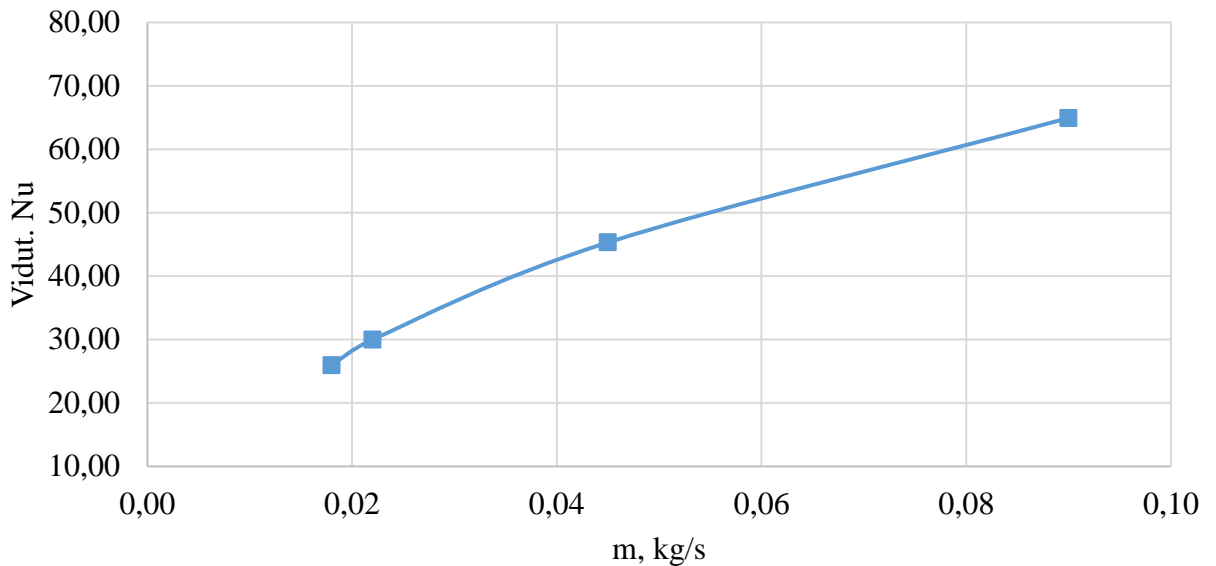
4.6 pav. Absorberio sienelės temperatūros priklausomybė nuo fluideo tekėjimo greičio.

4.2 lentelė. Vidutinės fluideo ir absorberio temperatūros.

Masinis fluideo debitas, kg/s	Fluideo greitis, m/s	Fluideo vidutinė temperatūra, K	Absorberio vidutinė temperatūra, K
0,018	0,8	333,57	418,15
0,022	1	324,95	400,90
0,045	2	306,60	362,27
0,090	4	294,12	339,47

#### 4.1.3 Šilumos atidavimo proceso intensyvumas

Šilumos atidavimo proceso intensyvumą apibūdina Nuselto kriterijus, kuris apskaičiuojamas pagal 2.14 formulę. Gauti rezultatai pavaizduojami 4.7 paveiksle. Matoma, kad didėjant masiniam fluideo debitui didėja ir vidutinis Nuselto koeficientas. Taigi, šilumos atidavimo procesas tarp viršutinės sienelės (absorberio) ir tekančio fluideo intensyvėja, didinant fluideo tekėjimo greitį bei jo masinį debitą.

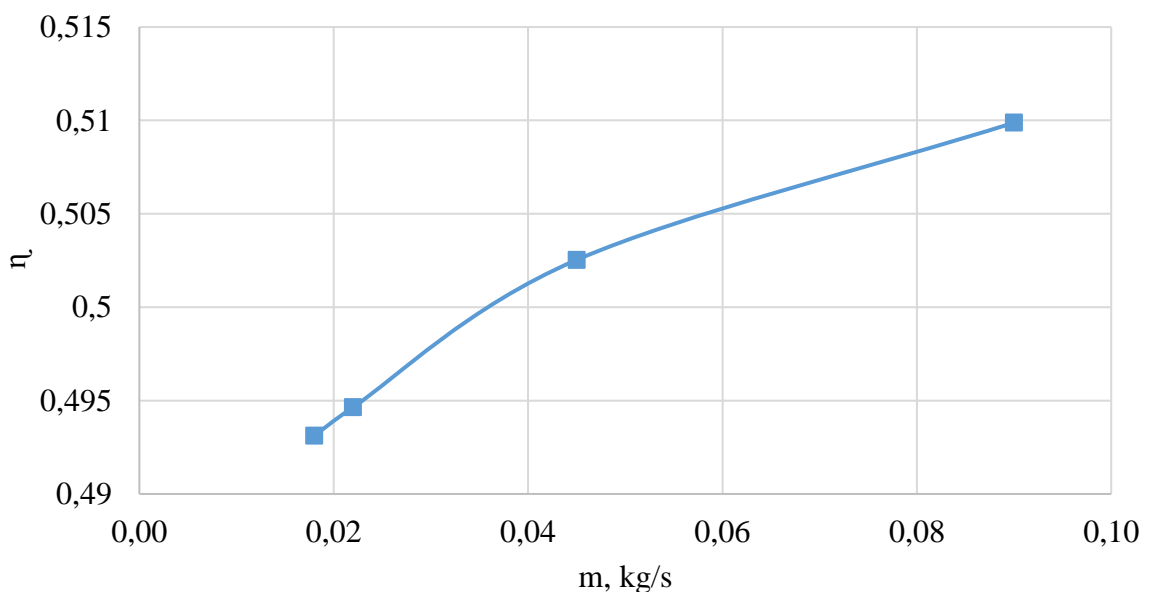


4.7 pav. Vidutinio Nuselto kriterijaus priklausomybė nuo masinio debito.

#### 4.1.4 Kolektoriaus efektyvumas

Panaudojus 1.1 formulę apskaičiuojamas standartinės konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus efektyvumas (4.8 pav.). Iš 4.8 paveiksle pateiktų duomenų matoma, kad didėjant fluido masiniam srautui efektyvumas didėja. Kolektoriaus efektyvumas padidėja dėl sumažėjusių šilumos nuostolių kolektoriuje bei padidėjusio šilumos atidavimo intensyvumo tarp fluido ir absorberio.

Literatūroje [43] nurodytų panašių išmatavimų „galinio srauto“ kolektoriaus efektyvumo koeficientas prie  $800 \text{ W/m}^2$  kinta intervale nuo 0,45 iki 0,55. Gauti skaitinio modeliavimo rezultatai patenka į šį intervalą, todėl galima priimti išvadą, kad skaitinio modelio rezultatai yra ganėtinai tikslūs.



4.8 pav. Standartinės konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus efektyvumas.

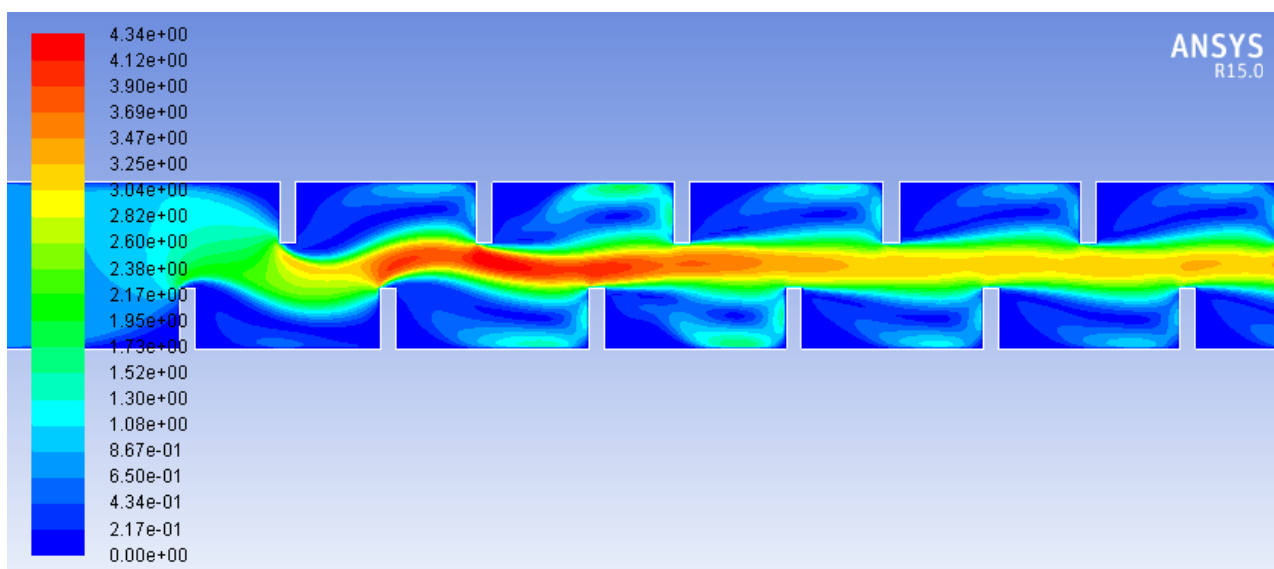


## 4.2 „Galinio srauto“ kolektoriaus elementai su kliūtimis

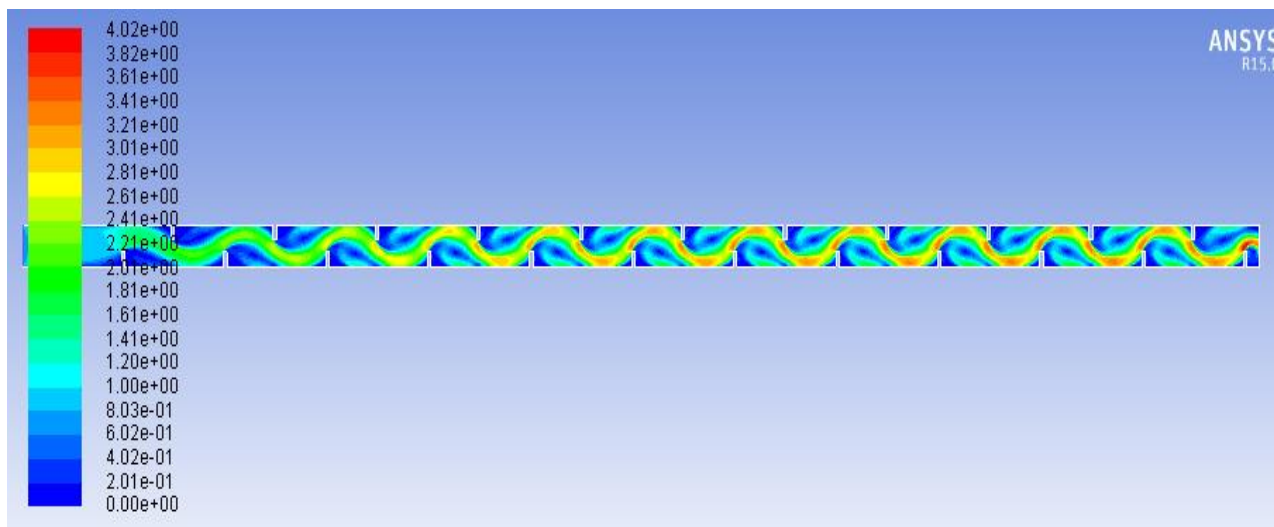
Primenama, kad buvo sudaryti trys patobulintos konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus elementų modeliai su skirtingais atstumais tarp kliūčių: 0,08, 0,16 ir 0,24 m. Šiame poskyryje pateikiami pagrindiniai skaitinio modeliavimo rezultatai, gauti modeliuojant patobulintos konstrukcijos „galinio srauto“ kolektoriaus elementus.

### 4.2.1 Hidrodinaminiai aspektai

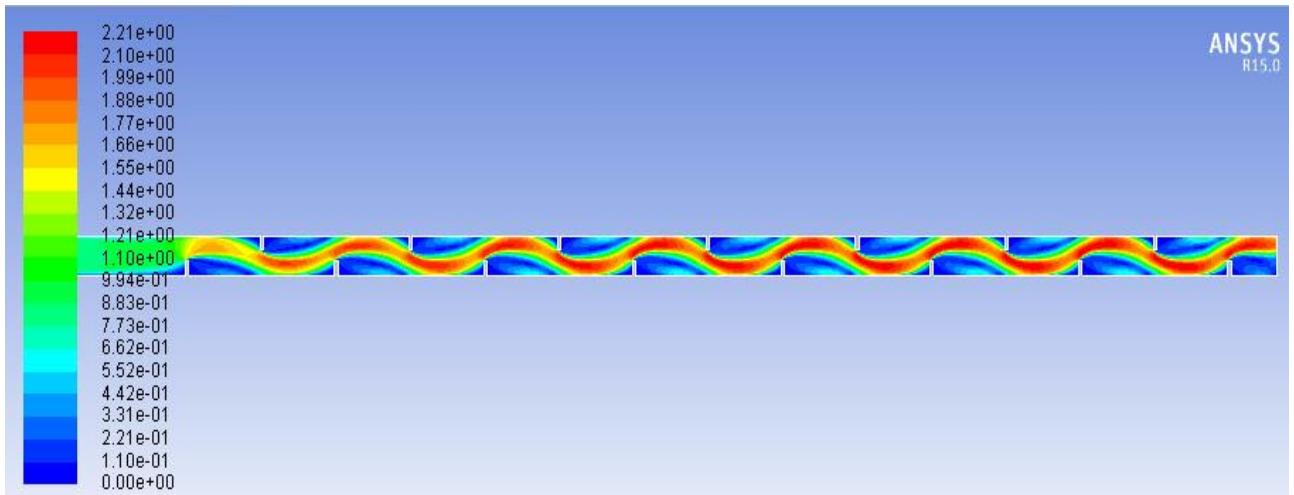
Srauto greičio kontūrai elementuose, esant vienodam fluido pradiniam greičiui bei jo debitui, pavaizduoti 4.9 (atstumas tarp kliūčių 0,08 m), 4.10 (atstumas tarp kliūčių 0,16 m) ir 4.11 (atstumas tarp kliūčių 0,24 m) paveiksluose.



4.9 pav. Greičio kontūras elemente (m/s).

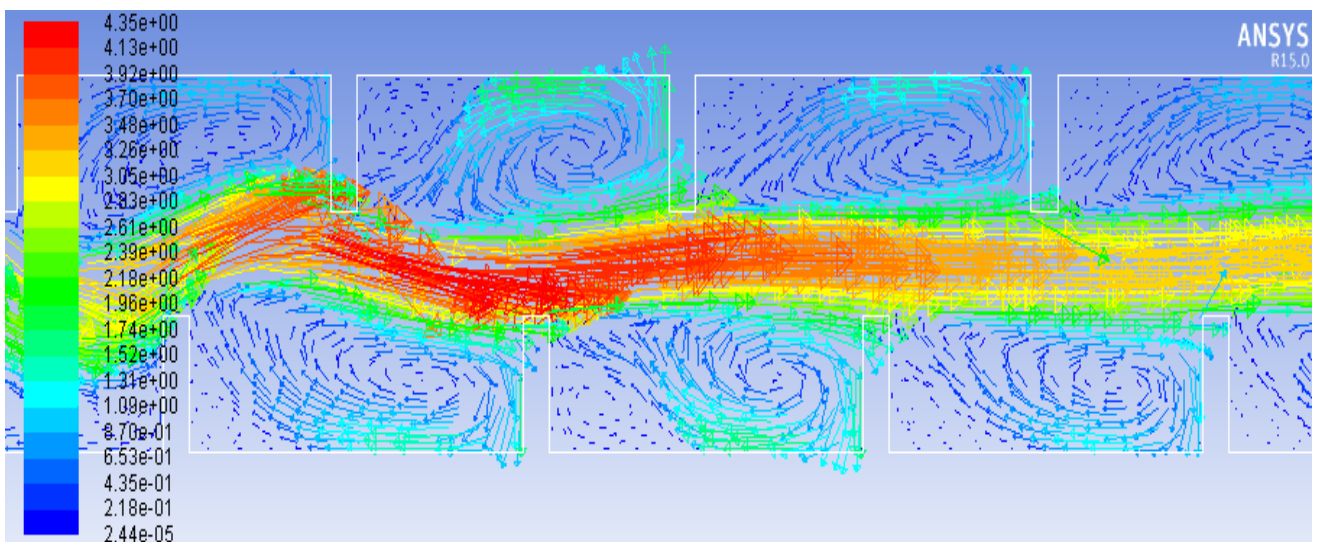


4.10 pav. Greičio kontūras elemente (m/s).



4.11 pav. Greičio kontūras elemente (m/s).

4.9, 4.10 ir 4.11 paveiksluose matoma, kad didėjant atstumui tarp kliūčių pagrindinis fluideo srauto greitis mažėja. Pavyzdžiui, įtekant fluidui 0,8 m/s greičiu į elementą ir pradėdant kisti greičio profiliams, bandant aptekėti pirmą kliūtį, jo greitis pradeda augti, tačiau kuo atstumai tarp kliūčių yra mažesni, tuo srauto greitis mažėja dėl fluideo daleles veikiančios trinties jėgos. 4.9 paveiksle matyti, kad fluidui aptekant pirmą kliūtį jo centrinis greitis išauga, tačiau vėliau dėl nepakankamos fluideo greičio inercijos jėgos ir fluידą veikiančios trinties jėgos daromos įtakos, elemento centrinėje dalyje fluideo greitis nedidėja. 4.10 paveiksle matoma, kad pagrindinio fluideo greitis didėja palengva, tačiau dar neišsilaiko, nes srauto dalelės yra prislopinamos trinties jėgų. 4.11 paveiksle matoma, kad greitis ir atstumai tarp kliūčių yra pakankami išlaikyti vienodą centrinį fluideo greitį.

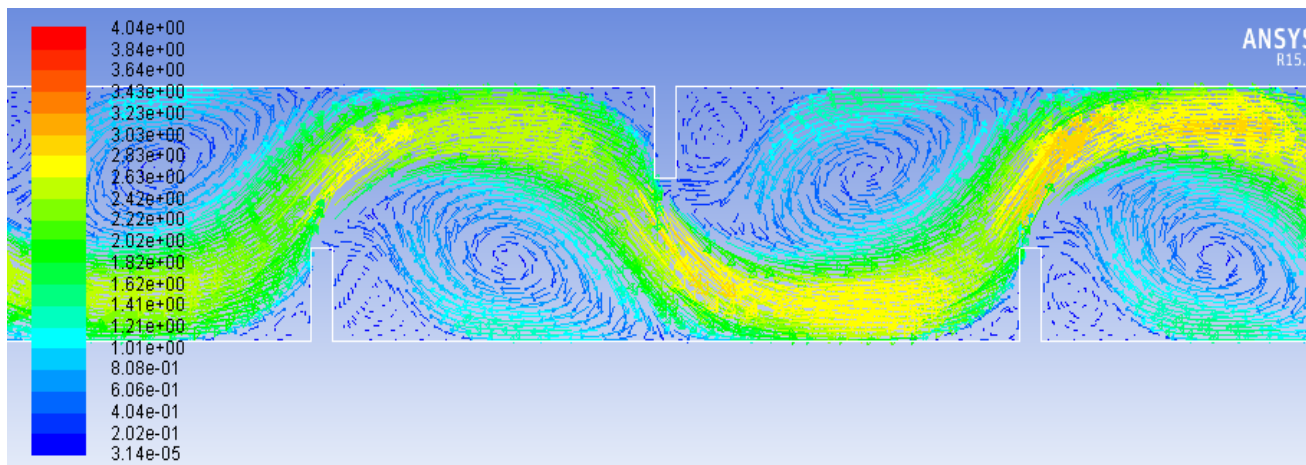


4.12 pav. Greičių vektorių išsidėstymas elemente su 0,08 m atstumu tarp kliūčių (m/s).

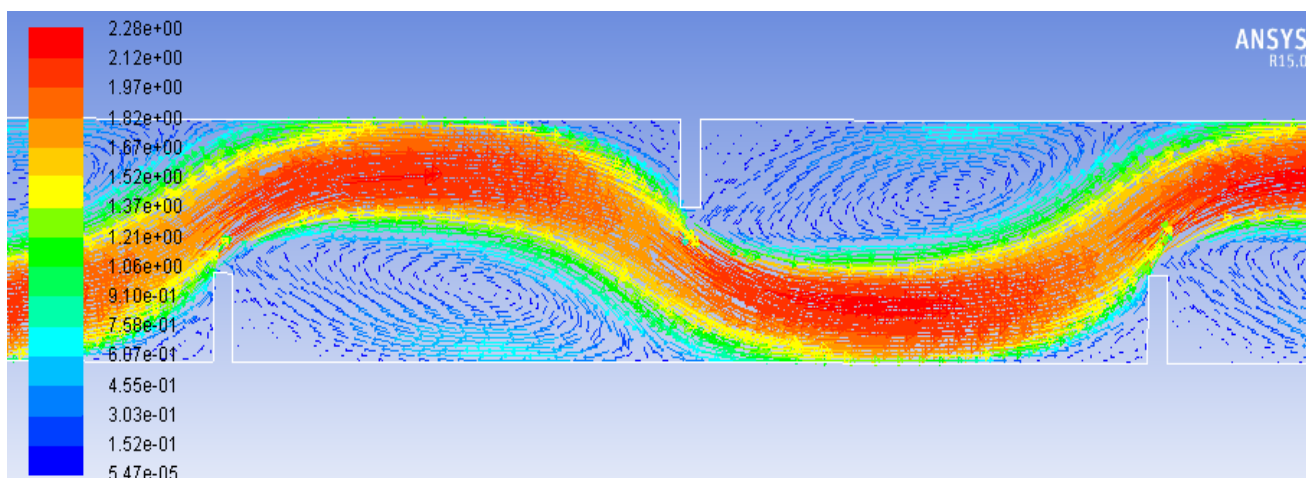
4.12, 4.13 ir 4.14 paveiksluose pavaizduoti greičių vektorių kontūrai skirtinguose kolektoriaus elementuose. Juose matoma, kad prieš ir už kliūčių susidaro recirkuliacinės zonos,

kuriuose sumažėja fluideo greitis bei susidaro sūkuriai. Tolstant nuo kliūties ir susidarant maišymosi sluoksniui, turbulentiškumas fluide didėja, todėl išauga ir šilumos atidavimo procesas.

Prieš kliūtis greitis sumažėja dėl sąveikos tarp sienelės ir fluideo sluoksnių šalia sienelės (fluideo klamos bei trinties į kliūtį) fluidei aptekant kliūtis. Jiems sąveikaujant sluoksniui pristabdomi, todėl greitis sumažėja. Už kliūčių susidaro zonos, kuriuose susiformuoja sūkuriai (4.12, 4.13 ir 4.14 pav.) (susidaro greičio vektoriai priešingos krypties nei pagrindinis srautas).



4.13 pav. Greičių vektorių išsidėstymas elemente su 0,16 m atstumu tarp kliūčių (m/s).

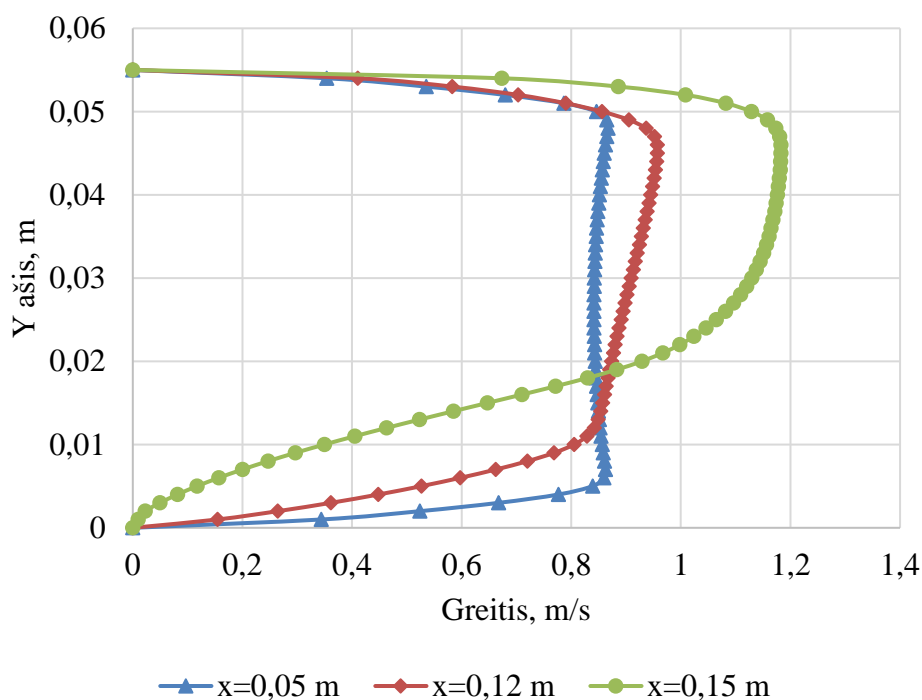


4.14 pav. Greičių vektorių išsidėstymas elemente su 0,24 m atstumu tarp kliūčių (m/s).

Iš 4.9-4.14 paveikslų matoma, kad turbulentiui srautui aptekant kliūtis, susiformuoja vienas pagrindinis cirkuliacijos kontūras. Cirkuliacijos zona didėja, didėjant atstumams tarp kliūčių. Pastebima, kad recirkuliacinės zonos ilgis priklauso nuo srauto tekėjimo greičio bei atstumo tarp kliūčių. Didėjant fluideo tekėjimo greičiui, recirkuliacinės zonos sumažėja ir didinant atstumus tarp kliūčių, jų ilgis taip pat mažėja.

Šalia kliūtis (prieš ir po kliūtis) susiformuoja antras cirkuliacijos kontūras šalia kliūtis sienelių. Šių sukurių dydis yra nepakankamas efektyviai nuvesti šilumai nuo absorberio, todėl tose vietose fluido temperatūra smarkiai išauga bei galimas sienelės perkaitimo procesas.

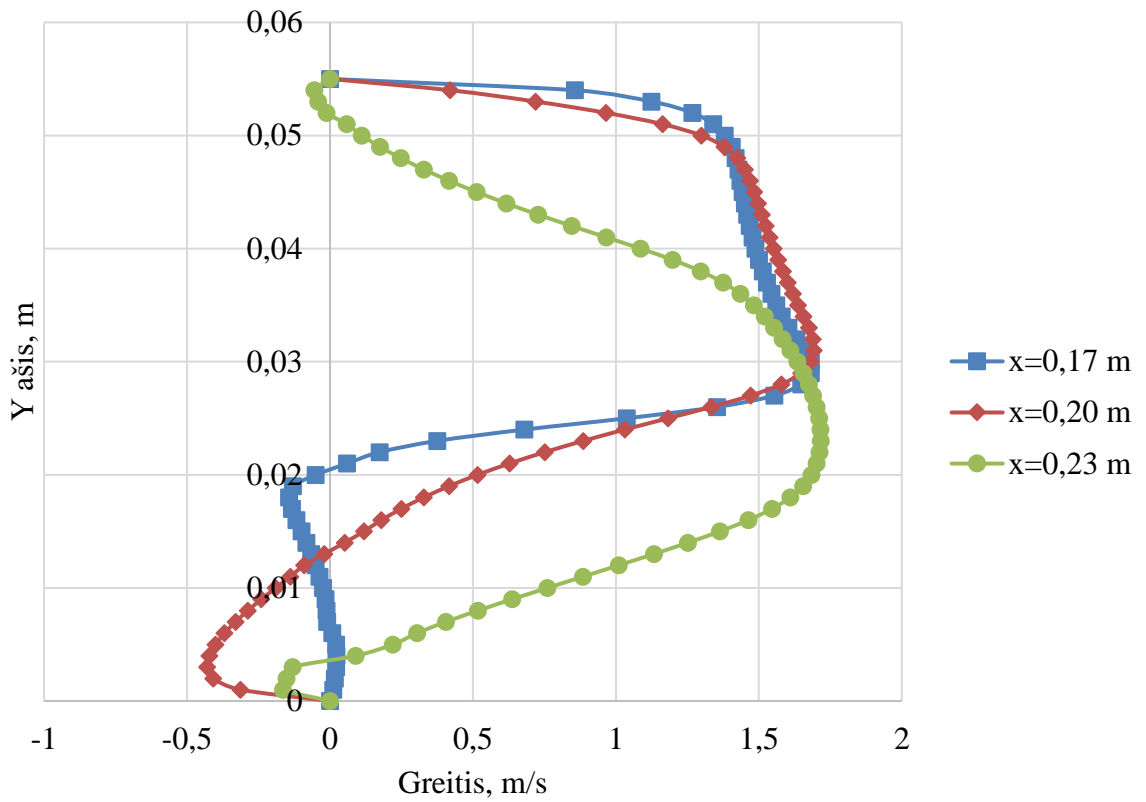
Greičių profiliai prieš pirmąją kliūtį pavaizduoti 4.15 paveiksle. Iš greičių profilio formos galima teigti, kad nagrinėjamuose elementuose srauto tekėjimo pobūdis tikrai yra turbulentinis. Matoma, kaip šio režimo greičių profilis deformuojasi prieš tekant pro pirmąją kliūtį. Greičio profilio deformacija didėja, artėjant fluido srautui prie kliūtis, t.y padidėja fluido greitis virš ar po aptekamos kliūtis priklausant nuo kliūtis išsidėstymo elemente.



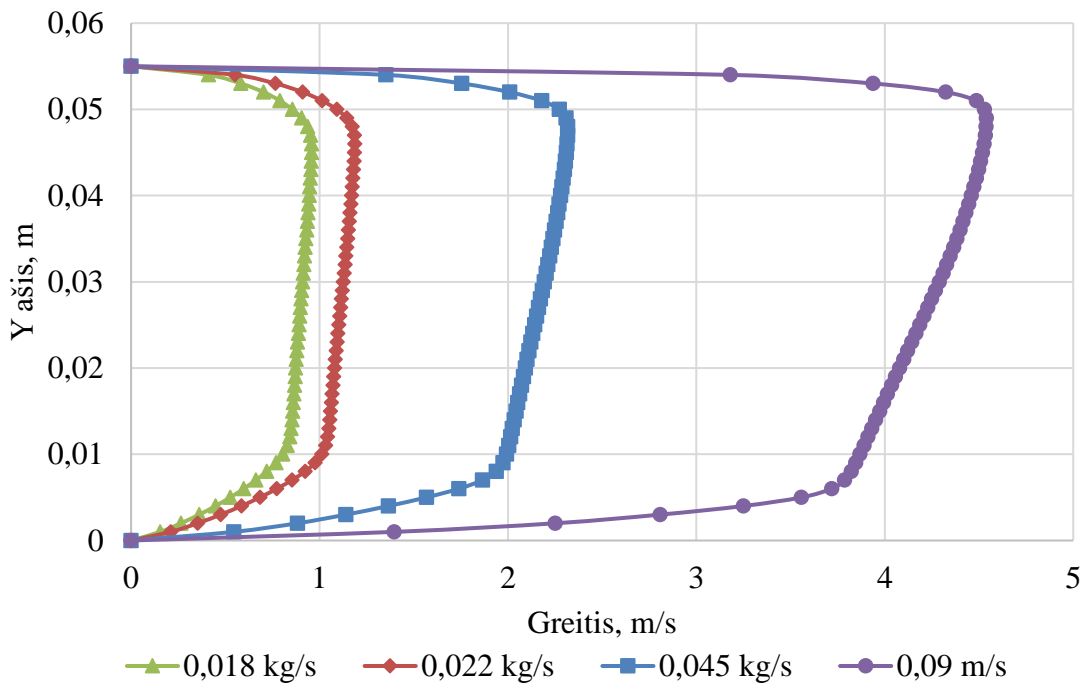
4.15 pav. Greičių profiliai prieš pirmąją kliūtį, srauto pradinis greitis 0,8 m/s.

Greičių profiliai tarp pirmos kliūtis ir antros kliūtis nuo elemento pradžios, atstumu  $x=0,17$ ,  $x=0,20$  ir  $x=0,23$  m, pavaizduoti 4.16 paveiksle. Srautui pratekėjus už kliūtis ( $x=0,17$  m), viršutinėje elemento dalyje susidaro trapecijios formos greičio profilis, o apatinėje dalyje susidaro priešingos krypties srautas recirkuliacinėje fluido zonoje. Ties kita kliūtimi ( $x=0,23$  m) greičio profilis vėl deformuojasi ir srauto greitis sumažėja.

Greičio profilio priklausomybė nuo masinio srauto debito pavaizduota 4.17 ir 4.18 paveiksluose. Juose matoma, kad didėjant srauto masinui debitui didėja ir fluido greitis. 4.17 paveiksle pastebima, kad kuo didesnis srauto greitis, tuo greičiau pasireiškia srauto profilio deformacija prieš kliūtį.

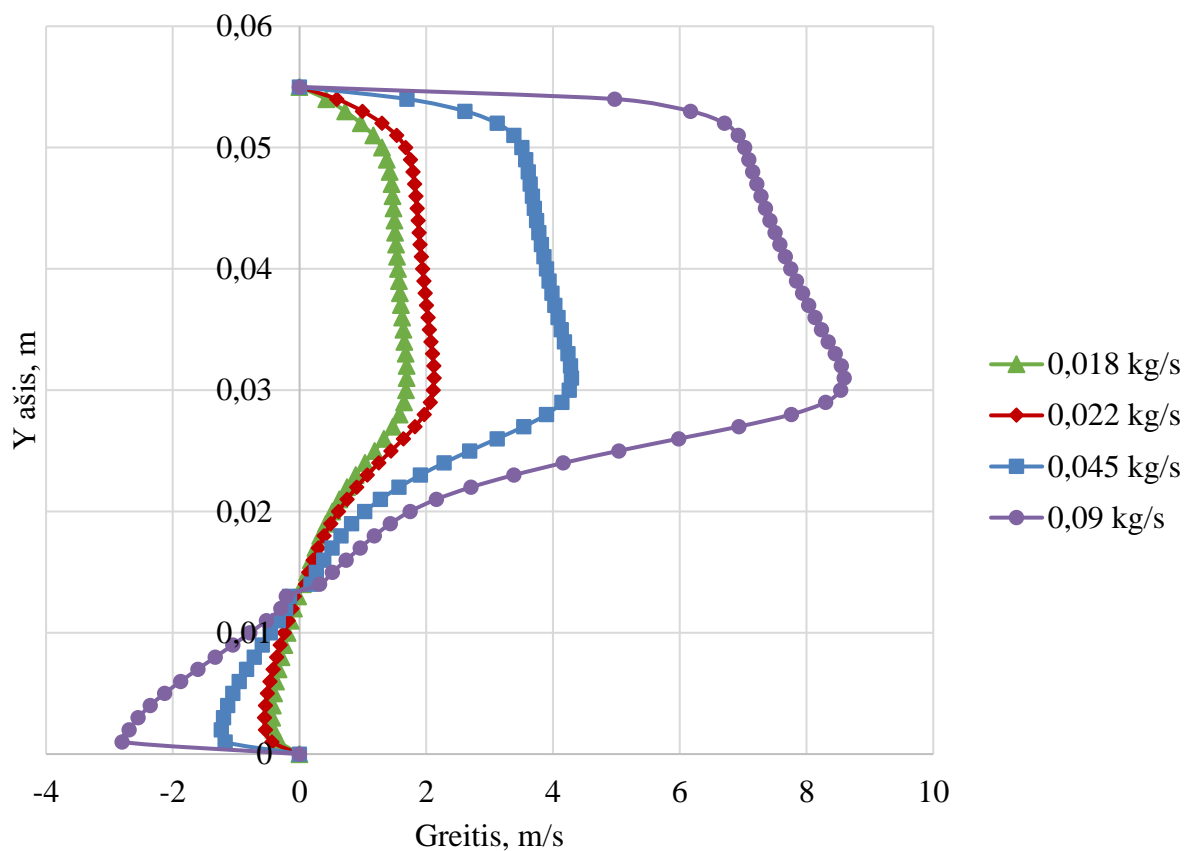


4.16 pav. Greičių profiliai tarp pirmos ir antros kliūtės.



4.17 pav. Greičių profilio priklausomybė nuo srauto masinio debito elemento pradžioje ( $x=0,12$  m).

4.18 paveiksle matoma, kad recirkuliacinėje zonoje susidaręs greičio profilio dydis taip pat priklauso nuo pagrindinio srauto masinio debito. Didėjant masiniui srautui recirkuliacinės zonos srauto greitis taip pat didėja.



4.18 pav. Greičių profilio priklausomybė nuo srauto masinio debito, elemento pradžioje ( $x=0,2$  m)

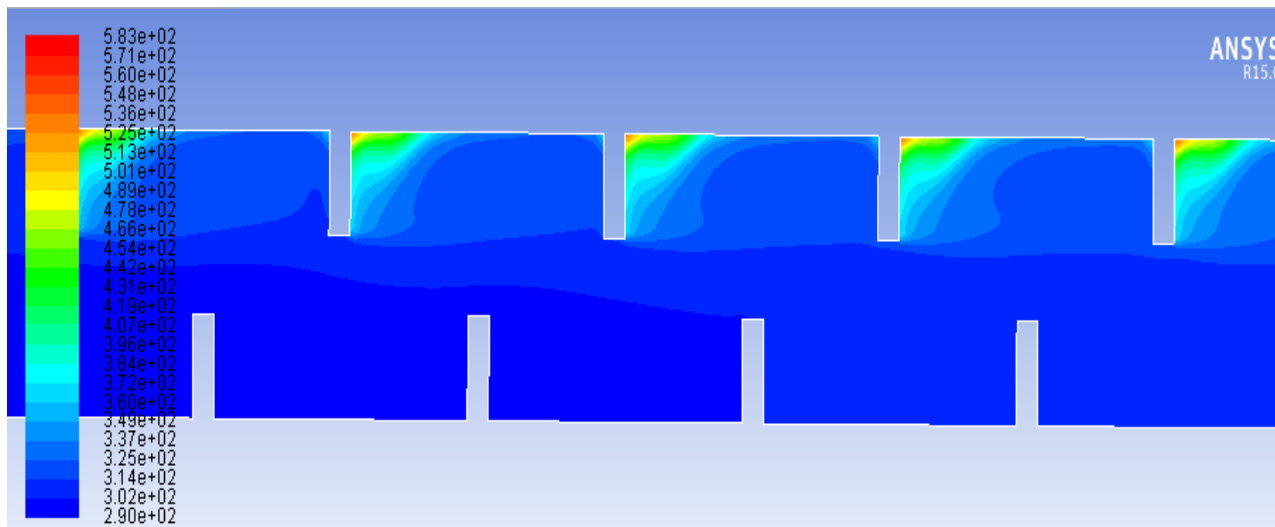
Taigi, recirkuliacinės zonos dydis priklauso nuo masinio debito kiekio bei kliūčių išsidėstymo kolektoriaus elemente. Padidinus srauto greitį, padidėja ir recirkuliacinės zonos ilgis. Recirkuliacinės zonoje dėl mažesnio fluideo greičio turėtų pagerėti šilumos mainai tarp fluideo ir plokštelės paviršiaus, kad patvirtinti šį teiginį, reikia įvertinti ir temperatūrinio lauko pasikeitimus kolektoriuje.

#### 4.2.2 Temperatūrinis laukas

Elemente viršutinė plokštelė (absorberis) su kliūtimis išyla sugėrusios  $800 \text{ W/m}^2$  Saulės intensyvumą. Vykstant šilumos atidavimo procesui tarp sienelės, kliūčių ir tekančio fluideo, jo temperatūra didėja išilgai elemento.

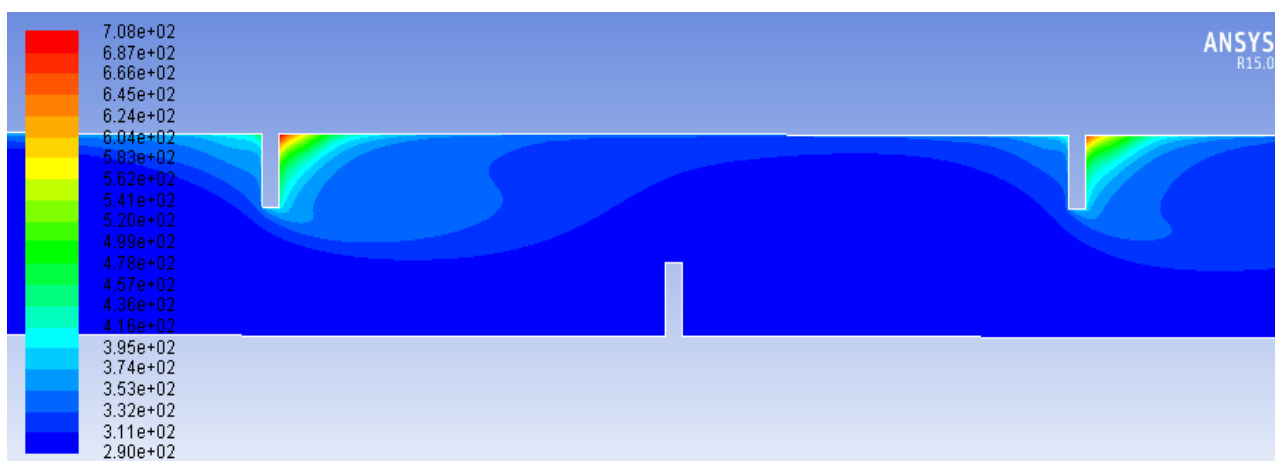
Temperatūros kontūrai elemente pasiskirsto panašiai. 4.19 ir 4.20 paveiksluose pavaizduotas temperatūros kontūras kolektoriaus elemento vidurinėje dalyje. Matoma, kad šalia viršutinių kliūčių susidaro zonos, kuriose temperatūra yra didesnė nei bendra fluideo temperatūra. Tokių jų susidarymui įtaką daro sūkurinių zonų susidarymas šalia kliūčių bei tiekiamas šilumos srautas viršutinei

plokštei. Už kliūčių susidaro zonos, kuriuose fluidas nesugeba efektyviai nuvesti šilumos toje vietoje ir todėl ši į kaista labiau. Ties apatine plokšte tokios temperatūrinės zonos nesusiformuoja, nes apatinė plokštelė izoliuota ir nėra šildoma. Palaispniui šylant fluidui, fluido temperatūra už kliūčių didėja ir temperatūrinis gradientas pradeda kisti visame srauto skerspjūvyje.



4.19 pav. Temperatūros kontūras kolektoriaus elemente su kliūtimis (atstumas tarp kliūčių 0,08 m).

Padidinus srauto masinį debitą temperatūros gradientas sumažėja ir fluido bendra temperatūra padidėja nežymiai. Fluido vidutinės srauto temperatūros priklausomybė nuo masinio srauto debito ir kliūčių išsidėstymo nurodoma 4.4 lentelėje. Matoma, kad didėjant fluido masiniui debitui, fluidas nuveda daugiau šilumos nuo absorberio, todėl jis šyla mažiau. Taip pat didėjant tarpams tarp kliūčių fluido temperatūra mažėja, todėl mažėja ir šiluminiai kolektoriaus nuostoliai.



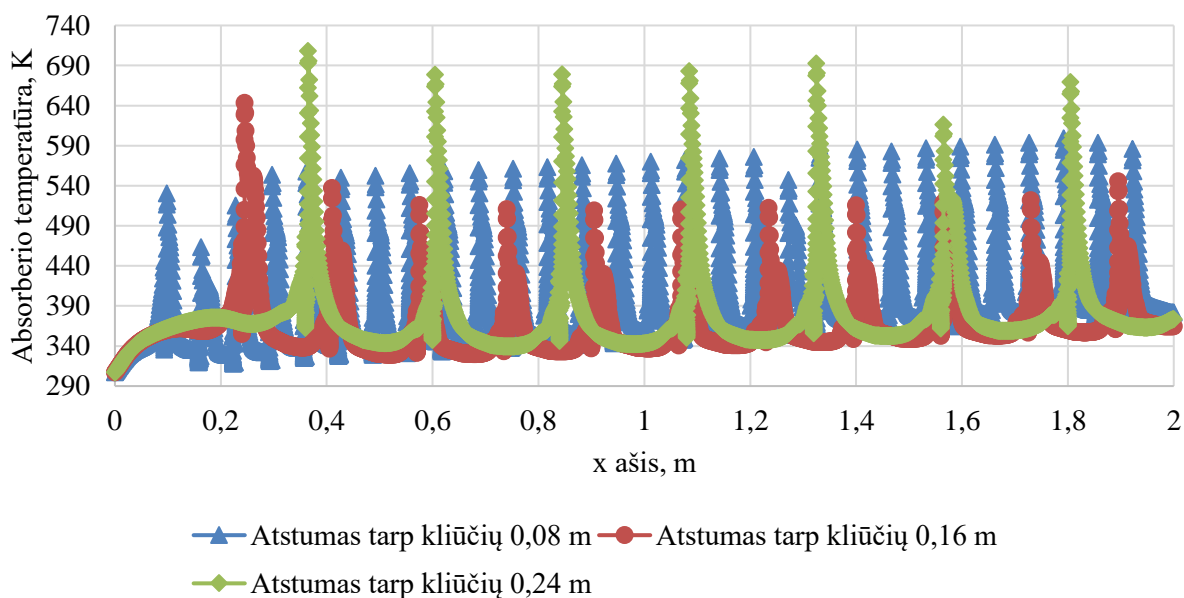
4.20 pav. Temperatūros kontūras (atstumas tarp kliūčių 0,24 m).

Šilumos atidavimo proceso intensyvumą lemia fluido ir sienelės temperatūros. Sienelės (absorberio) temperatūros pasiskirstymas vaizduojamas 4.21 paveiksle. Fluido temperatūra didėja

proporcingai, pridėtų kolektoriaus kliūčių skaičiui (temperatūros šuoliai). Kuo didesnė kolektoriaus temperatūra, tuo didesni ir šiluminiai nuostoliai, todėl esant dideliems srauto debitams kolektoriaus efektyvumas padidėja dėl mažesnės kolektoriaus darbinės temperatūros (4.22 ir 4.23 pav.).

4.3 lentelė. Fluido temperatūros

Atstumas tarp kliūčių, m	Fluido masinis debitas, kg/s	Fluido pradinė temperatūra, K	Fluido vidutinė temperatūra, K
0,08	0,018	290,15	320,61
	0,022		315,5
	0,045		302,74
	0,090		296,55
0,16	0,018	290,15	317,9
	0,022		313,2
	0,045		301,67
	0,090		295,94
0,24	0,018	290,15	314,82
	0,022		310,05
	0,045		300,36
	0,090		294,36

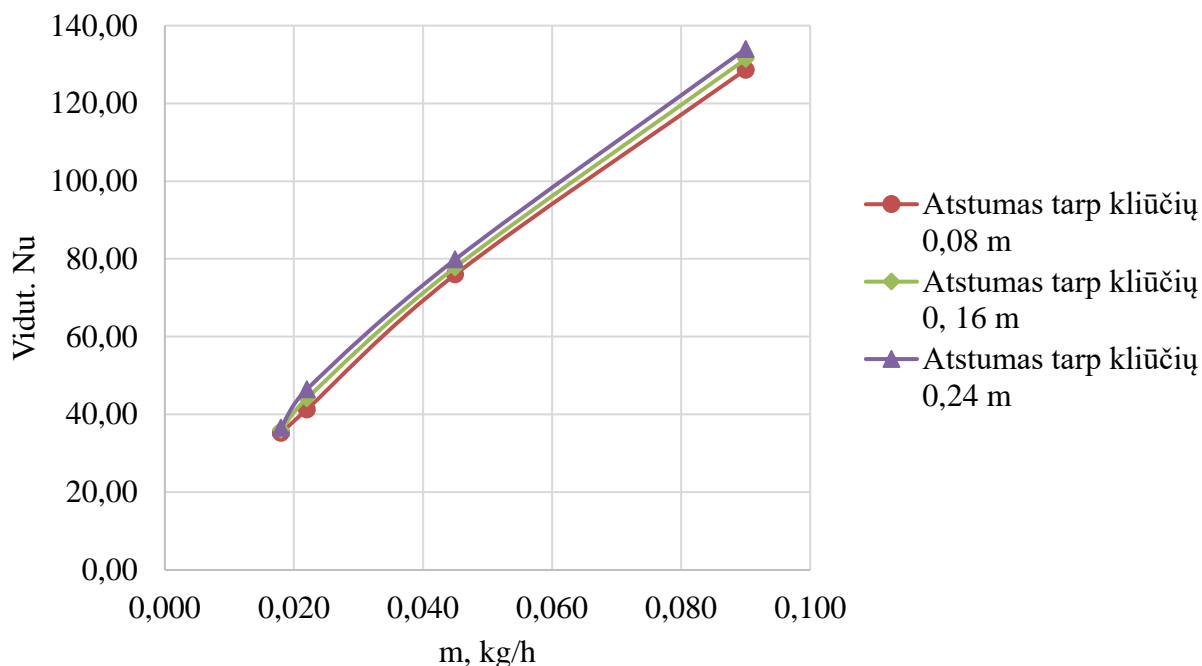


4.21 pav. Absorberio ir kliūčių temperatūros kitimas kolektoriaus elemento ilgyje (fluido greitis 0,8 m/s).



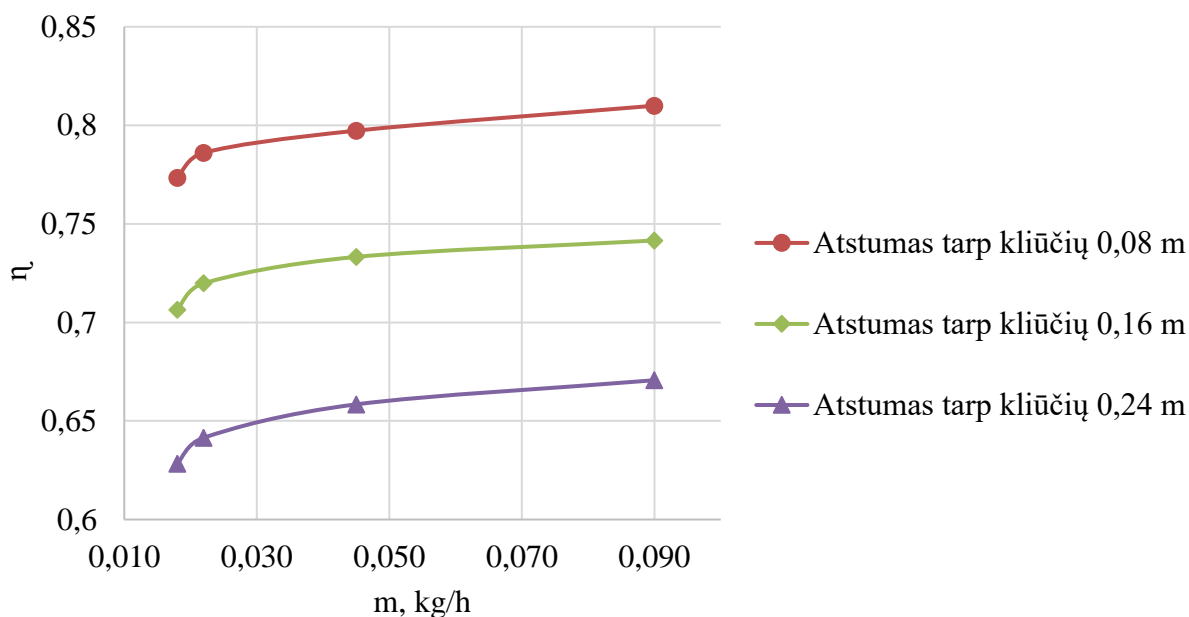
### 4.2.3 Šilumos atidavimo proceso intensyvumas

Šilumos atidavimo proceso (nuo absorberio srautui) intensyvumas nurodomas vidutinio Nuselto priklausomybe nuo srauto masinio debito (4.22 pav.). Matoma, kad didėjant masiniui debitui, didėja šilumos atidavimo proceso intensyvumas. Didinant kolektoriaus elementų kliūčių atstumus Nuselto kriterijus mažėja. Taip atsitinka, nes sumažėja fluideo ir absorberio temperatūros.



4.22 pav. Vidutinio Nuselto priklausomybė nuo masinio debito.

### 4.2.4 Kolektoriaus su kliūtimis efektyvumas



4.23 pav. Kolektorių su kliūtimis efektyvumas.

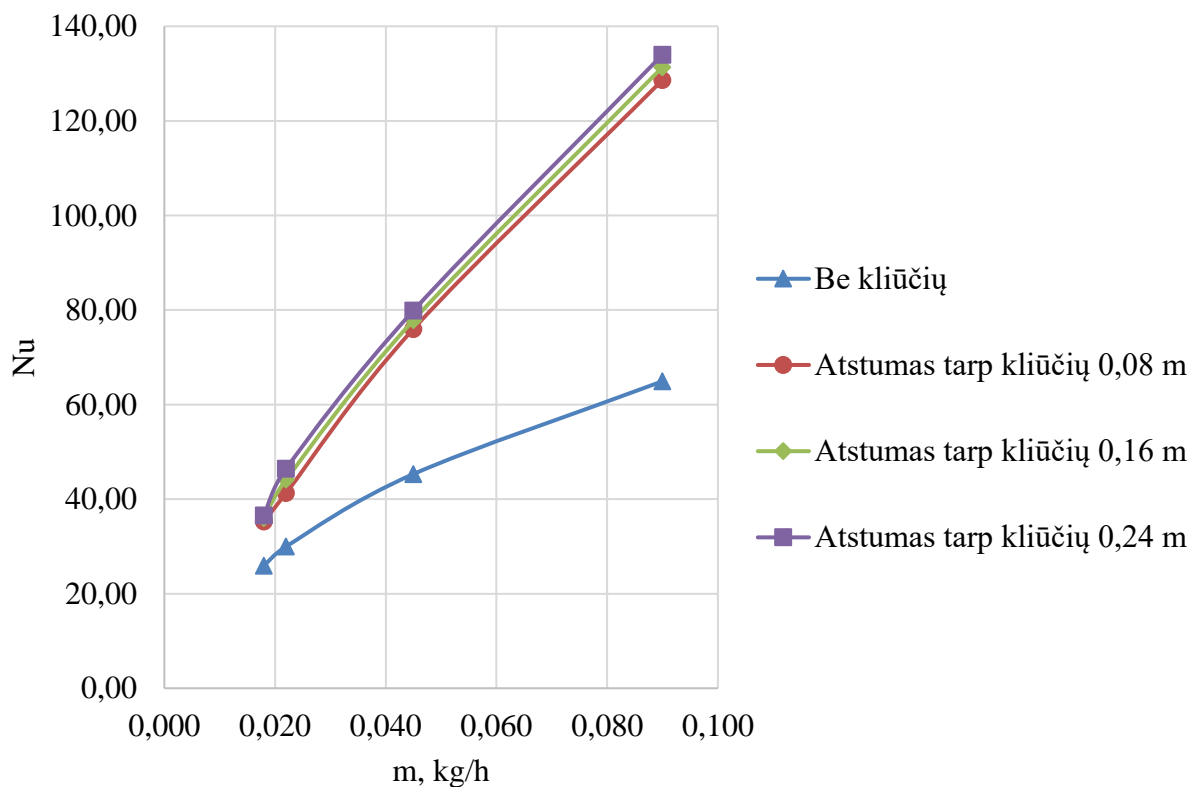
Iš 4.23 paveiksle pateiktų duomenų matoma, kad didėjant masiniam srautui kolektoriaus su kliūtimis efektyvumas didėja. Taip yra todėl, nes suintensyvėja šilumos atidavimo procesas, sumažėjus kolektoriaus elementų temperatūrai bei šiluminiais nuostoliams. Taip pat pastebima, kad didinant masinį srautą kolektoriaus efektyvumas padidėja 0,03. Didėjant atstumui tarp kliūčių, mažėja kolektoriaus efektyvumas, nes esant didesniai atstumui tarp kliūčių didėja kolektoriaus šiluminiai nuostoliai.

#### 4.3 Standartinio ir patobulinto saulės kolektoriaus elementų palyginamoji analizė

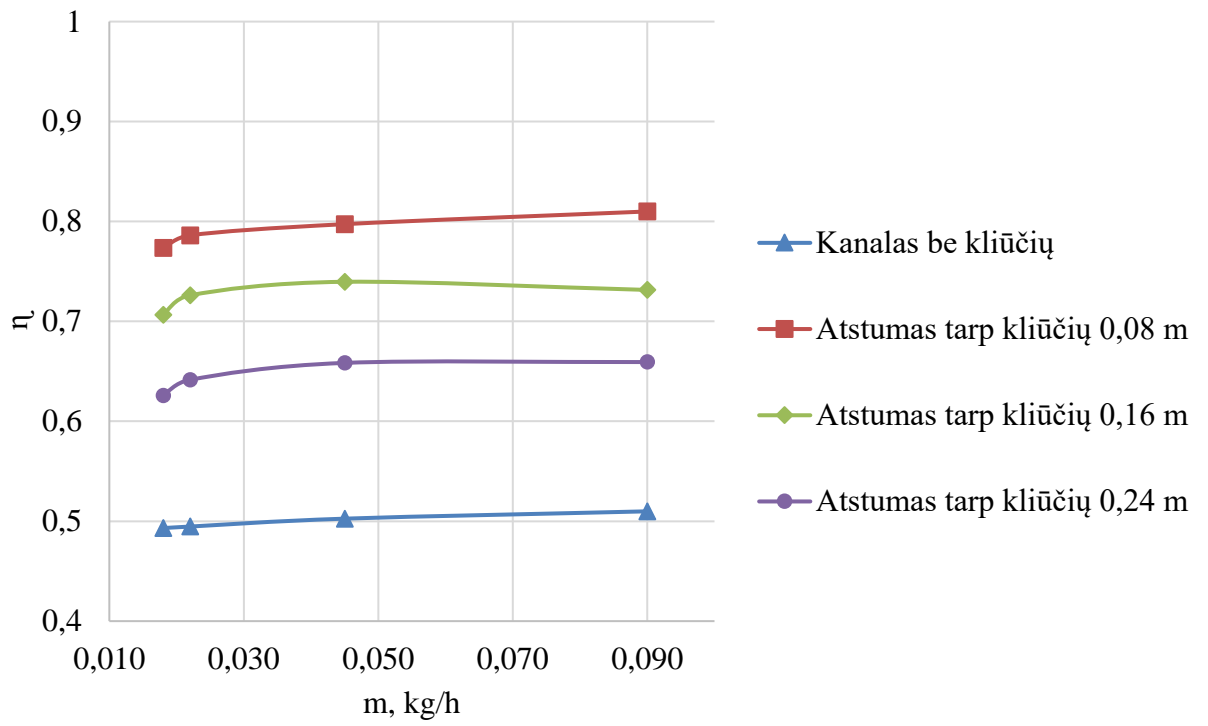
„Galinio srauto“ kolektoriaus elementuose šilumos atidavimo procesas intensyvėja patobulinant jų konstrukciją kliūtimis. Kliūtimis buvo sukurtas intensyvesnis turbulentinis srautas bei sraute sudarytos srauto recirkuliacinės zonos, kuriose pagerėja šilumos nuvedimo procesas nuo absorberio plokštelės.

Lyginant gautus skaitinio modeliavimo rezultatus su standartinės konstrukcijos kolektoriaus elemento modeliavimo duomenimis matoma, kad šilumos atidavimo procesas vyksta 30-50 % sparčiau, kai yra panaudojamos kliūtys (4.25 pav.).

Kolektoriaus be kliūčių ir kolektoriaus su kliūtimis efektyvumas skiriasi 0,15-0,3. Todėl galima teigti, kad šilumos atidavimo proceso intensyvinimo būdas naudojant kliūtis „galinio srauto“ kolektoriuje yra efektyvus būdas pagerinti turimos kolektorinės sistemos efektyvumą.



4.24 pav. Vidutinės Nuselto reikšmės priklausomybė nuo fluideo masinio debito.



4.25 pav. Kolektorių efektyvumas.

## IŠVADOS

Panaudojant ANSYS Fluent programinės įrangos paketą, sudaryti skirtingi šilumos atidavimo proceso skaitinio tyrimo „galinio srauto“ oro kolektoriaus elementų modeliai. Gauti rezultatai parodė, kad:

1. Elemente be kliūčių didinant srauto masinį debitą pagerėja šilumos nuvedimas nuo absorberio sienelės.
2. „Galinio srauto“ oro kolektoriaus elemente su kliūtimis susidaro sūkurinės zonos, kurios pagerina šilumos nuvedimą nuo kaitinamos sienelės (kolektoriaus absorberio). Kuo didesnis atstumas tarp kliūčių tuo šilumos atidavimo procesas vyksta intensyviau.
3. Lyginant standartinės ir patobulintos konstrukcijos elementų šilumos atidavimo proceso intensyvumą pastebima, kad kolektoriaus elementų su kliūtimis šilumos atidavimo procesas pagerėja 30-50 procentų.
4. Tradicinių „galinio srauto“ kolektorių efektyvumas kinta tarp 0,45-0,55 priklausant nuo saulės spinduliuotės intensyvumo ir kitų meteorologinių bei kolektoriaus eksploatavimo sąlygų.
5. Kolektoriaus efektyvumas patobulinus jo konstrukciją kliūtimis padidėjo 15-30 proc., todėl galima teigti, kad toks efektyvumo didinimo būdas yra veiksmingas.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Adomavičius, Vytautas. Alternatyvi energetika darniosios raidos perspektyvoje. Mokslinis seminaras KTU Europos institute [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2017-05-10]. Prieiga per: <http://gjestudija.net/ltma/ltma-darbai/Panesimas-KTU-EI.pdf>
2. Lietuvos Respublikos Vyriausybė. Nutarimas dėl nacionalinės atsinaujinančiųjų energijos išteklių plėtros 2016-2020 metų programa [interaktyvus]. Vilnius [žiūrėta 2017-04-20]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAP/431c897097fa11e5a69681f9674b7edd?positionInSearchResults=8&searchModelUUID=b91b9ddf-bb4d-4369-814d-748b92d2b9be>
3. Lietuvos Respublikos energetikos ministerija. Atsinaujinantys energijos ištekliai [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-01]. Prieiga per: <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/atsinaujinantys-energijos-istekliai>
4. Europos komisija [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-05-0121]. Prieiga per <http://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/sankey.html?geo=LT&year=2015&unit=KTOE&fuels=0000&highlight=&nodeDisagg=0101000000&flowDisagg=true#0>
5. Kytra, Stasys. Atsinaujinantys energijos šaltiniai: vadovėlis aukštosioms mokykloms. Kaunas: Technologija, 2006. ISBN 9955-25-159-X.
6. European Solar Thermal Industry Federation [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-05-05]. Prieiga per [http://www.estif.org/publications/statistics/st\\_markets\\_in\\_europe\\_2015/](http://www.estif.org/publications/statistics/st_markets_in_europe_2015/)
7. Lietuvos saulės energetikos asociacija. Saulės energijos ištekliai [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-05]. Prieiga per: <http://www.lsea.lt/saules-energijos-istekliai>
8. Lietuvos šilumos tiekėjų asociacija. Milutienė, E. Saulės energijos naudojimas ir perspektyvos [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017-03-05]. Prieiga per: [http://www.lsta.lt/files/seminarai/121026\\_KTU%20konf/05\\_Saules%20energijos%20pa-naudojimas%20ir%20perspektyvos%20%28E.Milutiene%29.pdf](http://www.lsta.lt/files/seminarai/121026_KTU%20konf/05_Saules%20energijos%20pa-naudojimas%20ir%20perspektyvos%20%28E.Milutiene%29.pdf)
9. Adomavičius, V., Petrauskas G. Saulės energijos naudojimas elektrai gaminti [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2012. [žiūrėta 2017-03-06]. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/999/saules-energijos-naudojimas-elektrai-gaminti/>
10. Adomavičius, V. Mažosios atsinaujinančių išteklių energijos sistemos. Kaunas: Technologija, 2013. ISBN 978-609-02-0945-5.
11. Šuri, M., Photovoltaic Geographical Information System [interaktyvus]. 2017 [žiūrėta 2017-03-15]. Prieiga per: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>
12. Lietuvos Respublikos Valstybės Kontrolė. Valstybinio audito atsinaujinančių energijos išteklių potencialo naudojimas Lietuvoje. Nr. VA-P-20-2-1 [interaktyvus]. Vilnius [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per: [www.vkontrole.lt](http://www.vkontrole.lt)

13. Jesko, Žanis. Classification of solar collectors. [interaktyvus]. Jelgala [žiūrėta 2017-04-29]. Prieiga per: <http://connection.ebscohost.com/c/articles/35589797/classification-solar-collectors>
14. VŠĮ Energetikų mokymo centras. Atsinaujinančių energetikos saulės išteklių naudojimas elektros gamybai [interaktyvus]. Vilnius [žiūrėta 2017-04-20]. Prieiga per: [http://energinisefektyvumas.lt/wp-content/uploads/2016/02/2\\_Renewable-energy-resources\\_photovoltaic-power-station\\_exploitation.pdf](http://energinisefektyvumas.lt/wp-content/uploads/2016/02/2_Renewable-energy-resources_photovoltaic-power-station_exploitation.pdf)
15. BETA. Daugiabučių namų modernizavimo (atnaujinimo) programa ekonominiu, energetiniu-inžineriniu bei teisiniu požiūriu. Seminaras. 2017 balandis, Joniškis.
16. Soteris A. Kaligirou. Solar thermal collectors and applications. [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2017-04-20]. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/222569979\\_Solar\\_Thermal\\_Collectors\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/222569979_Solar_Thermal_Collectors_and_Applications)
17. The Renewable Energy Hub site [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2017-05-03]. Prieiga per: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/solar-thermal-information/the-different-types-of-solar-thermal-panel-collectors.html>
18. Nancy W. Harnessing solar energy. 201 [žiūrėta 2017-04-03]. Prieiga per: <http://energy.mit.edu/news/harnessing-solar-energy/>
19. Paltaja. Plokštieji saulės kolektoriai [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017-05-08]. Prieiga per: <http://www.paltaja.lt/iranga/saules-kolektoriai/plokstieji-saules-kolektoriai>
20. Encyclopedia of alternative energy [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2017-04-20]. Prieiga per: [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE\\_air\\_collector.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_air_collector.html)
21. Stonehaven. Comparing Solar Air Heater Designs. [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2017-05-07]. Prieiga per <http://stonehavenlife.com/comparing-solar-air-heater-designs-performance/>
22. Fan J., Furbo S. Buoyancy effects on thermal behavior of a flat-plate solar collector. Solar [interaktyvus]. 2000 [žiūrėta 2017-05-07]. Prieiga per: <http://solarenergyengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1474097>
23. Sandhu G., Siddiqui K. Investigation of the fluid temperature field inside a flat-plate solar collector. Heat Mass Transfer, 50 (2014), p. 1499–1514.
24. Sandhu G., Siddiqui K., Garcia A. Experimental study on the combined effects of inclination angle and insert devices on the performance of a flat-plate solar collector. [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2017-05-08]. Prieiga per <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=2393&context=etd>

25. Gunnewiek L. Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired solar collectors. Solar Energy [interaktyvus]. 2001 [žiūrėta 2017-04-10]. Prieiga per: <http://amet-me.mnsu.edu/userfilesshared/solarwall/Technical Papers and Documents/Transpired Wall/Effect of Wind on Flow Distribution in Unglazed Transpired-Plate Collectors - L. H. Gunnewiek, K. G. T. Hollands, E Brundrett.pdf>
26. Shuilan Li, Hui WANG, Xiangrui Meng, Xinli Wei. Comparative study on the performance of a new solar air collector with different surface shapes. Applied Thermal Engineering 114. – China, 2017. p. 639-644.
27. Nayak R. K., Singh S. N. Effect of geometrical aspects on the performance of jet plate solar air heater. Solar Energy 137. – India, 2016. p. 434-440.
28. Saini R. P., Verma J. Heat transfer and friction factor correlations for a duct having dimple-shape artificial roughness for solar air heaters. Energy 33. – India, 2008. p. 1277-1287.
29. Rachid S., Abboudi S., Boumediene B. Numerical simulation of turbulent forced convection in solar collector provided with thickness baffles and fins. International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer. – Morocco, 2008. p. 379-393.
30. Busedra A. ir Soliman H. M. Analysis of laminar mixed convection in inclined semicircular ducts under buoyancy-assisted and-opposed conditions. Heat Transfer [interaktyvus]. 1999 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/104077899274660>
31. Salas ir kiti. Experimental study on the performance of thermosiphon solar water heater in Arequipa, Peru. International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: [http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/42879/salas\\_experimental\\_2014.pdf?sequence=1](http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/42879/salas_experimental_2014.pdf?sequence=1)
32. Benderradji A., et al. Characterization of fluid flow patterns and heat transfer in horizontal channel mixed convection [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/236015517>
33. Eryener D. ir Akhan H. Theoretical and experimental investigation of perforated solar air collector coupled to a capillary radiant heating system. International Conference on Heat Transfer [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: [http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/44778/Eryener\\_Theoretical\\_2014.pdf?sequence=1](http://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/44778/Eryener_Theoretical_2014.pdf?sequence=1)

34. Saim R., Abiboudi S. Numerical simulation of turbulent forces convection in solar collector provided with thickness baffles and fins [interaktyvus]. 2008 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4294719/>
35. Vijayakumar S., Vinoth R., Abilash K., Praveen P. Enhancement of Heat Transfer Rate in a Solar Flat Plate Collector Using Twisted Tapes and Wire Coiled Tabulators. [interaktyvus]. 4[žiūrėta 2017-04-12]. Prieiga per: <http://waset.org/publications/9998927/enhancement-of-heat-transfer-rate-in-a-solar-flat-plate-collector-using-twisted-tapes-and-wire-coiled-turbulators>
36. Manco ir kiti. Study of water forced convection in a rectangular channel with different shape ribs. International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: <https://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/40633.pdf>
37. Soteris A., Kalogirou. Solar thermal collectors and applications [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128504000103>
38. ANSYS Fluent Theory Guide [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2017-04-17]. Prieiga per: <https://uiuc-cse.github.io/me498cm-fa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf>
39. Milenskis V. Bendroji šiluminė technika. Vilnius: Mintis, 1974.
40. Liutikas N., Gudzinskas J. Termohidromechanika. Kaunas: Technologija, 2001. ISBN 9955-09-050-2
41. ANSYS Fluent. Determining Turbulent Parameters [interaktyvus]. 2006 [žiūrėta 2017-05-10]. Prieiga per: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node217.htm>
42. Gimbutis G. Šiluminė technika. Vilnius: Mokslas, 1993. ISBN 5-420-00751-7.
43. Alta Z., Atmaca I. ir kiti. Theoretical and experimental investigation of the performance of back-pass solar air heater. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. – Turkey, 2014. p.293-307.