



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

**Liutauras Vasiliauskas**

**ABWR MODIFIKUOTOS KURO RINKLĖS GEOMETRINIŲ  
CHARAKTERISTIKŲ ĮTAKOS TERMOHIDRAULINIAMS  
PROCESAMS SKAITINIS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Lekt. dr. Linas Paukštaitis

**KAUNAS, 2016**

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

**ABWR MODIFIKUOTOS KURO RINKLĖS GEOMETRINIŲ  
CHARAKTERISTIKŲ ĮTAKOS TERMOHIDRAULINIAMS  
PROCESAMS SKAITINIS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
**Branduolinė energetika (kodas 621E32001)**

**Vadovas**

(parašas) lekt. dr. Linas Paukštaitis  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) prof. habil. dr. Jonas Gylys  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Liutauras Vasiliauskas  
(data)

**KAUNAS, 2016**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

**Liutauras Vasiliauskas**

(Studento vardas, pavardė)

**Branduolinė energetika, 621E32001**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„ABWR modifikuotos kuro rinklės geometriinių charakteristikų įtakos termohidrauliniams procesams skaitinis tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 16 m. \_\_\_\_\_ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Liutauro Vasiliausko**, baigiamasis projektas tema „ABWR modifikuotos kuro rinklės geometriinių charakteristikų įtakos termohidrauliniams procesams skaitinis tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nėra 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)

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

**Tvirtinu:**  
Šilumos ir atomo energetikos  
katedros vedėjas

\_\_\_\_\_  
*(parašas, data)*  
**Doc. E. Puidas**  
\_\_\_\_\_  
*(vardas, pavardė)*

**UNIVERSITETINIŲ ANTROSIOS PAKOPOS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO  
UŽDUOTIS  
Studijų programa BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**

Universitetinių antrosios pakopos studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis projektas yra taikomojo arba tiriamojo pobūdžio projektas. Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo projektu studentas parodo, kad yra sukaupęs pakankamai žinių, turi pakankamai gebėjimų ir nemažą pasirinktos studijų krypties analitinio ar projektavimo darbo patirtį. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, išmano socialinės ir komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir jų analizės, projektavimo ir inžinerinės analizės, informacinių technologijų naudojimo ir rašytinio bendravimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, giliai suvokia nagrinėjamą temą, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: ABWR modifikuotos kuro rinklės geometrinių charakteristikų įtakos termohidrauliniams procesams skaitinis tyrimas. ....

Patvirtinta 2016 m. gegužės mėn. 03d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-7 .....

2. Darbo tikslas: Išanalizuoti skirtingų konstrukcijų distancinių gardelių įtaką termohidrauliniams procesams kuro rinklėje, pateikti išvadas ir apibendrinti gautus rezultatus.....

3. Darbo struktūra: Įvadas, literatūros analizė, kuro rinklės skaitinis modeliavimas, rezultatų analizė, išvados, literatūros sąrašas, priedai. ....

4. Reikalavimai ir sąlygos: Darbas turi atitikti magistro baigiamojo darbo metodinių nurodymų reikalavimus .....

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2016 m. gegužės mėn. 24 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui Liutaurui Vasiliauskui.....  
Užduotį gavau : Liutauras Vasiliauskas ..... 2016.02.01  
*(studento vardas, pavardė)* *(parašas)* *(data)*

Vadovas lekt. dr. Linas Paukštaitis ..... 2016.02.01  
*(pareigos, vardas, pavardė)* *(parašas)* *(data)*

Vasiliauskas, Liutauras. *ABWR modifikuotos kuro rinklės geometrinių charakteristikų įtakos termohidrauliniams procesams skaitinis tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Linas Paukštaitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.*

Studijų kryptis: Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: Skaitinis modeliavimas, distancinė gardelė, termohidrauliniai procesai, sraigtiniai srauto maišymo elementai, kuro rinklė

Kaunas, 2016. 82 p.

## SANTRAUKA

*Darbe buvo aptarta GE14 kuro rinklės konstrukcija, svarbiausi dvifazių vandens-garo srautų termohidrauliniai parametrai ir procesai, išnagrinėtos kitos tiriamos distancinių gardelių konstrukcijos ir išanalizuoti kitų panašių tyrimų rezultatai.*

*Po to SolidWorks aplinkoje buvo sukurtos trys modifikuotos distancinių gardelių konstrukcijos su skirtingų tipų sraigtiniais maišymo elementais. Šie modeliai buvo perkelti į ANSYS CFX aplinką, tuomet sukurti baigtinių tūrių tinkeliai ir aprašytos realios kraštinės sąlygos, parinkti dvifazių srautų homogeninis bei k-epsilon turbulencinis modeliai, galiausiai atliktas šių konstrukcijų skaitinis modeliavimas. Siekiant įvertinti maišymo elementų įtaką termohidrauliniams procesams bei nustatyti šilumos atidavimo koeficiento pagerinimo veiksmingumą, gauti rezultatai buvo lyginami su realios konstrukcijos atskaitos modelio gardelės be maišymo elementų duomenimis.*

*Didžiausias dėmesys darbe buvo skiriamas turbulencijos procesams, skersiniams fluido srautams, šilumos atidavimo koeficiento kitimui bei slėgio nuostoliams kanale. Išanalizavus gautus rezultatus, buvo nustatytas optimaliausias distancinės gardelės modelis ir, siekiant įvertinti jos naudą praktikoje pagal šilumos atidavimo koeficiento padidėjimą, atitinkamai buvo padidintas šilumos srauto tankis kanale ir atliktas skaitinis tyrimas visame kuro rinklės aukštyje. Gauti rezultatai buvo palyginti su atskaitos modeliu, ir tuomet pateiktos atitinkamos išvados.*

Vasiliauskas, Liutauras. *Computational Analysis of Geometric Characteristics on Thermohydraulic Processes of ABWR Reactor Modified Fuel Assembly: Master's final project / supervisor lect. dr. Linas Paukštaitis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.*

Studies area: Energy engineering

Key words: CFD simulation, spacer grid, thermal-hydraulic processes, helix flow mixing devices, fuel assembly

Kaunas, 2016. 82 p.

## SUMMARY

*In this final project it were discussed about GE14 nuclear fuel assembly design components, main two phases flows of water and steam thermal-hydraulic processes and parameters, also examined other studied spacer grid designs and analyzed results of other similar researches.*

*And then it were created three spacer grid designs in SolidWorks with different types of helix flow mixing devices. These geometries were uploaded to ANSYS CFX, then finite element meshes were generated and after setting correct boundary conditions to domains with homogeneous flow and k-epsilon turbulence models, the CFD simulations were made. To evaluate the effect of mixing devices to thermal-hydraulic processes, the obtained results were compared to data of reference model without mixing devices.*

*In this work the focus was on investigating turbulence processes, cross flow effects, heat transfer coefficient variation and pressure drops in fuel channel of different modified constructions. After analyzing the results the most optimal construction was found and to evaluate its benefits in practical use, according to heat transfer coefficient enhancement heat flux in channel was increased and then CFD simulation of full length fuel assembly was made. The results were also compared to reference model and then appropriate conclusions were made.*

## TURINYS

SANTRUMPŲ LENTELE.....	8
ĮVADAS.....	9
1. LITERATŪROS ANALIZĖ .....	10
1.1. GE14 branduolinio kuro rinklė .....	10
1.1.1. Kuro strypai.....	10
1.1.2. Vandens strypai .....	12
1.1.3. Apatinė jungiančioji plokštė su nuosėdų filtru.....	12
1.1.4. Viršutinė jungiančioji plokštė .....	12
1.1.5. Kuro kanalas.....	13
1.1.6. Distancinės gardelės .....	13
1.1.7. Kreipiančiosios spyruoklės .....	14
1.2. Dvifazio vandens garo srauto termohidrauliniai parametrai .....	14
1.2.1. Turbulencija .....	15
1.2.2. Konveciniai šilumos mainai .....	17
1.2.3. Kritinis šilumos srauto tankis .....	20
1.3. Distancinių gardelių konstrukcijos ir tyrimų analizė .....	23
1.3.1. Distancinės gardelės su maišymo elementais.....	24
1.3.2. Distancinių gardelių įtakos termohidrauliniams procesams tyrimų analizė.....	27
2. KURO RINKLĖS SKAITINIS MODELIAVIMAS .....	35
2.1. Kuro rinklės trimatis modelis SolidWorks aplinkoje.....	35
2.1.1. Atskaitos modelio distancinė gardelė.....	37
2.1.2. Modifikuotos konstrukcijos distancinės gardelės .....	38
2.2. ANSYS CFX matematiniai modeliai .....	40
2.2.1. Daugiafazių srautų teorija .....	41
2.2.2. Daugiafazių srautų homogeninis modelis .....	41
2.2.3. Transportavimo lygtys.....	42
2.2.4. Turbulentiniai modeliai .....	43
2.2.5. Dviejų lygčių $k-\epsilon$ turbulencinis modelis .....	44
2.3. Baigtinių tūrių tinklelis.....	45
2.4. Kraštinės sąlygos.....	48
3. REZULTATŲ ANALIZĖ.....	50
IŠVADOS.....	71
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	72
PRIEDAI.....	75
1 Priedas. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas tarpkanalinėje erdvėje, esant skirtingoms distancinių gardelių konstrukcijoms.....	75
2 Priedas. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas skirtingų konstrukcijų kuro rinklėse, srautui pratekėjus 1, 4, 10 ir 20 Dh. ....	79
3 Priedas. Slėgio nuostolių grafikas kuro rinklės antrame ketvirtyje tarpe tarp kuro strypų. ....	83

## SANTRUMPŲ LENTELE

CHF	Critical heat flux	Kritinis šilumos srauto tankis
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor	Pažangusis verdančiojo vandens reaktorius
BWR	Boiling Water Reactor	Verdančiojo vandens reaktorius
PWR	Pressurized Water Reactor	Suslėgto vandens reaktorius
LOCA	Loss Of Coolant Accident	Šilumnešio netekimo avarija
Pav.	-	Paveikslas
Žr.	-	Žiūrėti
p.	Pages	Puslapiai
CFD	Computational Fluid Dynamics	Fluidų dinamikos skaičiuojamoji programa
GE	General Electric	GE kompanija
WHTC	Wall Heat Transfer Coefficient	Šilumos atidavimo koeficientas
DNB	Departure from Nucleate Boiling	Virimo krizė
SSVF	Small scale vortex flow	Mažo mastelio sūkurių srautas
LSVF	Large scale vortex flow	Didelio mastelio sūkurių srautas
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes	Reinoldso suvidurkintos Navje-Stokso lygtys
SV	Split Vane	Srauto perskėlimo tipo maišymo mentės
HV	Hybrid Vane	Hibridinio tipo maišymo mentės
SWV	Swirl Vane	Sūkurinio tipo maišymo mentės
TV	Twisted Vane	Pasukto tipo maišymo mentės
P	Pitch	Atstumas tarp kuro strypų centrų
P/D	Pitch to diameter ratio	Atstumo tarp kuro strypų centrų ir kuro strypų skersmens santykis
Dh	Hydraulic diameter	Hidraulinis skersmuo



## IVADAS

Didėjant energijos poreikiams pasaulyje ir siekiant sumažinti šiltnamio efektą, vis didesnis dėmesys tenka atominei energetikai, ir dėl to įvairiais būdais yra stengiamasi padidinti jėgainių našumą ir saugumą. Vienas iš būdų yra branduolinio kuro rinklių konstrukcijų modifikavimas, siekiant gauti geresnes termohidraulines charakteristikas. Branduolinio kuro rinklėse vykstantys termohidrauliniai procesai užima svarbią vietą jų projektavime, eksploatacijoje ir optimizavime, todėl yra svarbu juos suprasti ir mokėti analizuoti. Esminė kuro rinklės konstrukcijos komponentė yra distancinė gardelė, ji ne tik atlieka kuro strypų sutvirtinimo funkciją, bet ir gali pagerinti termohidraulinių procesų charakteristikas kuro kanale. Dėl šios priežasties mokslininkai visame pasaulyje atlieka įvairius tyrimus ir stengiasi atrasti optimaliausią distancinės gardelės konstrukciją, kuri galėtų padidinti bendrą kuro rinklės efektyvumą. Siekiant įvertinti modifikuotų konstrukcijų veiksmingumą, yra būtina atlikti termohidraulinius bandymus, tačiau, kadangi jie yra brangūs ir užima daug laiko, pirmiausia yra atliekami skaitinio modeliavimo tyrimai.

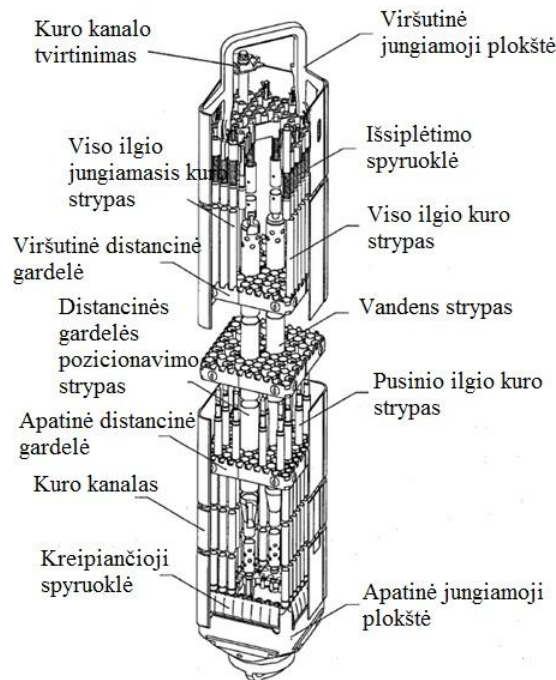
Šis magistro baigiamasis projektas yra bakalauro darbo, kurio tema yra branduolinio kuro rinklės GE14 termohidrodinaminių procesų analizė ANSYS programų paketo aplinkoje, tęsinys, ir jame tirta konstrukcija buvo pasirinkta kaip atskaitos modelis. Šiame darbe skaitinio modeliavimo metodu buvo tiriama trijų modifikuotų distancinių gardelių konstrukcijų įtaka termohidrauliniams procesams kuro kanale, o rezultatai buvo lyginami su atskaitos modeliu. Didžiausias dėmesys buvo skiriamas distancinių gardelių gebėjimui išmaišyti šilumnešio srautą, taip suaktyvinant energijos ir masės mainus kanale bei pagerinant konvekcinių šilumos mainų charakteristikas. Taip pat buvo atsižvelgiama į kanalo slėgio nuostolius, kuriuos papildomai sukuria modifikuotos konstrukcijos. Išanalizavus gautus rezultatus, buvo nustatytas optimaliausias distancinės gardelės modelis. Siekiant įvertinti modifikuotos konstrukcijos naudą praktikoje, remiantis šilumos atidavimo koeficiento padidėjimu, atitinkamai buvo padidinta ir šiluminė galia kanale bei atliktas skaitinis modeliavimas visame kuro rinklės aukštyje. Gauti rezultatai buvo palyginti su atskaitos modelio duomenimis, ir tuomet pateiktos atitinkamos išvados.

Šiame darbe įgytos žinios ir patirtis bus sėkmingai pritaikoma tolesniuose tyrimuose, siekiant maksimaliai optimizuoti gardelės konstrukciją ir taip pagerinti kuro rinklės saugumo, ekonomiškumo ir efektyvumo rodiklius.

# 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

## 1.1. GE14 branduolinio kuro rinklė

GE14 kuro rinklės susideda iš 78 pilno ilgio kuro strypų, tarp kurių yra 8 jungiamieji kuro strypai, 14 pusinio ilgio kuro strypų, užimančių maždaug du trečdalius aktyviosios zonos aukščio, ir 2 didelių centrinių vandens strypų, kuriais tekėdamas vanduo neužverda [1]. Pagrindiniai komponentai, sudarantys GE14 kuro rinklę, yra kuro tabletės, esančios kuro elementų cirkalojaus apvaskale, viršutinė ir apatinė jungiančiosios plokštės, distancinės gardelės, spyruoklės ir kanalas, kuris apgaubia kuro-elementų pluoštą [2]. Kuro kanalas suteikia struktūrinį šoninį standumą kuro rinklei [3]. 10x10 matricos išdėstymas leidžia sumažinti linijinį šilumos išsiskyrimą kuro strypuose, o taip pat pagerina šilumos mainus tarp kuro ir šilumnešio [4]. GE14 kuro rinklė yra pavaizduota 1.1 pav.



1.1 pav. GE14 kuro rinklė [3].

### 1.1.1. Kuro strypai

GE14 kuro strypas (1.2 pav.) yra sudarytas iš apskrito cilindro formos kuro tablečių, išdėstytų stulpelyje, kurį gaubia apvaskalo vamzdelis. Kuro tabletės yra izoliuojamos helio dujų aplinkoje kaiščiais, kurie įstatomi abiejuose apvaskalo vamzdelio galuose. Kuro tabletės sudarytos iš sukepinto urano dioksido miltelių  $UO_2$  arba urano dioksido ir gadolinio kietojo tirpalo  $(U,Gd)O_2$ . Kiekvieno kuro strypo viršutinėje dalyje yra palikta erdvė, skirta užpildymui - joje kaupiasi dujiniai skilimo produktai. Šioje erdvėje yra suspaudimo spyruoklės, kurios sumažina kuro tablečių stulpo judėjimą kuro rinklių gabenimo ir perkėlimo metu, tuo pačiu spyruoklės leidžia kuro tabletėms plėstis ašine kryptimi darbo metu [5]. Yra naudojami trys kuro

strypų tipai GE14 kuro rinklėje: standartiniai viso ilgio kuro strypai, pusinio ilgio kuro strypai ir viso ilgio jungiamieji kuro strypai [3]. Visų strypų kuro rinklėje išsidėstymas pavaizduotas 1.3 pav.

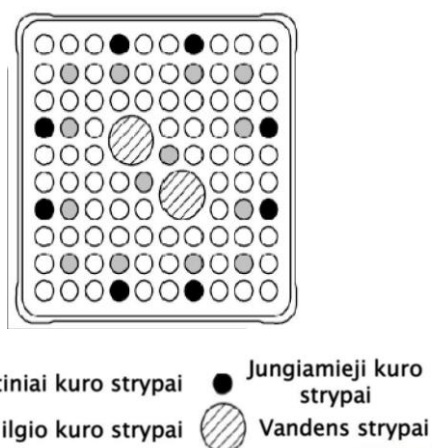


1.2 pav. GE14 kuro strypas. 1-viršutinis kaištis, 2-suspaudimo spyruoklė, 3-apvalkalo vamzdelis, 4-apatinis kaištis, 5-kuro tabletės [5].

Standartiniai viso ilgio kuro strypai yra maždaug 4064 mm ilgio. Viršutinę ir apatinę strypo dalį, apie 152,4 mm nuo galų, sudaro gamtinio (nesodrinto) urano oksido tabletės. Likusios kuro tabletės yra įsodrintos U235 izotopu. Kai kurios sodrinto urano tabletės taip pat susideda ir iš gadolinio absorbento. Kiekvienas kuro strypas yra pripildytas maždaug 3 barų slėgio helio dujomis tam, kad būtų galima pagerinti šilumos mainus tarp kuro tabletės ir apvalkalo [2].

Viso ilgio jungiamieji kuro strypai laiko kuro strypus tarpusavyje, sujungdami viršutinę ir apatinę jungiamąsias plokštes. Jungiamieji kuro strypai pilnai išlaiko kuro rinklės svorį, kai ši yra pakeliama už rankenos. Jungiamieji strypai nuo standartinių kuro strypų skiriasi tik tuo, kad jų apatiniai kaiščiai yra įsriegiami į apatinę jungiamąją plokštę, o viršutiniai kaiščiai įsriegti ir pratęsti per viršutinę jungiamąją plokštę. Visais kitais aspektais jungiamieji strypai yra identiški standartiniams kuro strypams [2].

Pusinio ilgio kuro strypai padidina reaktoriaus stabilumą [4]. GE14 branduolinio kuro rinklėje pusinio ilgio kuro strypai pasibaigia iškart virš penktos distancinės gardelės. Virš pusinio ilgio strypų padidėjęs srauto skerspjūvio plotas lemia dvifazio srauto slėgio nuostolių sumažėjimą, o tai padidina aktyviosios zonos ir kanalo stabilumą. Be to, pusinio ilgio strypai padidina lėtiklio ir kuro santykį viršutinėje aktyviosios zonos dalyje, o tai padidina kuro efektyvumą [1].



1.3 pav. Strypų išsidėstymas GE14 kuro rinklėje [12].

### 1.1.2. Vandens strypai

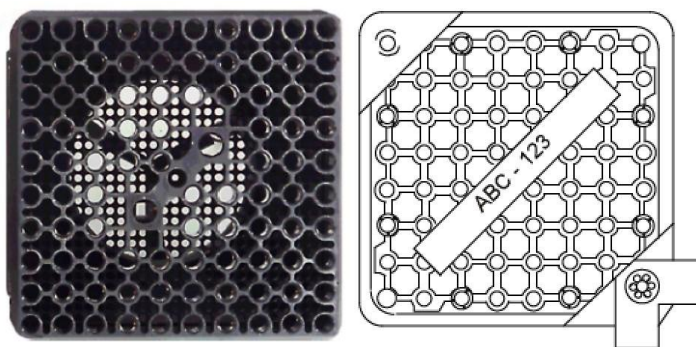
Viena iš pagrindinių verdančio vandens reaktoriaus charakteristikų yra pastovus neutronų lėtinimas prie darbinių temperatūrų. Siekiant pagerinti neutronų lėtinimą ir kuro efektyvumą, kuro rinklės centre kuro strypai yra pakeičiami vandens strypais, kuriuose teka neverdančio vandens srautas. GE14 kuro rinklės modelis susideda iš dviejų didelių centrinių vandens strypų, kurie pakeičia aštuonis įprastus kuro strypus ir užtikrina geresnį neutronų lėtinimą [1]. Vienas iš dviejų vandens strypų yra skirtas distancinių gardelių ašiniam pozicionavimui. Vandens strypai užtikrina tolygesnį šilumos išsiskyrimą kuro rinklės centrinėje dalyje. Toks vandens strypų išdėstymas padidina kuro išdegimą kuro rinklėje, tuo pačiu sumažina maksimalios ir vidutinės galios tankių santykį [2].

### 1.1.3. Apatinė jungiančioji plokštė su nuosėdų filtru

Apatinė jungiančioji plokštė padidina vienfazio srauto slėgio kryptį apatinėje rinklės dalyje, tačiau ji užtikrina tolygų vietinį srauto pasiskirstymą kuro rinklėje bei taip pat apsaugo nuo nuosėdų [3]. Apatinė jungiančioji plokštė suteikia kuro strypams šoninį sutvirtinimą ir juos pozicionuoja, plokštės žemutinė dalis įsistato į kuro rinklės paliktas erdves reaktoriuje ir nukreipia šilumnešio srautą per kuro rinklę. Apatinės jungiančiosios plokštės filtras padeda išvengti šalutinių medžiagų patekimo į kuro strypų erdvę [2]. Apatinė jungiančioji plokštė pavaizduota 1.4 pav.

### 1.1.4. Viršutinė jungiančioji plokštė

Viršutinė jungiančioji plokštė užtikrina kuro strypų lygiavimą ir sutvirtinimą viršutinėje rinklės dalyje, joje yra išgręžtos vertikalios skylės, kurios pozicionuoja kuro strypus. Kėlimo rankena yra integruota jungiančiosios plokštės dalis, ji naudojama kuro rinklės perkėlimui aktyviosios zonos kuro pakrovimo ir iškrovimo metu [2]. Plokštė suprojektuota taip, kad būtų maksimaliai sumažinti dvifazio srauto slėgio nuostoliai [1]. Viršutinė jungiančioji plokštė pavaizduota 1.4 pav.



1.4 pav. Apatinės jungiančiosios plokštės vaizdas iš viršaus (kairėje) ir viršutinės jungiančiosios plokštės vaizdas iš viršaus (dešinėje) [2].

### 1.1.5. Kuro kanalas

Interaktyvusis kuro kanalo modelis turi optimizuotą skerspjūvį, kuris susideda iš storų kampų, kuriuose didžiausi įtempimai, ir plonesnių kraštinių, kuriose įtempimai yra nedideli. Šis kuro kanalo modelis leidžia sumažinti reikalingą cirkalojaus-2 lydinio kiekį kanalo gamybai ir taip pagerinti branduolinio kuro efektyvumą [1] ir neutronų ekonomiją [13].

Kuro kanalo funkcijos:

- 1) Suformuoja kuro rinklėje išorinį periferinį srauto kelią tinkamai šilumnešio tėkmei.
- 2) Suteikia reikiamus paviršius valdymo strypų nukreipimui į reaktoriaus aktyviają zoną.
- 3) Suteikia struktūrinį standumą kuro elementų pluoštui rinklėje, esant šoninėms apkrovoms.
- 4) Užtikrina šilumos mažinimą kuro rinklėje per LOCA avariją [13], veikdamas kaip šilumokaitis ir atiduodamas rinklės vidinę šilumą į aplinką [2].
- 5) Kartu su kreipiančiosiomis spyruoklėmis ir apatine jungiamąja plokšte mažina šilumnešio aplinkelio srautą kuro kanalo ir apatinės jungiančiosios plokštės sąsajoje.
- 6) Perduoda kuro rinklės seismines apkrovas reaktoriaus viršutinei rėtinei ir aktyviosios zonos apatinei rėtinei.
- 7) Užtikrina kuro rinklių įtvirtinimą aktyviojoje zonoje [13].
- 8) Apsaugo kuro strypus kuro rinklės perkėlimo metu.

Kuro kanalas apgaubia kuro elementų pluoštą ir užtikrina barjerą tarp dviejų atskirų, lygiagrečių srautų. Apytiksliai 90% šilumnešio teka kuro kanalo viduje ir pašalina šilumą nuo kuro strypų, likę 10% srauto yra nukreipiami į erdvę tarp kuro rinklių matavimo instrumentų aušinimui [2].

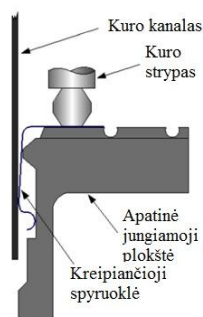
### 1.1.6. Distancinės gardelės

Branduolinio reaktoriaus kuro rinklėse distancinės gardelės yra naudojamos tam, kad užtikrintų kuro strypų mechaninį sutvirtinimą ir sumažintų srauto sukeliama vibraciją [14]. GE14 kuro rinklėje yra 8 distancinės gardelės, kurių konstrukcija sudaryta iš cirkalojaus elementų ir spyruoklių. Lietimosi elementai yra panaikinti trijose distancinėse gardelėse virš pusinio ilgio kuro strypų, siekiant sumažinti dvifazio srauto slėgio nuostolius. Yra nustatomos tokios distancinės gardelės spyruoklių jėgos, kurios sumažintų kuro strypų nusidėvėjimą dėl vibracijos poveikio [3]. Distancinės gardelės taip pat yra skirtos vietiniam šilumos atidavimo ir kritinio šilumos srauto tankio atsargos padidinimui [14]. Ašinė distancinių gardelių pozicija yra išlaikoma dėl prijungimo prie vieno iš vandens strypų. Šios gardelės yra gaminamos iš cirkalojaus-4 lydinio dėl mažų neutronų absorbcijos charakteristikų. Distancinės gardelės

spyruoklinės lingės yra gaminamos iš ypač atsparaus lydinio, sudaryto iš austenitinio nikelio ir chromo, vadinamo „Inconel“ [2].

### 1.1.7. Kreipiančiosios spyruoklės

Kreipiančiosios spyruoklės yra prijungtos apatinėje kuro rinklės dalyje tam, kad užtikrintų teigiamą kontaktą tarp apatinės jungiančiosios plokštės ir kuro kanalo. Toks spyruoklių išdėstymas sumažina bet kokius srauto pasikeitimus kanale per visą kuro rinklės eksploatavimo laiką. Kiekvienoje apatinės jungiančiosios plokštės pusėje yra po 8 kreipiančiasias spyruokles. Spyruoklės yra išlaikomos savo vietoje kuro strypų apatinių kaiščių pagalba. Jos užpildo erdvę tarp kuro kanalo apačios ir apatinės jungiančiosios plokštės tam, kad išlaikytų aktyviosios zonos srautą santykinai pastovų [2]. Kreipiančioji spyruoklė kuro rinklėje pavaizduota 1.5 pav.



1.5 pav. Kreipiančioji spyruoklė kuro rinklėje [2].

## 1.2. Dvifazio vandens garo srauto termohidrauliniai parametrai

Pastovus vandens-garo srauto tekėjimas yra vadinamas dvifaziu srautu. Dėl deformacijų ir fazių spūdumo dujų-skysčio dvifazis srautas yra pats sudėtingiausias. Dvifazių srautų analizė yra ypač svarbi vandeniui aušinamuose reaktoriuose. Dvifazis srautas teka BWR reaktorių aktyviosios zonos kanaluose. Tam, kad būtų galima analizuoti reaktorių sistemas su vandens-garo mišiniais, yra svarbu nustatyti mišinio tankį, slėgio nuostolius kanale, tekėjimo stabilumą, maksimalius debitus ir šilumos mainų rodiklius. Dvifaziai srautai yra tokie patys kompleksiški, kaip ir vienfaziai turbulentiniai srautai, tačiau šiuo atveju reikia įvertinti atskiras fazes. Tarp skirtingų fazių veikia tarpfaziniai įtempimai, kurie sukelia masės, momentų ir šilumos mainus. Kadangi srauto sąlygos tekėjimo kanale keičiasi išilgai tekėjimo ašies, skersai per skerspjuvį ir laike, dvifazis vandens-garo srautas yra ypač sudėtingas trijų dimensijų pereinamųjų procesų uždavinys. Dažnai yra taikomi įvairūs uždavinio supaprastinimai, kurie leidžia analizuoti srautus, išlaikant svarbias savybes. Dvifaziuose srautuose yra priimtina apibūdinti srauto parametrus kaip skerspjuvio vidurkius.

Bendras masinis srauto debitas kanale yra apskaičiuojamas kaip atskirų garo (indeksas  $g$ ) ir vandens (indeksas  $v$ ) masinių debitų suma:

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_v . \quad (1.1)$$

Garo ir vandens masiniai srauto tankiai atitinkamai yra apskaičiuojami taip:

$$G_g = \frac{\dot{m}_g}{A} , \quad (1.2)$$

$$G_v = \frac{\dot{m}_v}{A} . \quad (1.3)$$

Kur: A yra bendras srauto skerspjūvio plotas (m<sup>2</sup>), lygus garo ir vandens užimamų plotų sumai:

$$A = A_g + A_v . \quad (1.4)$$

Tūriniai vandens ir garo debitai atitinkamai yra apskaičiuojami taip:

$$Q_g = A_g \cdot v_g , \quad (1.5)$$

$$Q_v = A_v \cdot v_v . \quad (1.6)$$

Kur: v yra atitinkamos fazės greičiai kanale (m/s).

Bendras tūrinis vandens-garo mišinio debitas yra lygus atskirų fazių debitų sumai:

$$Q = Q_g + Q_v . \quad (1.7)$$

Dvifaziui srautui tekant uždaru kanalu, vienoje kanalo skerspjūvio dalyje yra skystis, kitoje - gasas, taigi garo užimto skerspjūvio ploto ir viso kanalo skerspjūvio ploto santykis vadinamas tikruoju dvifazio srauto garingumu ir apskaičiuojamas taip:

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_v} . \quad (1.8)$$

Masiniu debitiniu vandens-garo garingumu yra vadinamas garo masės debito ir viso mišinio masės debito santykis:

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_g + \dot{m}_v} . \quad (1.9)$$

Slydimo greitis yra lygus tikrųjų garo ir vandens greičių skirtumui:

$$v_r = v_g - v_v . \quad (1.10)$$

Garo ir vandens greičių santykis yra vadinamas slydimo koeficientu:

$$S = \frac{v_g}{v_v} . \quad (1.11)$$

Dvifazio srauto mišinio tankis yra apskaičiuojamas taip:

$$\rho = \alpha \cdot \rho_g + (1 - \alpha) \cdot \rho_v . \quad (1.12)$$

Kur:  $\rho_g$  yra garo tankis, o  $\rho_v$  yra vandens tankis [22], [24].

### 1.2.1. Turbulencija

Srautai yra klasifikuojami į laminarinius ir turbulencinius. Laminario tekėjimo atveju fluideo sluoksnelių tekėjimo kryptys yra lygiagrečios, dalelės tarpusavyje nesimaišo. Turbulencinio tekėjimo atveju fluideo sluoksnelių tekėjimų kryptys yra ir lygiagrečios, ir kertasi tarpusavyje, dalelės juda netvarkingai, maišosi tarpusavyje. Kuo fluidai klampesni (pvz. alyva),

tuo didesnė tikimybė, kad tekėjimas bus laminarinis, o tuo tarpu kuo fluidų klampa mažesnė (pvz. vanduo), tuo dažniau jie juda netvarkingai maišydamiesi. Turbulentinio tekėjimo atveju yra pastebimas tiek skersinis, tiek atbulinis fluido dalelių judėjimas [24]. Siekiant nustatyti, ar srautas yra turbulencinis, remiamasi Reinoldso kriterijumi. Kai Reinoldso kriterijaus reikšmė yra mažesnė nei 2300, tuomet srautas yra laminarinis, o kai didesnė nei 4000, tuomet srautas pereina į turbulentinį režimą [23]. BWR tipo reaktorių aktyviojoje zonoje tekantis šilumnešio srautas visuomet yra turbulencinis. Daugybė svarbių srauto parametrų, tokių kaip slėgio nuostoliai ar šilumos mainai, smarkiai priklauso nuo turbulencijos procesų. Pavyzdžiui, maišymosi procesai ir energijos-masės mainai yra žymiai geresni turbulentinio tekėjimu atveju palyginti su laminariniu. Baigtinių dydžių elementų atstiktinis maišymasis yra labai efektyvus procesas, transportuojantis tiek fluido masę, tiek energiją, tokiu būdu intensyvindamas įvairių susijusių procesų greitį [23].

Reinoldso kriterijus - tai bedimensinis dydis, nurodantis inercinių ir klamos jėgų santykį fluide (1.13) ir naudojamas apibūdinti pasienio sluoksnio tekėjimus. Kuo Reinoldso skaičius didesnis, tuo labiau pradeda dominuoti inercinės jėgos, įveikdamos klamos jėgas.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_H}{\mu} = \frac{v \cdot D_H}{\nu}, \quad (1.13)$$

kur:  $\rho$  yra fluido tankis ( $\text{kg/m}^3$ ),  $v$  yra fluido greitis (m/s),  $D_H$  yra hidraulinis skersmuo (m),  $\mu$  yra fluido dinaminė klampa ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$  arba  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ),  $\nu$  yra fluido kinematinė klampa ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) [15].

Hidraulinis skersmuo yra apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

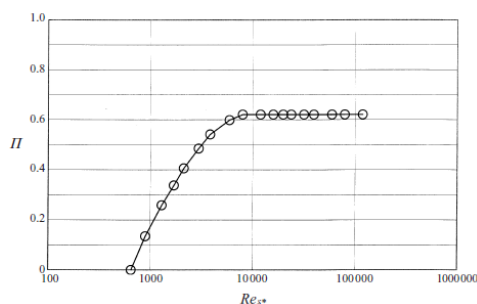
$$D_H = \frac{4 \cdot A}{P}, \quad (1.14)$$

kur  $A$  - srauto skerspjūvio plotas ( $\text{m}^2$ ),  $P$  - drėgnas perimetras (m) [24].

Turbulentinės klamos santykis  $\mu_t/\mu$  yra tiesiogiai proporcingas turbulentiniam Reinoldso skaičiui [11].

$$\frac{\mu_t}{\mu} \propto Re_t \equiv \frac{k^2}{\varepsilon \nu}. \quad (1.15)$$

Paul E. Dimotakis tyrė turbulentių srautų maišymosi perėjimus į hidrodinaminio stabilumo pusiausvyrą ir gavo tokią turbulentinio pasienio sluoksnio priklausomybę nuo  $Re$  kriterijaus (žr. 1.6 pav.).



1.6 pav. Turbulentinio pasienio sluoksnio rodiklio priklausomybė nuo  $Re$  kriterijaus [25].



Matome, kad turbulencinis pasienio sluoksnis nustoja didėti ties maždaug 8000 Re skaičiumi, o tai reiškia, kad nusistovi hidrodinaminė stabili pusiausvyra. Eksperimentai, susiję su sukimo momentų matavimais srautuose, kai Reinoldas kinta nuo 800 iki  $1,23 \cdot 10^6$ , parodė aiškiai apibrėžtas perėjimo ribas siaurame intervale, kuris lygus  $1 \cdot 10^4 < Re_{\text{perėjimo}} < 1,3 \cdot 10^4$ . Buvo nustatyta, kad srautas prieš šias ribas ir už jų yra kokybiškai skirtingas. Už šių nustatytų ribų sukimo momento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus yra progresiškai mažėjanti, tačiau net ir prie maksimalių tirtų Reinoldso reikšmių, sukimo momentas netampa nepriklausomas nuo klampos. Paul E. Dimotakis pateikė tokias išvadas, kad visiškai išvystytas turbulencinis srautas atsiranda prie minimalių Reinoldso reikšmių, esančių  $1-2 \cdot 10^4$  ribose. Šios reikšmės turi būti vertinamos kaip būtinos, tačiau nepakankamos, kad užtikrintų, jog srautas bus visiškai hidrodinamiškai išvystytas [25].

### 1.2.2. Konvekciniai šilumos mainai

Konvekcija - tai šilumos mainai, kurie vyksta tarp paviršiaus ir judančio arba nejudančio fluido, kai jų temperatūros yra skirtingos. Konvekcinių šilumos mainų režimas susideda iš dviejų mechanizmų. Be energijos mainų dėl laidumo energija taip pat yra pernešama dėl makroskopinio fluido judėjimo. Fluido judėjimas yra susijęs su tuo, kad tam tikru momentu didelis molekulių skaičius juda kaip visuma. Toks judėjimas, esant temperatūros gradientui, prisideda prie šilumos mainų. Kadangi molekulės, judėdamos kaip visuma, išlaiko ir savąjį judesį, tai šilumos mainai susideda iš energijos transportavimo superpozicijos dėl savojo molekulių judesio ir bendro fluido visumos judėjimo. Priverstinė konvekcija vyksta tuomet, kai fluido srautą verčia tekėti išoriniai įrenginiai, tokie kaip ventiliatorius ar siurbliai [23]. Priverstinė konvekcija dažniausiai naudojama, siekiant pagerinti šilumos mainus.

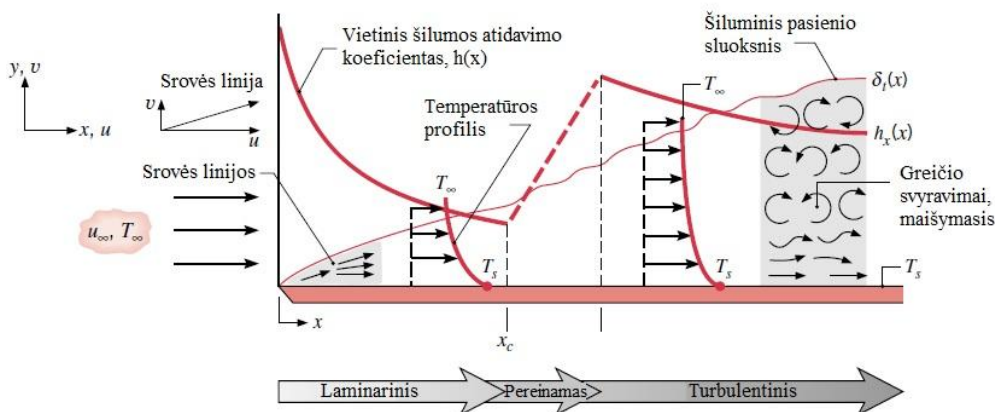
Pagal Niutono dėsnį konvekcija yra aprašoma tokia lygtimi:

$$q = h \cdot (T_s - T_f) \quad , \quad (1.16)$$

kur:  $q$  - konvekcinis šilumos srauto tankis ( $W/m^2$ ),  $h$  - šilumos atidavimo koeficientas ( $W/m^2K$ ),  $T_s$  - paviršiaus temperatūra (K),  $T_f$  - fluido temperatūra (K).

Šilumos atidavimo koeficientas priklauso nuo pasienio sluoksnio sąlygų, kurias nulemia paviršiaus geometrija, fluido judėjimo būdas ir fluido termodinaminiai ir transportavimo parametrai. Turbulentinio tekėjimo režimo regione fluido judėjimas yra labai nelygus ir apibūdinamas greičio svyravimais, kurie pagerina energijos mainus. Dėl fluido maišymosi, kurį nulemia greičio svyravimai, turbulentinio tekėjimo pasienio sluoksnis yra storesnis nei laminarinio tekėjimo metu (žr. 1.7 pav.). Atitinkamai temperatūros profiliai yra plokštesni, o temperatūros gradientai prie paviršiaus yra statesni palyginti su laminariu srautu. Dėl to vietiniai šilumos atidavimo koeficientai yra didesni nei laminarinio tekėjimo atveju. Pagrindinis

konvekcinių šilumos mainų tyrimų tikslas yra nustatyti šilumos atidavimo koeficientą, esant skirtingoms tekėjimo kanalų konstrukcijoms ir srauto sąlygoms.



1.7 pav. Šiluminio pasienio sluoksnio susidarymas srautui aptekant plokštelę laminariniame ir turbulentiame tekėjimo režimuose [23].

Kadangi yra daugybė kintamųjų, susijusių su skirtingomis tekėjimo situacijomis, yra svarbu nustatyti universalias bedimensinių parametrų ar jų grupių funkcijas, kurios nurodytų tam tikrų konvekcinių tekėjimo situacijų fizikinę reikšmę. Nuselto kriterijus yra viena iš tokių funkcijų, kuri vaizduoja bedimensinį temperatūros gradientą prie paviršiaus ir yra šilumos atidavimo koeficiento matavimo matas. Nuselto kriterijus nurodo konvekcinių šilumos mainų ir šilumos mainų laidumu santykį [23].

$$Nu = \frac{\text{Konvecciniai šilumos mainai}}{\text{Šilumos mainai laidumu}} = \frac{h \cdot D_H}{k}, \quad (1.17)$$

kur: Nu yra Nuselto kriterijus,  $D_H$  - hidraulinis skersmuo (m),  $k$  - fluideo šiluminis laidumas ( $W/m \cdot K$ ), o  $h$  - konveccinis šilumos atidavimo koeficientas ( $W/m^2K$ ) [16].

Turbulentinio vandens srauto, kvadratinio strypų išdėstymo kuro rinklėje šilumos atidavimo koreliacija yra tokia:

$$Nu = F \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.333}, \text{ kur}$$

$$F = 1.826 \cdot \frac{P}{D} - 1.0430, \text{ kai}$$

$$1.1 \leq \frac{P}{D} \leq 1.3, \quad (1.18)$$

kur:  $P$  - atstumas tarp kuro strypų centrų,  $D$  - kuro strypų skersmuo,  $Re$  - Reinoldso kriterijus,  $Pr$  - Prandtljo kriterijus,  $F$  - koeficientas, priklausantis nuo konstrukcijos ypatybių [22].

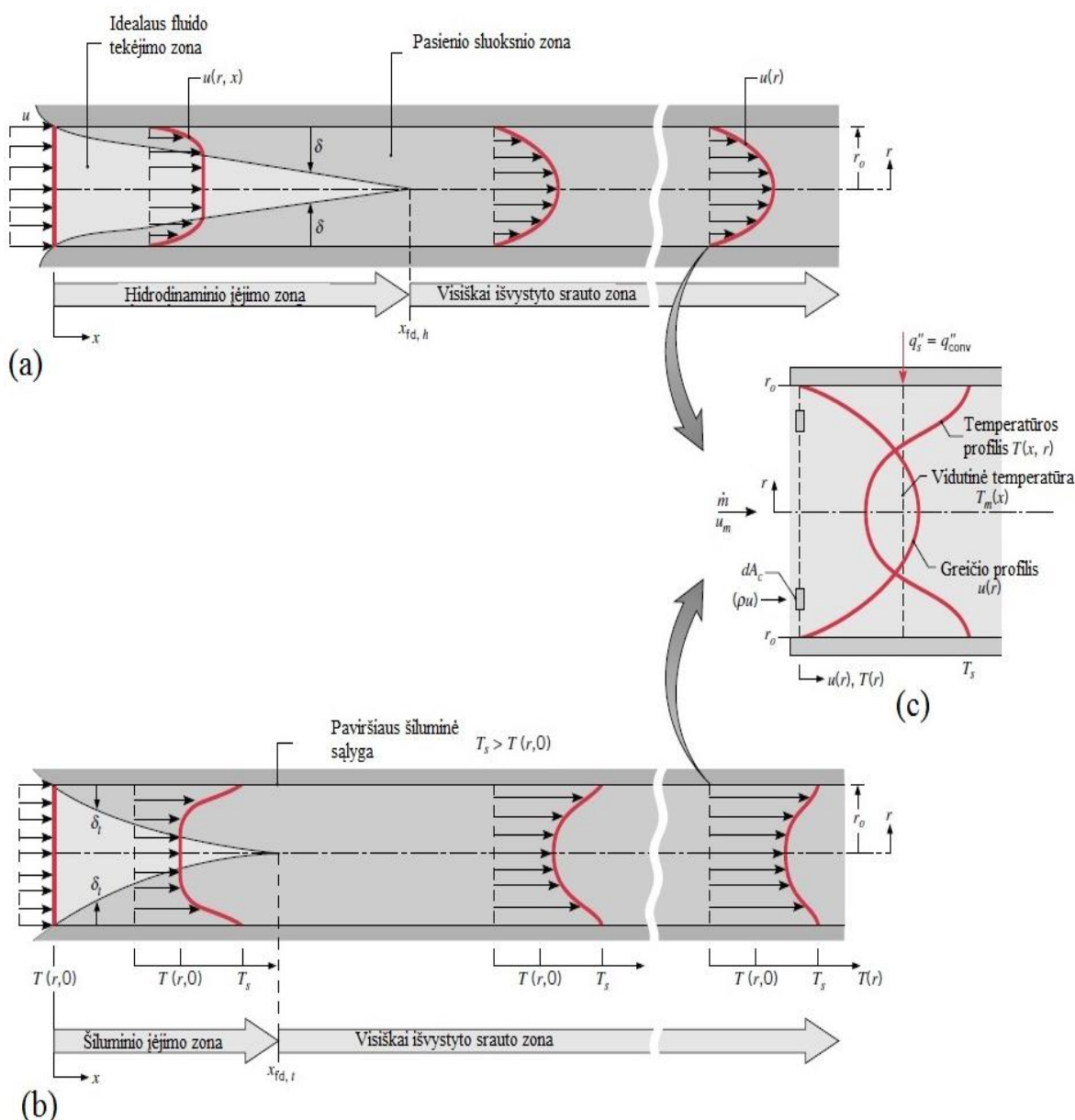
Prandtljo kriterijus  $Pr$  nurodo fluideo transportavimo savybę bei matuoja santykinį momento ir energijos transportavimo efektyvumą atitinkamai hidrodinaminiam ir šiluminiame pasienio sluoksniuose. Galima sakyti, kad Prandtljo kriterijus nustato santykinį hidrodinaminio ir šiluminio pasienio sluoksnių storį. Kuo didesnė  $Pr$  reikšmė, tuo intensyvesnis yra skersinis

impulso pernešimas, tuo storesnis hidrodinaminis pasienio sluoksnis palyginti su terminiu pasienio sluoksniu.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{v}{\alpha}, \quad (1.19)$$

kur:  $c_p$  - specifinė šiluma (J/kg·K),  $\alpha$  - šiluminės skvarbos koeficientas (m<sup>2</sup>/s).

Fluido tekėjimo uždaramame kanale atveju (žr. 1.8 pav.), srautas yra apribotas sienelių paviršiaus, dėl to pasienio sluoksnio vystymasis taip pat yra apribotas. Srautui įtekėjus į uždara kanalą, nuo įėjimo pradeda formuotis hidrodinaminis pasienio sluoksnis, kuris galiausiai užpildo visą erdvę. Pasiiekus šią zoną, srautas tampa visiškai hidrodinamiškai išvystytu, ir greičio profilis daugiau nebesikeičia fluide tekėjimo kryptimi.

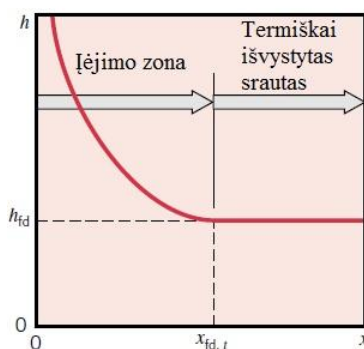


1.8 pav. Pasienio sluoksnių formavimasis laminariniame sraute, tekančiame vamzdyje.

(a) Hidrodinaminis pasienio sluoksnis ir greičio profiliai; (b) Šiluminis pasienio sluoksnis ir temperatūros profiliai; (c) Greičio ir temperatūros profiliai, siekiant nustatyti vidutinę temperatūrą  $x$  koordinatėje [23].

Terminiškai išvystytame fluideo sraute su pastoviomis sąlygomis vietinis šilumos atidavimo koeficientas yra pastovus ir nepriklausantis nuo ašinės koordinatės  $x$  (žr. 1.20 lygtį), tačiau ši lygtis yra netinkama šiluminio įėjimo zonoje. Kadangi šiluminio pasienio sluoksnio storis kanalo įėjime yra lygus 0, tai šilumos atidavimo koeficiento reikšmė yra gerokai didesnė ties koordinate  $x=0$  ir žymiai mažėja, formuojantis pasienio sluoksniui, kol galiausiai yra pasiekama pastovi jo reikšmė, kai srautas tampa terminiškai išvystytu (žr. 1.9 pav.).

$$\frac{h}{k} \neq f(x) = \text{konstanta} . \quad (1.20)$$



1.9 pav. Šilumos atidavimo koeficiento kitimas, srautui įtekėjus į uždarą kanalą [23].

Taigi apibendrinant, šilumos mainų Nuselto kriterijus tiesiogiai priklauso nuo Reinoldso kriterijaus, kuris nusako srauto turbulentiškumą. Kuo didesnis srauto turbulentiškumas, tuo efektyvesni yra konvekciniai šilumos mainai. Siekiant padidinti turbulentiškumą kuro rinklėje, o taip pat ir suintensyvinti šilumos mainus, yra naudojami įvairių konstrukcijų maišymo elementai, tokie kaip maišymo mentės. Žinoma, papildomi elementai yra atsakingi už padidėjusius slėgio nuostolius kanale. Panašaus pobūdžio tyrimų tikslas yra sukurti kuo efektyvesnę distancinių gardelių su maišymo elementais konstrukciją, kuri maksimaliai suintensyvintų konvekcinius šilumos mainus su minimaliais įmanomais slėgio nuostoliais.

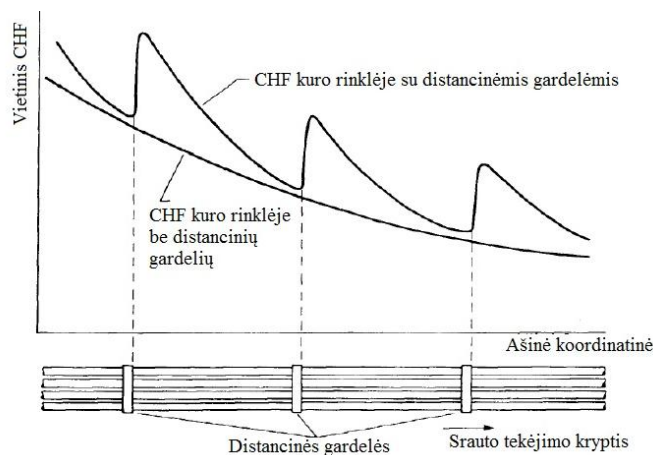
### 1.2.3. Kritinis šilumos srauto tankis

Virimas yra efektyvus šilumos mainų būdas ir turi aukštą šilumos perdavimo pajėgumą, vykstant faziniams virsmams. Dauguma šiluminių sričių, įskaitant ir atomines elektrines, naudoja virimo fenomeną šilumos nuvedimo procesuose. Tačiau efektyvūs šilumos mainai virimo metu yra riboti dėl staigaus ir drastiško šilumos atidavimo koeficiento sumažėjimo, kuris įvyksta dėl garų plėvelės susidarymo aplink šildantįjį paviršių fenomeno, vadinamo kritiniu šilumos srautu [6]. Branduolinio reaktoriaus sistemoje CHF yra toks šilumos srauto tankis, prie kurio įvyksta virimo krizė, sukianti staigų kuro strypų paviršiaus temperatūros padidėjimą [20]. Po kritinio šilumos srauto tankio susidarymo šildantysis paviršius kontaktuoja tik su garu, o tai gali sukelti jo perkaitinimą ir fizinį gedimą, vadinamą perdegimu arba kuro strypų apvalkalo išsilydimo avarija. Ypač branduoliniuose reaktoriuose, CHF tiesiogiai paveikia reaktoriaus aktyviosios

zonos vientisumą. Taigi CHF mechanizmų supratimas ir procesų pagerinimas leistų praplėsti reaktoriaus saugaus veikimo ribas ir taip pat padidinti reaktoriaus galią komercinėse atominėse elektrinėse [6]. Siekiant išvengti avarijų aktyviojoje zonoje, projektuojant vandeniu aušinamus reaktorius, yra būtina išlaikyti saugias veikimo ribas, atsižvelgiant į kritinio šilumos srauto tankio susidarymą. Yra puikiai žinoma, jog CHF lemia tiek geometrinės, tiek termohidraulinės sąlygos. Patys svarbiausi parametrai, įtakojantys CHF atsiradimą kuro rinklėse, yra šie:

- Slėgis
- Masinis srauto tankis
- Garo masinė dalis (garo kokybė)
- Kuro strypų skersmuo
- Kuro strypų išdėstymas
- Žingsnio tarp kuro strypų ir strypų skersmens santykis
- Galios pasiskirstymas
- Distancinės gardelės konstrukcija

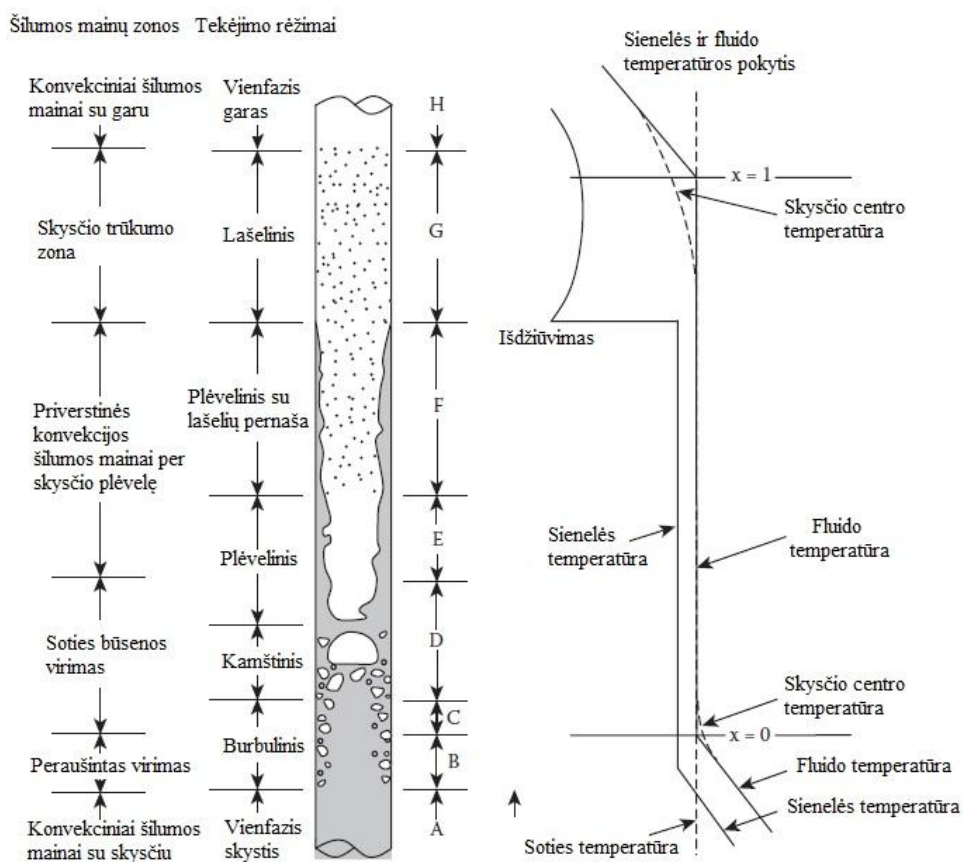
Distancinės gardelės kuro rinklėse atlieka termohidraulinių parametrų perskirstymo ir srauto suardymo tarpkanalinėse erdvėse funkcijas. Distancinių gardelių konstrukcijos įtaka kritiniam šilumos srautui gali būti nustatoma tikrai eksperimentiniais metodais [20], dėl to šiame darbe ji nebus tirama. Buvo atliekami intensyvūs tyrimai, siekiant nustatyti distancinių gardelių įtaką kritiniam šilumos srautui. Bendru atveju ryškus vietinio CHF padidėjimas buvo gautas, srautui tik pratekėjus distancinę gardelę (žr. 1.10 pav). Šis vietinis CHF padidėjimas iš esmės yra gaunamas dėl padidėjusios dvifazio srauto turbulencijos, kuri gali stipriai sumažinti CHF atsiradimo tikimybę ir pagerinti tarpkanalinį srauto maišymąsi [20].



1.10 pav. Distancinių gardelių įtaka kritiniam šilumos srautui [21].

1.11 pav. yra pavaizduoti įvairūs tekėjimo režimai ir šilumos mainai, srautui priverstinai tekant vertikaliame vamzdyje į viršų, esant tolygiam šilumos išsiskyrimui. Paveikslėlyje taip pat pavaizduota, kaip keičiasi sienelės ir fluideo temperatūros. Fluidui, kurio temperatūra nėra

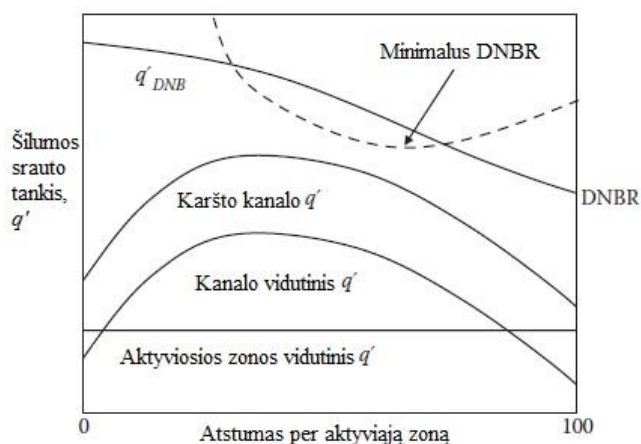
pasiekus sotes reikšmės, įtekėjus į vamzdį, šilumos mainų režimai keičiasi per visą aukštį. Pradžioje teka vienfazis fluidas (A), ir vyksta konvekciniai šilumos mainai tarp fluideo ir sienelės, tuomet tekėjimo režimas keičiasi į burbulinį (B,C), ir seka peraušintas virimas, po to kamštinis (D) ir plėvelinis (E) tekėjimo režimai su sotes būsenos virimu. Skysčio plėvelės storis plonėja, intensyvėjant lašelių pernašai (F), ir galiausiai skysčio plėvelė visai nebedengia sienelės, prasideda lašelinis tekėjimas (G) - ši zona yra vadinama išdžiūvimo zona. Galiausiai išgaravus visiems lašeliams, prasideda vienfazio garo tekėjimo režimas (H). Vamzdžio sienelės temperatūra staiga padidėja ties išdžiūvimo tašku. Išdžiūvimas yra kritinio šilumos srauto tankio susidarymo mechanizmas.



1.11 pav. Tekėjimo režimai ir šilumos mainai, srautui priverstinai tekant vertikaliame vamzdyje, esant tolygiam šilumos išsiskyrimui [22].

Svarbiausias fenomenas lengvojo vandens reaktoriuose yra kuro elementų perdegimas, kuris riboja reaktoriaus galią. Kaip ir minėjome anksčiau, DNB įvyksta dėl kuro elementų sienelės išdžiūvimo. 1.12 pav. pavaizduoti vidutinis aktyviosios zonos, vidutinis kanalo ir karšto kanalo bei DNB šilumos srauto tankiai per visą aktyviosios zonos aukštį. Vidutinis išsiskyrusios šilumos kiekis kanale yra lygus reaktoriaus šiluminės galios ir kanalų skaičiaus santykiui. Aktyviosios zonos vidutinis šilumos srauto tankis yra lygus vidutinio kanalo šilumos srauto tankio vidurkiui. Karšto kanalo linija nurodo maksimalią leidžiamą šilumos srauto tankio

reikšmę aktyviojoje zonoje. Apskaičiuota DNB šilumos srauto tankio kreivė yra apskaičiuotų CHF reikšmių padėčių kreivė.



1.12 pav. Ašinis šilumos srauto tankio aktyviojoje zonoje, kanale ir DNB pasiskirstymas [22].

Santykis tarp nustatyto DNB šilumos srauto tankio ir karšto kanalo šilumos srauto tankio yra vadinamas DNB santykiu arba DNBR. Projektinė vandeniu aušinamų reaktorių sąlyga yra išlaikyti minimalų DNBR rodiklį, lygų 1,3. Tai yra saugos faktorius, susijęs su CHF susidarymu dėl per galingos konstrukcijos parinkimo sąlygų ir nenumatytų pereinamųjų procesų [22].

### 1.3. Distancinių gardelių konstrukcijos ir tyrimų analizė

Branduolinio kuro rinklėse išdėstytų distancinių gardelių paskirtis yra atskirti kuro strypus vieną nuo kito, paliekant tam tikrus tarpus, bei užtikrinti kuro strypų mechaninį sutvirtinimą ir srauto sukeltą vibraciją mažinti. Distancinės gardelės atitinka kliūtį sraute, o tai sukelia papildomus slėgio nuostolius. Slėgio nuostoliai įtakoja ekonomiškumą, kadangi atsiranda papildomos išlaidos dėl reikalingos didesnės cirkuliacinių siurblių galios. Tam, kad minimalizuoti srauto blokavimą ir užtikrinti pakankamą atramą kuro rinklės struktūrai, distancinės gardelės buvo tobulinomos daugelį metų, taip įdiegiant tokius kompleksinius elementus, kaip lietimosi bangelės ar spyruoklinės lingės. Taip pat buvo ieškoma geometrinių struktūrų, padėsiančių padidinti skersinius pagreičius, taip užtikrinant efektyvesnius energijos mainus. Taip pat distancinių gardelių struktūra ir ašinis išdėstymas suprojektuotas taip, kad įtakotų kritinio šilumos srauto tankio atsargą. Kritinis šilumos srauto tankis yra pagrindinis visos branduolinio kuro rinklės projektavimo parametras, į kurį reikia atsižvelgti, nes šio reiškinio atsiradimo numatymas ir mažiausių ribų išlaikymas smarkiai prisideda prie branduolinio reaktoriaus ekonominių ir saugumo faktorių.

Pagal pateiktą įžangą galime išskirti du distancinių gardelių projektavimo etapus: distancinės gardelės vystymo etapas ir saugumo bei ekonominio veikimo etapas. Distancinės



gardelės vystymo etape yra naudojami geriausi praktiniai metodai ir atliekami brangūs eksperimentai, skirti modelių konstrukcijoms tirti bei teisingoms koreliacijoms vystyti. Saugumo ir ekonominio veikimo etapo projektavimo darbai specializuojasi ties kritinio šilumos srauto tankio nustatymu, naudojant analizavimo kodus. Verdančio vandens reaktoriuose (BWR) kritinio šilumos srauto tankio numatymas yra dviejų dalių modelis, kuris susideda iš teisingo garo kiekio tarpkanalinėse erdvėse numatymo kartu su skysčio plėvelinio tekėjimo analizavimu. Distancinės gardelės konstrukcija paveikia abi šias dalis. Siekiant numatyti garo kiekį, reikia įvertinti tokius veiksnius, kaip skersiniai srautai tarpkanalinėse erdvėse, atsirandantys dėl turbulentinio maišymosi, skersiniai slėgio gradientai ir garo poslinkiai. Modernios, skirtingų konstrukcijų distancinės gardelės įtakoja visus tris minėtus procesus. Plėvelinis tekėjimas paveikiamas distancinės gardelės tiek virš jos, tiek prieš ją [17].

Distancinės gardelės konstrukcija gali būti įvairi, tačiau svarbiausia, jog ji tenkintų pagrindinius jai keliamus reikalavimus:

- 1) Užtikrintų kuro strypų mechaninį sutvirtinimą;
- 2) Sumažintų srauto sukeltą vibraciją;
- 3) Padidintų vietinį šilumos atidavimą;
- 4) Padidintų kritinio šilumos srauto tankio atsargą [14].

### **1.3.1. Distancinės gardelės su maišymo elementais**

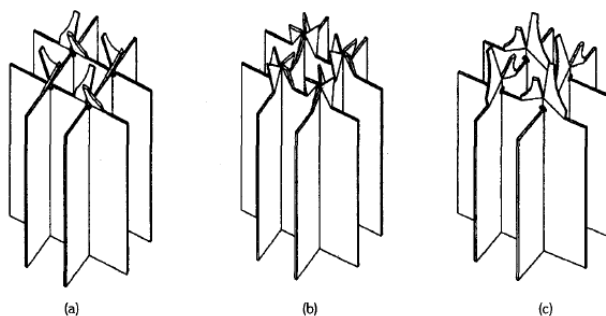
Visame pasaulyje yra atliekami tyrimai, ieškoma optimalios distancinės gardelės konstrukcijos, kuri leistų intensyvinti šilumos mainus kuro rinklėje bei užtikrintų svarbiausias distancinių gardelių charakteristikas. Mokslininkai atlieka skaitinio modeliavimo bandymus, ieškodami naujos, geresnės konstrukcijos. Didėjant energijos poreikiams pasaulyje, šis uždavinys yra labai aktualus, kadangi bent minimaliai sugebėjus padidinti šilumos atidavimo koeficientą kuro rinklėje, galima padidinti reaktoriaus galią, o tai leistų sutaupyti labai didelius pinigus ir atpiginti elektros energijos savikainą.

Šiuo metu daugiausia dėmesio skiriama distancinėms gardelėms su įvairių tipų maišymo mentėmis, kadangi jos efektyviai didina turbulentinį maišymąsi ir intensyvina šilumos mainus kanale, nesukeldamos labai didelių papildomų slėgio nuostolių. Labiausiai paplitę maišymo menčių išdėstymai gardelėje yra srauto perskėlimo tipo (SV), sūkurinio tipo (SWV), hibridinio tipo (HV), pasukto tipo (TV) ir kiti.

Wang Kee In, Dong Seok Oh ir Tae Hyun Chun [27] ieškojo optimalios PWR reaktoriaus kuro rinklės distancinės gardelės konstrukcijos su maišymo mentėmis, atlikdami srautų skaitinio modeliavimo tyrimą. Tuo tikslu jie tyrė trijų skirtingų konstrukcijų distancines gardeles su SV, SWV ir TW tipų maišymo mentėmis (žr. 1.13 pav.). Svarbiausias dėmesys buvo skiriamas besisukančio srauto ir skersinių srautų maišymosi efektui bei slėgio nuostoliams kanale, lyginant



juos su skirtingais menčių pasvirimo kampais. Optimalus menčių pasvirimo kampas buvo nustatytas lygus  $40^\circ$  SWV tipui ir  $35^\circ$  TV tipui nuo srauto tekėjimo ašinės krypties. Siekiant maksimaliai išnaudoti maišymosi menčių teikiamą naudą, yra būtina optimizuoti jų dydį, formą, pasvirimo kampą ir tvirtinimo vietą distancinėje gardelėje. Distancinės gardelės ir srauto maišymosi mentės sukuria priverstinį srauto maišymąsi tiek pačioje tarpkanalinėje erdvėje, tiek tarp jų.



1.13 pav. Distancinių gardelių konstrukcijos su skirtingais maišymo menčių išdėstymais.

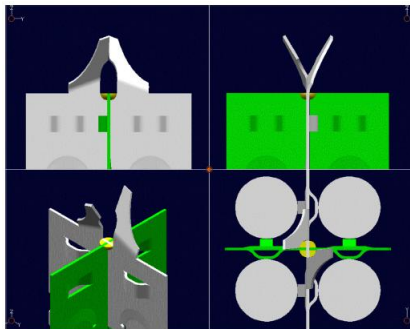
- a) SV tipo distancinė gardelė; b) SWV tipo distancinė gardelė;  
c) TV tipo distancinė gardelė [27].

Kazuo Ikeda [7] atliko pažangaus dizaino aukšto efektyvumo distancinės gardelės skaitinį tyrimą ir, remdamasis eksperimentine informacija, nustatė, kad distancinės gardelės su maišymo mentėmis konstrukcijos konceptas turėtų būti toks:

- 1) Fluido, tekančio link maišymo menčių, srautas turi būti kaip įmanoma intensyvesnis;
- 2) Spyruoklinės lingės forma turi būti hidrauliškai lygi tam, kad sumažintų srauto pasipriešinimą bei trikdymą;
- 3) Lietimosi bangelių forma turi būti suprojektuota taip, kad sukeltų kaip įmanoma mažesnę hidraulinių pasipriešinimą.

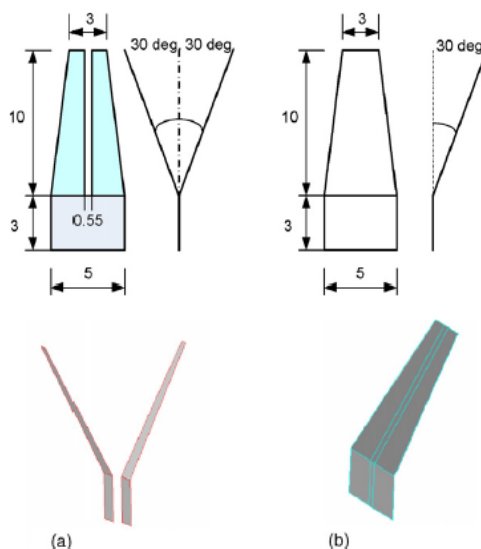
Didesnės mentės pagerina fluido maišymosi efektą, o tai padidina DNB atsargą ant kuro strypų. Tačiau dėl didesnių maišymo menčių padidėję slėgio nuostoliai sumažina pratekančio šilumnešio srautą aktyviojoje zonoje, o tai sumažina DNB atsargą. Taigi tyrimų tikslas yra išvystyti tokį distancinės gardelės modelį, kurio slėgio nuostoliai būtų arba tokie patys, arba mažesni nei šiuo metu naudojamų distancinių gardelių, ir kuris padidintų DNB atsargą kanale.

Savo tyrime Kazuo Ikeda suprojektavo distancinę gardelę su kryžminio maišymo mentėmis. Standartinio tipo distancinėse gardelėse maišymo mentės yra palinkusios į kuro strypus, taip nukreipdamos skersinį fluido srautą tiesiai į kuro strypų paviršius, dėl ko jis praranda savo impulsą. Tuo tarpu kryžminio maišymo mentės yra pasuktos taip, kad nukreiptų fluido srautą kuro strypų tangentinės linijos kryptimi. Kadangi taip nukreiptas srautas neatsimuša tiesiai į kuro strypus, dėl to jis nepraranda savo impulso, ir tuo pačiu toks skersinio srauto tekėjimas pagerina DNB atsargą, išlaikydamas santykinai mažesnius slėgio nuostolius. Distancinė gardelė su kryžminio maišymo mentėmis yra pavaizduota 1.14 paveiksle.



1.14 pav. Distancinė gardelė su kryžminio maišymo mentėmis [7].

C.M. Lee ir Y.D. Choi [28] savo tyrime lygino skirtingų tipų maišymo menčių įtaką termohidrauliniams procesams 17x17 matricos išdėstymo branduolinio kuro rinklėje. Buvo sumodeliuotas distancinės gardelės modelis su didelio mastelio sūkurių susidarymo maišymo mentėmis (LSVF) ir mažo mastelio sūkurių susidarymo maišymo mentėmis (SSVF) (žr. 1.15 pav.). SSVF yra standartinės SV tipo maišymo mentės, o LSVF maišymo menčių konstrukcija ir išdėstymas skiriasi, tam kad susidarytų didelio mastelio sūkoriai. Atlikę skaičiavimus, mokslininkai pateikė tokias išvadas, kad LSVF maišymo mentės sukuria didesnę turbulencijos intensyvumą ir pagerina šilumos atidavimo koeficientą palyginti su SSVF tipo maišymo mentėmis. Dėl šių priežasčių LSVF maišymo mentės pagerina šiluminį efektyvumą ir kuro rinklės CHF atsargą. Tikras distancinės gardelės be maišymo elementų ir su maišymo mentėmis vaizdas yra pavaizduotas (1.16 pav.).



1.15 pav. SSVF ir LSVF tipų maišymo menčių konstrukcija. a) SSVF; b) LSVF [28].



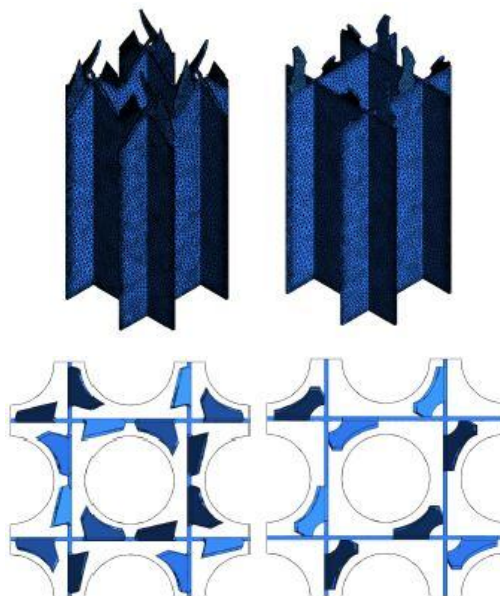
1.16 pav. Distancinė gardelė be maišymo elementų ir su maišymo mentėmis [28].

Taigi apibendrinant yra daugybė galimų distancinių gardelių su maišymo elementais variacijų, kurios priklauso tiek nuo pačių maišymo elementų konstrukcijos, tiek nuo jų išdėstymo ar pasvirimo kampų. Bendras visų susijusių tyrimų ir eksperimentų tikslas atrasti kaip įmanoma tobulesnį distancinės gardelės modelį, kuris užtikrintų geresnį fluido maišymąsi, taip išlaikant saugaus veikimo ribas dėl CHF atsargos padidinimo, o taip pat pagerintų šilumos mainus kanale, nesukeltų per didelių slėgio nuostolių ir atliktų pagrindines konstrukcines užduotis.

### 1.3.2. Distancinių gardelių įtakos termohidrauliniams procesams tyrimų analizė

W.K. In, a C.H. Shin, a D.S. Oh ir a T.H. Chun [19] atliko tyrimą, kurio tikslas buvo ištirti PWR reaktoriaus kuro rinklės termohidraulinius parametrus, naudojant HV tipo ir SV tipo distancines gardeles (žr. 1.17 pav.). Šiam tikslui buvo naudojamas ANSYS CFX-10 programinis paketas. Distancinės gardelės paskirsto šilumnešio srautą kuro rinklėje. Dėl to distancinių gardelių konstrukcija turi didelę įtaką termohidrauliniams procesams, tokiems kaip kritinis šilumos srauto tankis ar slėgio nuostoliai. Tekantį srautą nukreipiančios mentės, gali ypač pagerinti CHF atsargą, padidindamos šilumnešio maišymąsi ir šilumos mainus prie kuro strypų.

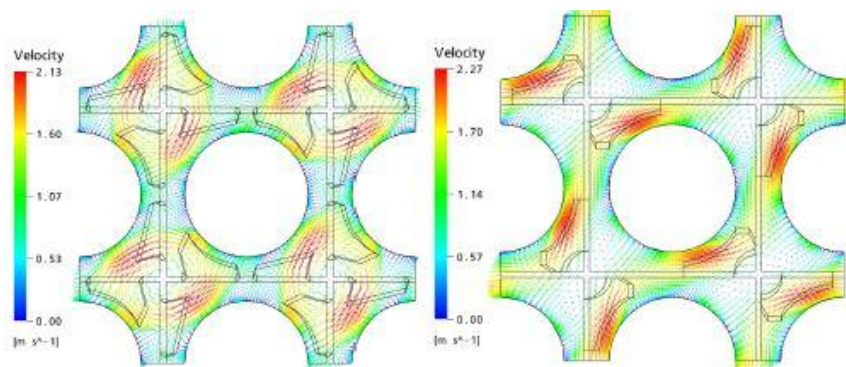
1.18 pav. pavaizduotas šilumnešio maišymasis, kurį sukelia kreipiančiosios mentės, srautui pratekėjus 5 hidraulinius diametrus nuo distancinės gardelės. HV tipo menčių išdėstymas sukuria didelį sūkurį tarpkanalinės erdvės centre ir silpnus skersinius srautus tarp gretimų tarpkanalinių erdvių. SV tipo menčių išdėstymas tarpkanalinėje erdvėje sukuria intensyvius skersinius srautus ir du mažus sūkurius, kurių kryptis yra priešinga.



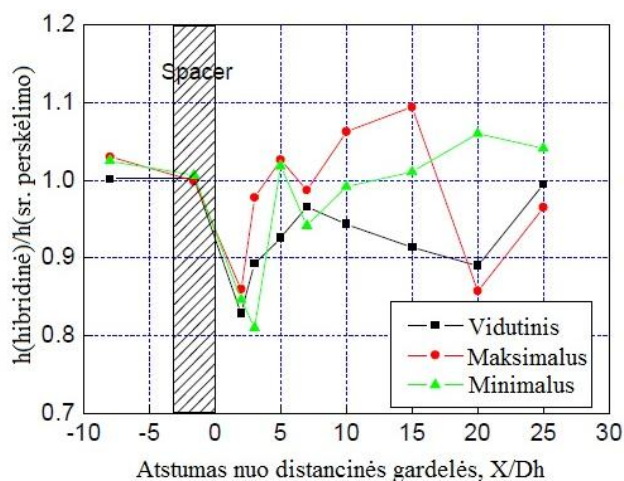
1.17 pav. HV tipo distancinė gardelė (kairėje) ir SV tipo distancinė gardelė (dešinėje) [19].

Ašinis šilumos atidavimo koeficiento kitimas pavaizduotas 1.19 pav. Šilumos atidavimo koeficientai buvo gauti, naudojant strypo periferines vidutines, maksimalias ir minimalias

temperatūras atitinkamai. HV tipo kuro rinklėje minimali temperatūra buvo gauta, pratekėjus maždaug 25 hidraulinius diametrus, tačiau ši vertė vis tiek buvo maždaug 4 proc. didesnė nei SV tipo kuro rinklėje. Tai reiškia, kad SV tipo kuro rinklėje gali susidaryti karštesnės zonos, kurios įtakoja kritinio šilumos srauto tankio atsiradimą ant kuro strypų.



1.18 pav. Sūkurių susidarymas ir skersiniai srautai tarpkanalinėse erdvėse, sukelti HV tipo distancinės gardelės (kairėje) ir SV tipo distancinės gardelės (dešinėje) [19].



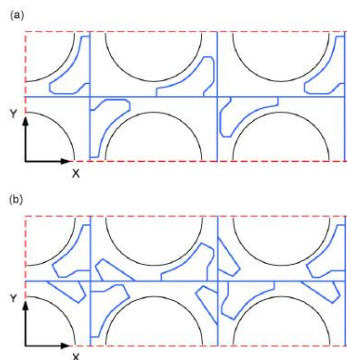
1.19 pav. Ašinis šilumos atidavimo koeficiento kitimas [19].

Atlikę skaičiavimus, mokslininkai apibendrino rezultatus ir pateikė tokias išvadas:

1. HV mentės sukuria didelį sūkurių šalia distancinės gardelės, kai tuo tarpu SV tipo mentės sukelia intensyviuos skersinius srautus;
2. Abiejose konstrukcijose atsiranda karštosios zonos, kuriose gali susidaryti kritinis šilumos srauto tankis;
3. SV tipo mentės šiek tiek padidina vidutinį WHTC palyginti su HV mentėmis, tačiau HV mentės padidina WHTC karštosiose zonos (t.y. sumažina kuro strypų temperatūrą), kas galiausiai pagerina kritinio šilumos srauto tankio atsargą kuro rinklėje [19].

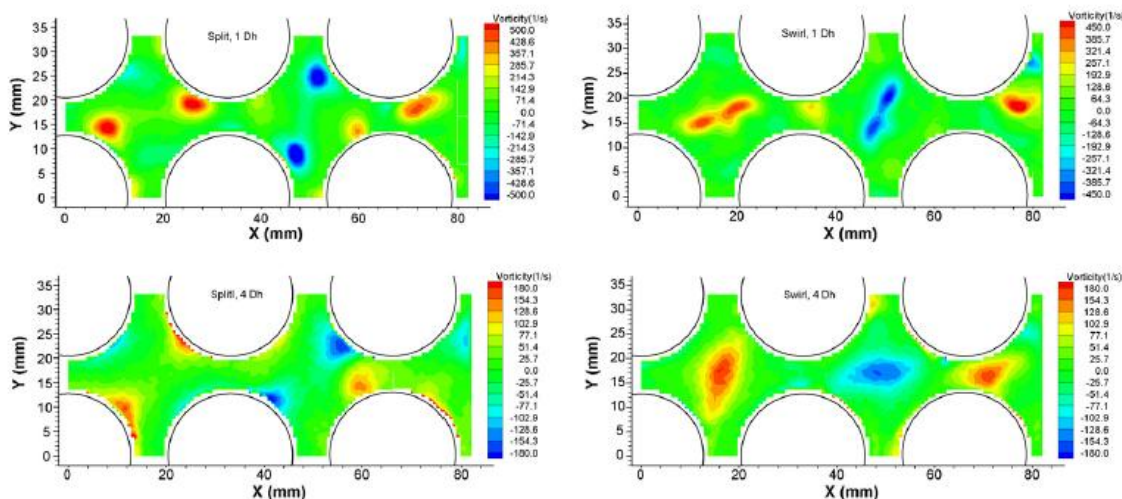
Seok Kyu Chang, Sang Ki Moon, Won Pil Baek ir Young Don Choi [18] tyrė branduolinio kuro rinklės su maišymo elementais turbulentinio srauto susidarymo struktūrų

fenomenus. Tyrimui buvo naudojami dviejų rūšių - SWV tipo ir SV tipo - distancinės gardelės maišymo elementai, kurie pavaizduoti 1.20 pav.



1.20 pav. Maišymo elementų tipai: a) SV tipas b) SWV tipas [18].

Naudodami skaitinio modeliavimo paketą, šie mokslininkai gavo įdomius rezultatus. Sūkurių susidarymo tendencija prie abiejų maišymo elementų tipų skirtinguose aukščiuose pavaizduota 1.21 pav. Viršuje pavaizduota sūkurių susidarymo tendencija iškart po to, kai srautas prateka vieną hidraulinių diametrų nuo maišymo elementų, o apačioje pavaizduota, kaip sūkuriai elgiasi, srautui pratekėjus keturis hidraulinius diametrus.



1.21 pav. Sūkurių susidarymo ir kitimo tendencija. Kairėje pusėje - SV tipo maišymo elementai, dešinėje pusėje - SWV tipo maišymo elementai [18].

Stebėdami kairėje pusėje esančius vaizdus, kuomet maišymo elementai yra SV tipo, matome, jog keletas smulkių sūkurių susidaro tarpkanalinėje erdvėje simetriškai menčių konstrukcijai. Šie sūkuriai yra šalia kuro strypų, kadangi pagrindinis centrinis fluideo srautas, keliaudamas didele jėga, juos nustumia į šoną. Galiausiai, pratekėję dar didesnę atstumą, šie sūkuriai išnyksta. Stebėdami dešinėje pusėje esančius vaizdus, kuomet maišymo elementai yra SWV tipo, matome, jog vienas didelis sūkurys, maždaug 2,6 karto didesnis nei SV tipo atveju, susidaro iš dviejų mažesnių sūkurių susijungimo iškart po maišymo elementų pratekėjimo. Šių sūkurių forma yra elipsinė. SV tipo atveju lokalizuoti maži sūkuriai prisideda prie fluideo

maišymosi labai ribotame tarpkanalinės erdvės tūryje. Skersiniai srautai tarp gretimų tarpkanalinių erdvių šiuo atveju yra intensyvūs ir stipriai prisideda prie energijos mainų jose. Taigi SV tipo distancinė gardelė užtikrina efektyvesnį maišymąsi tarp gretimų tarpkanalinių erdvių negu tarpkanalinės erdvės viduje. SWV tipo atveju susidaręs sūkurys pagerina masės mainus tarpkanalinės erdvės viduje, o tai paskirsto šiluminę energiją nuo kuro strypų po visą tarpkanalinę erdvę. Skersiniai srautai taip pat sukuriama, tačiau jie nėra tokie intensyvūs kaip SV tipo atveju. Taigi SWV tipo distancinė gardelė užtikrina geresnį šiluminį maišymąsi tarpkanalinės erdvės viduje, tačiau sukuria mažiau intensyvių skersinių maišymąsi tarp gretimų tarpkanalinių erdvių [18].

Xiang-Zhe CUI ir Kwang-Yong KIM [29] analizavo turbulentinius šilumos mainus kuro rinklės tarpkanalinėje erdvėje, srautui pratekant maišymo mentes. Savo darbe jie tyrė maišymo menčių (žr. 1.22 pav.) pasukimo kampo ( $15^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$  ir  $45^\circ$ ) sukeliama efektą srauto struktūrai ir šilumos mainams, analizuodami greičio ir slėgio laukus, turbulencijos intensyvumą, srauto maišymosi koeficientus, šilumos atidavimo koeficiento ir trinties koeficiento kitimą, naudodami trijų RANS metodą.

Yra keletas veiksnių įtakančių šilumos mainų tarpkanalinėse erdvėse pagerinimą, t.y. turbulentinės kinetinės energijos generavimas, skersinių srautų tarpkanalinėse erdvėse sukūrimas ir antrinių srautų atsiradimas. Šiuos veiksnis galima įtakoti optimizuojant distancinių gardelių maišymo elementų konstrukcijas.



1.22 pav. Maišymo menčių modeliai. Kairėje - NJ tipo maišymo mentės (naudotos Xiang-Zhe CUI ir Kwang-Yong KIM tyrime); Dešinėje - SV tipo maišymo mentės [29].

Atlikę skaičiavimus, mokslininkai nustatė, kad efektyviausiai sūkuris sukelia  $15^\circ$  kampu pasuktos maišymosi mentės (žr. 1.23 pav.). Didėjant atstumui nuo distancinės gardelės, sūkurių susidarymo koeficientas mažėja. Skersinių srautų koeficientas (žr. 1.23 pav.) tose vietose, kuriose didžiausias sūkurių susidarymo koeficientas (išskyrus NJ15 tipo mentes), yra mažiausias, kadangi stiprūs sūkuriai tarp tarpkanalinių erdvių stabdo skersinį fluido tekėjimą. Kai sūkuriai išnyksta, tuomet staiga padidėja skersinių srautų koeficientas, po to jis nykstamai mažėja, didėjant atstumui nuo distancinės gardelės. Pratekėjus maždaug 20 hidraulinių diametrų nuo NJ15, NJ25 ir SV tipo maišymo menčių, skersiniai srautai visai išnyksta, o tuomet, kai pasukimo kampas yra  $35^\circ$  ir  $45^\circ$ , skersiniai srautai vis dar egzistuoja. Tai reiškia, kad pasukimo kampui

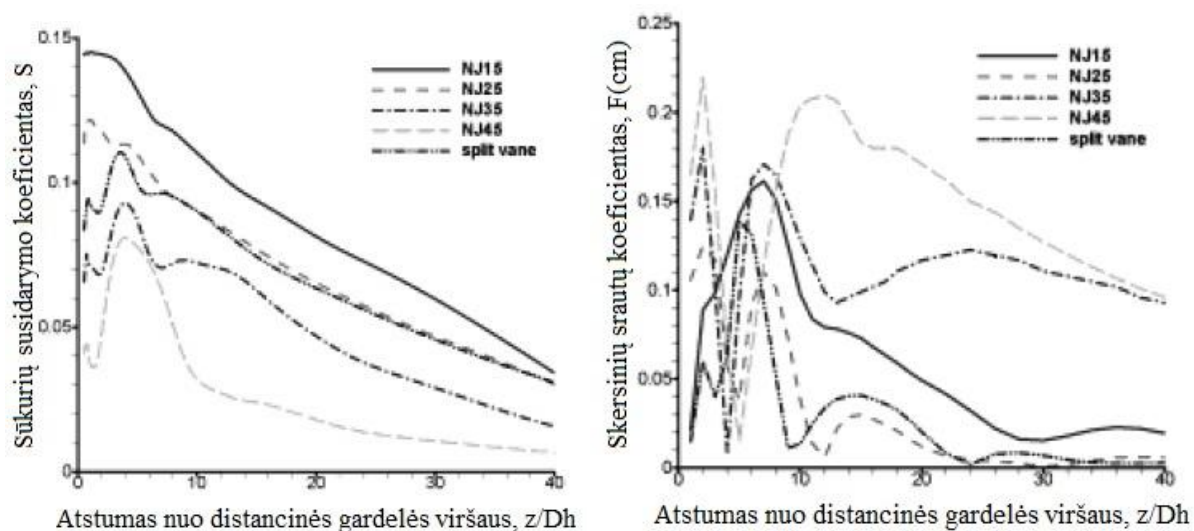


esant didesniai nei  $35^\circ$ , labai suaktyvėja skersiniai srautai. Visų tirtų maišymo menčių konstrukcijų trinties koeficientai skiriasi labai nedaug.

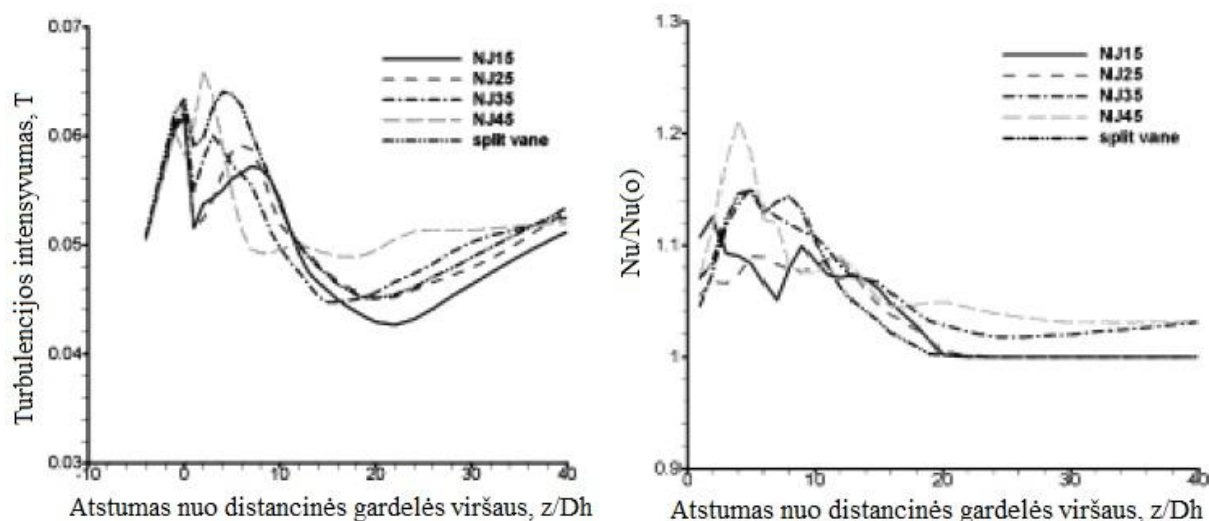
Ašinis turbulencijos intensyvumo pasiskirstymas buvo aprašytas 1.21 formule:

$$T_u = \sqrt{\frac{2k}{3V^2}}, \quad (1.21)$$

kur:  $T_u$  yra turbulencijos intensyvumas,  $k$  - turbulentinė kinetinė energija,  $V$  - vidutinis tarpkanalinės erdvės greitis.



1.23 pav. Sūkurių susidarymo koef. kitimas (kairėje) ir skersinių srautų koef. kitimas (dešinėje) [29].



1.24 pav. Turbulencijos intensyvumo kitimas (kairėje) ir Nu kriterijaus kitimas (dešinėje) [29].

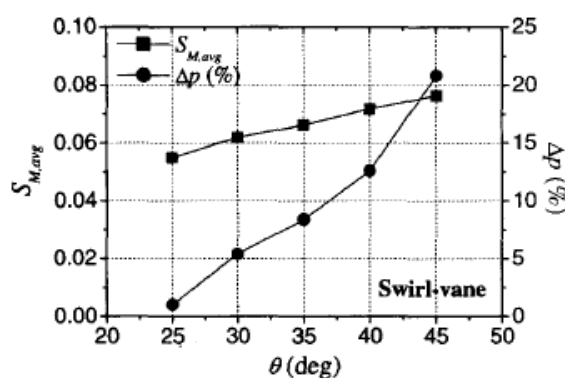
Iki 20 hidraulinių diametrų turbulencijos intensyvumas (žr. 1.24 pav.) mažėja dėl maišymo menčių sukeltos turbulencijos nykimo, tačiau po to pradeda vėl didėti dėl trinties su paviršiumi. NJ45 tipo maišymo mentės išlaiko didžiausią turbulencijos intensyvumą kanale. Ištyrę Nuselto kriterijaus kitimą (žr. 1.24 pav.), pamatė, kad, srautui pratekėjus maišymo mentes,

dėl priverstinio maišymosi šilumos atidavimo koeficientai staigiai padidėja, kol pasiekia piką ties 10 hidraulinių diametru, po to pradeda mažėti. Didžiausią šilumos mainų pagerinimo efektą sukūrė NJ45 tipo maišymo mentė su didžiausiu pasukimo kampu.

Pagaliau apibendrinę gautus rezultatus mokslininkai pateikė dvi svarbias išvadas:

1. Veiksniai, kurie smarkiai įtakoja šilumos mainų už distancinės gardelės pagerinimą, yra skersiniai srautai ir turbulencijos intensyvumas. Po 20 hidraulinių diametru nuo distancinės gardelės intensyvesni skersiniai srautai padidina turbulencijos intensyvumą ir pagerina šilumos atidavimą kanale. Maišymo mentės pasukimo kampas yra svarbus parametras, įtakoiantis skersinių srautų tekėjimą tarp tarpkanalinių erdvių. Didėjant pasukimo kampui, intensyvėja skersiniai srautai. Tačiau pasukimo kampas mažesnis nei 25° nėra efektyvus, siekiant pagerinti šilumos mainus.
2. Sūkuriai neturi didelio efekto šilumos mainams. Esant pastoviam srauto blokavimo santykiui, tiek sūkuriai, tiek skersiniai srautai smarkiai neįtakoja trinties koeficiento [29].

Wang Kee In, Dong Seok Oh, Tae Hyun Chun [27] savo tyrime nustatė distancinių gardelių su SWV tipo mentėmis santykinų slėgio nuostolių ir sūkurinio maišymosi priklausomybę nuo menčių pasvirimo kampo (žr. 1.25 pav.).



1.25 pav. SWV tipo distancinės gardelės maišymo menčių pasvirimo kampo įtaka slėgio nuostoliams ir sūkuriniam maišymuisi [27].

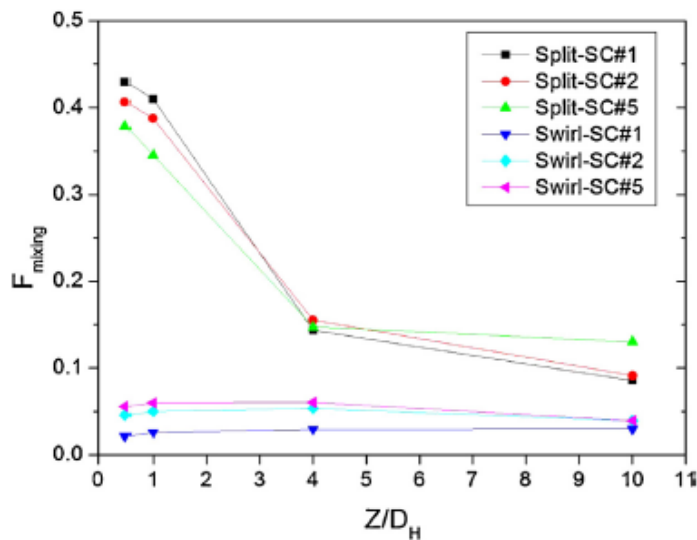
Iš grafiko matyti, jog, didėjant menčių pasvirimo kampui, didėja slėgio nuostoliai, o taip pat ir sūkurinis maišymasis [27].

Seok-Kyu Chang, Seok Kim, Chul-Hwa Song [30] savo tyrime išmatavo SWV tipo ir SV tipo distancinių gardelių sukiamą poveikį sūkurinio maišymosi stiprumui ir skersinio maišymosi tarp gretimų tarpkanalinių erdvių intensyvumui (žr. 1.26 pav. ir 1.27 pav.).

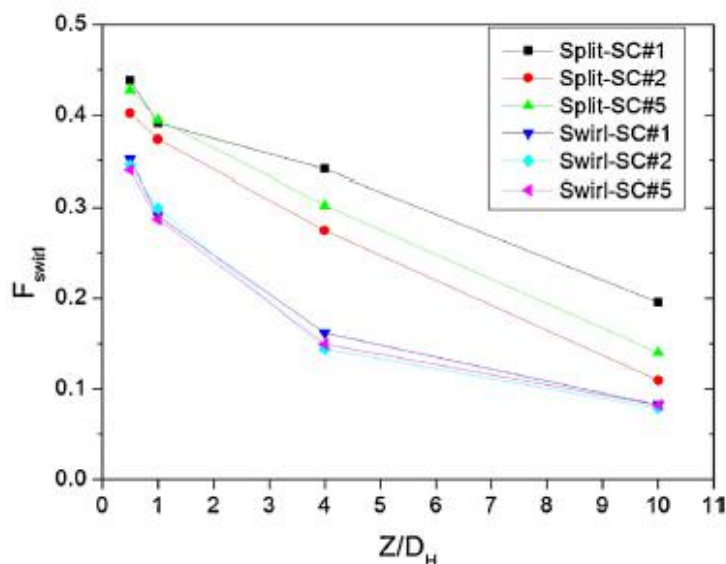
Iš 3.20 ir 3.21 paveikslų matyti, kad SWV tipo distancinės gardelės sukuria maždaug 1,2-2 kartus silpnesnius sūkurius palyginti su SV tipo gardelėmis, taip pat jos nesukuria intensyvaus skersinio maišymosi, visame aukštyje skersinio maišymosi intensyvumo koeficientas išlieka



beveik pastovus. Tuo tarpu SV tipo gardelės labai suintensyvina skersinį maišymąsi kanale, kuris staigiai mažėja keturis hidraulinius diametrus, po to mažėjimas tampa tolygesnis.



1.26 pav. Skirtingų maišymo menčių įtaka skersinio maišymosi intensyvumui tarp gretimų tarpkanalinių erdvių [30].



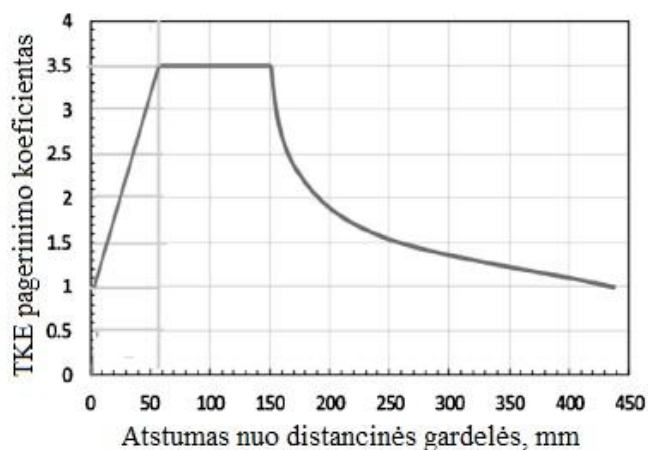
1.27 pav. Skirtingų maišymo menčių įtaka sūkurinio maišymosi stiprumui tarpkanalinėse erdvėse [30].

D.K. Chandraker, A.K. Nayak ir P.K. Vijayan [31] tyrė distancinės gardelės įtaką termohidrauliniams procesams BWR tipo reaktorių kuro rinklėse. Mokslininkai teigia, kad distancinės gardelės sukelia lašelių nusodinimo ant strypų paviršiaus efektą, o tai atitolina CHF. Lašeliai ant paviršiaus yra nusodinami, ir išlaikomas plėvelinis tekėjimas. Taip yra dėl greičio profilių pasikeitimo iš siauresnio kanalo į platesnį distancinės gardelės regione. Srautui pratekėjus distancinę gardelę, dėl greičio atsistatymo efekto pradeda veikti šoniniai greičio komponentai, kurie perneša vandens lašelius ant strypų paviršiaus (dreifuojančio greičio fenomenas). Taip pat papildomai skysčio plėvelė nusėdusi ant distancinės gardelės sienelių yra

ištumiama ir grąžinama ant kuro strypų paviršiaus. Tai yra pagrindiniai mechanizmai, padedantys drėkinti kuro strypų sienelės. Tyrėjai postuluoja, kad srauto turbulentinė kinetinė energija yra lašelių pernešimo varomoji jėga. Dėl šios priežasties mokslininkai įvedė turbulentinės kinetinės energijos pagerinimo rodiklį, kuris apskaičiuojamas pagal 1.22 lygtį:

$$TKEF = \frac{(TKE \text{ su distancine gardele})}{(TKE \text{ be distancinės gardelės})} \quad (1.22)$$

Tuomet panaudoję šią išraišką gavo turbulentinės kinetinės energijos pagerinimo rodiklio kitimo grafiką, srautui pratekėjus distancinę gardelę (žr. 1.28 pav.).



1.28 pav. Supaprastinto AHWR reaktoriaus distancinės gardelės modelio TKEF kitimo grafikas [31].

Iš 1.28 paveikslu matyti, kad turbulentinė kinetinė energija piką pasiekia ne iš karto pratekėjus distancinę gardelę, o tik po 50 mm. Taip yra dėl lašelių efekto. Nevertinant šio efekto, turbulentinės kinetinės energijos pikas gautųsi iš karto po distancinės gardelės.

## 2. KURO RINKLĖS SKAITINIS MODELIAVIMAS

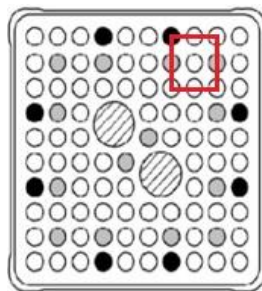
### 2.1. Kuro rinklės trimatis modelis SolidWorks aplinkoje

Svarbiausi GE14 kuro rinklės matmenys, naudoti braižant trimatį modelį, yra pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Pagrindiniai matmenys, naudoti braižant GE14 kuro rinklę.

Kuro strypai	
Kuro strypo ilgis, mm	4064
Pusinio ilgio kuro strypo ilgis, mm	2208
Kuro strypo išorinis skersmuo, mm	10,3
Atstumas tarp kuro strypų centrų, mm	12,95
Tarpas tarp kuro strypų, mm	2,65
Visas kuro strypo ilgis su kaiščiais, mm	4166,3
Kuro strypų kaiščiai	
Viršutinio kaiščio apatinės dalies spindulys, mm	4,15
Viršutinio kaiščio viršutinės dalies spindulys, mm	3,65
Viso viršutinio kaiščio ilgis, mm	58,65
Apatinio kaiščio viršutinės dalies spindulys, mm	5,15
Apatinio kaiščio apatinės dalies spindulys, mm	3,65
Viso apatinio kaiščio ilgis, mm	43,65
Distancinės gardelės	
Distancinės gardelės aukštis, mm	31
Atstumas tarp distancinių gardelių kuro rinklėje, mm	435,4
Atstumas tarp viršutinės distancinės gardelės ir viršutinės jungiančiosios plokštės, mm	580,8
Tarpas tarp kuro strypų ir distancinės gardelės vidinės sienelės, mm	0,825
Distancinės gardelės sienelės storis, mm	0,5
Jungiančiosios plokštės	
Jungiančiosios plokštės aukštis, mm	20
Jungiančiosios plokštės sienelės storis, mm	1
Jungiančiosios plokštės išorinis skylės skersmuo, mm	9,3
Jungiančiosios plokštės atstumas tarp skylių centrų, mm	12,95

Dėl nepakankamų kompiuterio resursų modeliuojant visą branduolinio kuro rinklę, buvo pasirinkta modeliuoti tik jos dalį. Siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus, yra būtina sugeneruoti kuo smulkesnį baigtinių tūrių tinklą, kuris leistų tinkamai apskaičiuoti kritinių zonų termohidraulinius parametrus. Tiriamoji kuro rinklės dalis yra pavaizduota 2.1 pav., ir ją sudaro vienas viso ilgio kuro strypas, du pusiniai pusės ilgio kuro strypai, du pusiniai viso ilgio kuro strypai, keturi viso ilgio kuro strypų ketvirčiai, aštuonios distancinės gardelės ir dvi jungiančiosios plokštės. Ši modeliuojama dalis užima 24-ąją kuro rinklės tūrio dalį. Pagal šią proporciją atitinkamai nustatytos srauto kraštinės sąlygos ir įėjimo termohidrauliniai parametrai.



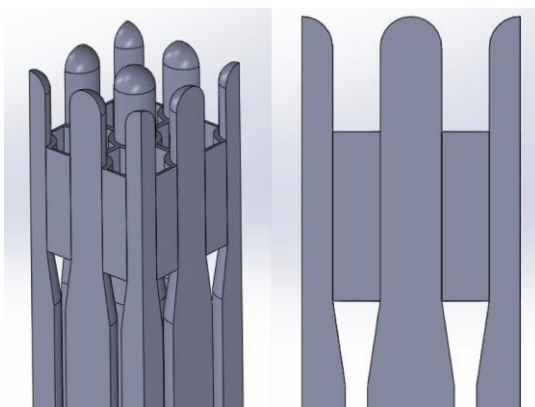
2.1 pav. Tiriamoji kuro rinklės dalis.

Sumodeliuota kuro rinklė su matmenimis (*mm*) bei atstumais (*mm*) tarp distancinių gardelių yra pavaizduota 2.2 pav.



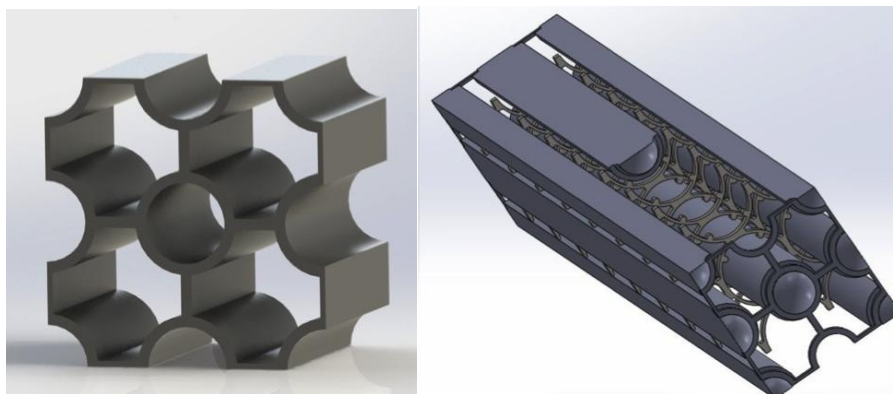
2.2 pav. Sumodeliuota kuro rinklė su matmenimis.

Sumodeliuoti kuro strypų apatiniai kaiščiai yra pavaizduoti 2.3 pav.



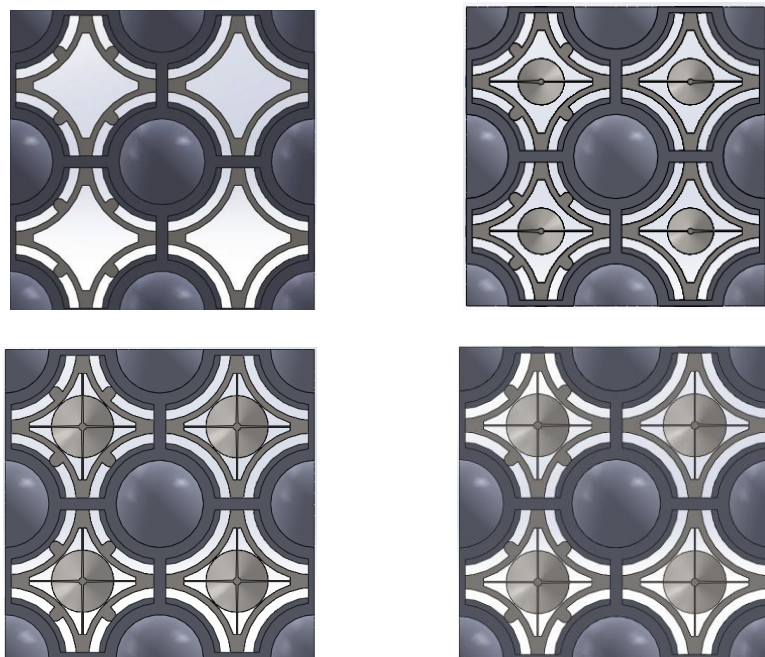
2.3 pav. Kuro strypų apatiniai kaiščiai.

Sumodeliuotos GE14 kuro rinklės vaizdas iš šono ir jungiančiosios plokštės modelis pavaizduoti 2.4 pav.



2.4 pav. Jungiančioji plokštė (kairėje) ir sumodeliuota kuro rinklė iš šono (dešinėje).

Sumodeliuotų kuro rinklių su skirtingomis distancinėmis gardelėmis vaizdai iš viršaus yra pavaizduoti 2.5 pav.

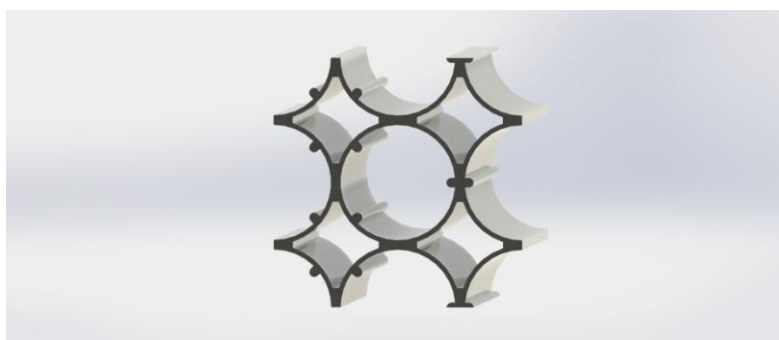


2.5 pav. Kuro rinklės vaizdas iš viršaus. Viršuje kairėje - atskaitos modelio; viršuje dešinėje - kuro rinklė su 1-ojo tipo sraigtais; apačioje kairėje - kuro rinklė su 2-ojo tipo sraigtais; apačioje dešinėje - kuro rinklė su 3-ojo tipo sraigtais.

### 2.1.1. Atskaitos modelio distancinė gardelė

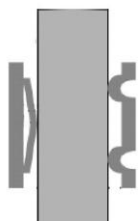
Šiame darbe bus tiriama distancinių gardelių konstrukcijos įtaka termohidrauliniams procesams. Atskaitos modeliu pasirinkta distancinė gardelė be maišymo elementų (žr. 2.6 pav.), kuri buvo tiriama bakalauro baigiamajame darbe. Atlikus skaičiavimus, bus lyginama modifikuotų distancinių gardelių konstrukcijų įtaka termohidrauliniams procesams su šiuo atskaitos modeliu.

Maišymo elementų nebuvimas sąlygoja mažesnius slėgio nuostolius, tačiau nesukuriamas toks efektyvus turbulencinis maišymasis, kaip jiems esant. Atlikus detalius skaičiavimus, bus analizuojama, ar apsimoka intensyvinti turbulentinį maišymąsi, taip sukeliant papildomus slėgio nuostolius, ar geriau palikti konstrukciją be maišymo elementų.



2.6 pav. Atskaitos modelio distancinė gardelė be maišymo elementų.

Realiu atveju distancinė gardelė įtvirtina kuro strypus, liesdamasi su jais penkiuose taškuose skirtingose pusėse. Vienoje kuro strypo pusėje keturios sferinės bangelės liečiasi su kuro strypu - dvi bangelės distancinės gardelės apačioje ir dvi viršuje. Kitoje pusėje yra vienas metalinis elementas, kuris liečiasi su kuro strypu ties distancinės gardelės centru. Modeliuojant distancinę gardelę, buvo atlikti tam tikri supaprastinimai, siekiant išvengti nesklandumų, modeliuojant tinklę. Šie supaprastinimai smarkiai neįtakos rezultatų tikslumo, kadangi sumodeliuoti lietimosi elementai blokuoja panašią srauto skerspjūvio dalį. Realus distancinių gardelių sąlytis su kuro strypu yra pavaizduotas 2.7 pav. [26].



2.7 pav. Realus distancinių gardelių sąlytis su kuro strypu [26].

### 2.1.2. Modifikuotos konstrukcijos distancinės gardelės

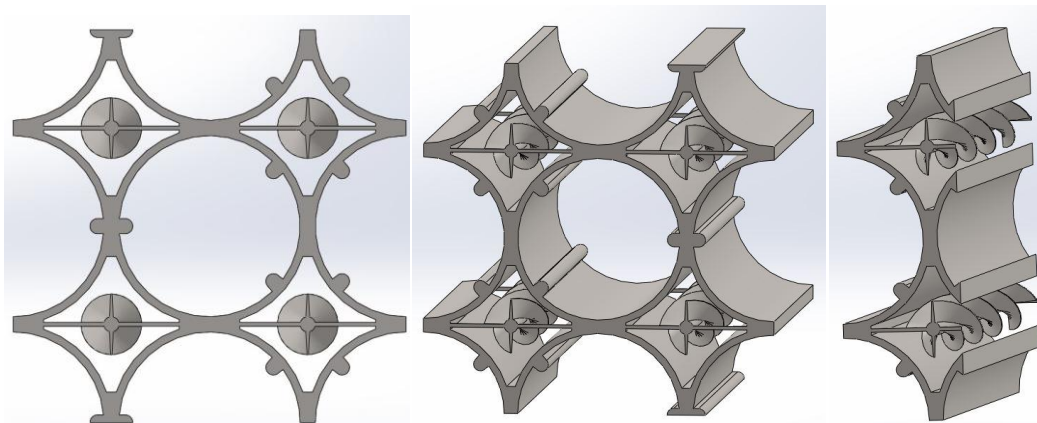
Šiame darbe bus tiriamos trijų skirtingų konstrukcijų modifikuotos distancinės gardelės bei jų įtaka termohidrauliniams procesams. Modifikuotos konstrukcijos buvo projektuojamos, remiantis distancinės gardelės be maišymo elementų modeliu, papildomai nubraižant trijų tipų sraigtus (žr. 2.8 pav., 2.9 pav., 2.10 pav.). Šie sraigtai įtekantį srautą į distancinės gardelės regioną išsuka, taip sukurdami dirbtinius sukurius, padidindami srauto turbulentiškumą, o taip pat ir suintensyvindami šilumos mainus kuro rinklėje.

Pagrindiniai modifikuotų distancinių gardelių parametrai yra pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Pagrindiniai modifikuotų distancinių gardelių parametrai

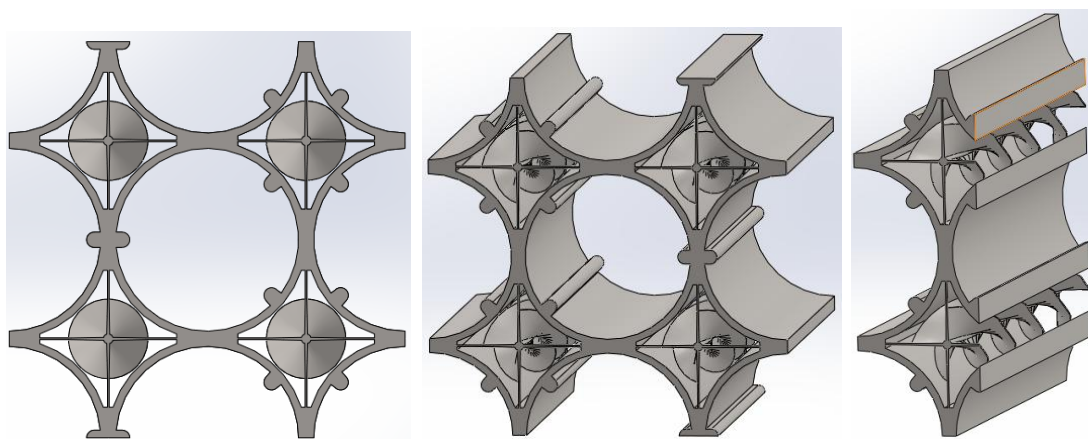
	Distancinės gardelės tipas		
	Distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais	Distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais	Distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais
Sraigto bendras ilgis, mm	31	31	31
Sraigto eigų skaičius	4	4	1
Sraigto šerdies skersmuo, mm	1,0	0,64	0,64
Spiralės sienelės storis, mm	0,1	0,1	0,1
Spiralės išnesimo ilgis nuo šerdies, mm	1,75	2,28	2,28
Hidraulinis skersmuo distancinės gardelės regione (su visais kuro strypais), mm	2,034	1,951	2,232
Hidraulinis skersmuo distancinės gardelės regione (kai baigiasi pusinio ilgio kuro strypai), mm	2,962	2,829	3,252





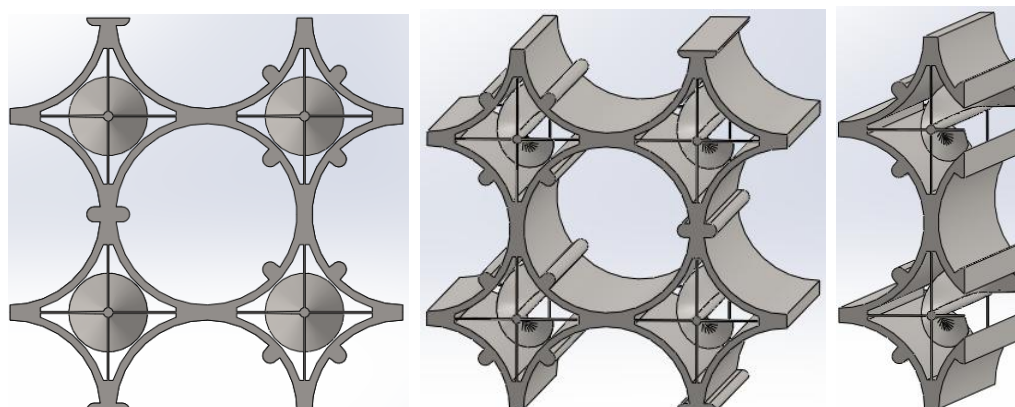
2.8 pav. GE14 distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais.

Distancinėje gardelėje su 1-ojo tipo sraigtais yra sumodeliuoti keturi sraigtais, turintys 4 eigių spirales. Šie sraigtais neužima maksimalios tarpkanalinės erdvės skerspjūvio ploto, todėl mažiau blokuoja tekančią srautą palyginti su 2-ojo tipo sraigtais. Šio tipo sraigčių šerdies skersmuo yra didžiausias iš visų trijų konstrukcijų. Kadangi šių sraigčių paviršiaus plotas yra mažesnis nei 2-ojo tipo sraigčių, tai ir trinties slėgio nuostoliai turėtų būti mažesni.



2.9 pav. GE14 distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais.

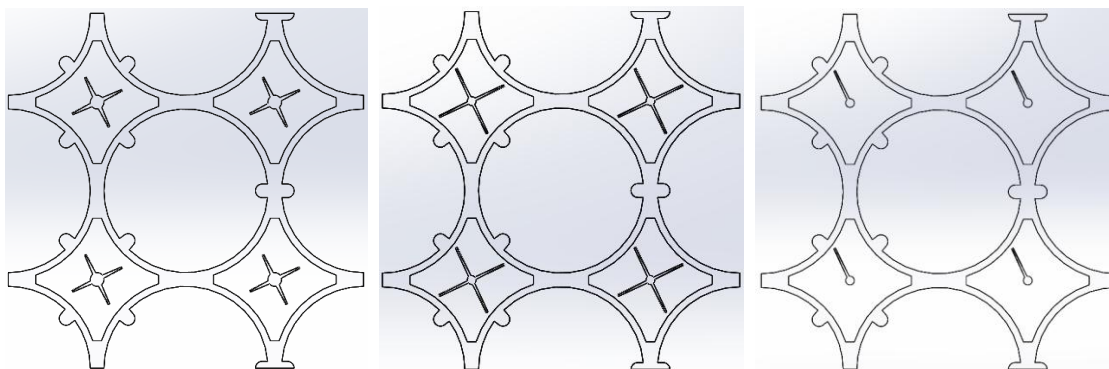
Distancinės gardelės su 2-ojo tipo sraigtais užimamas srauto skerspjūvio plotas yra didžiausias, todėl srauto blokavimas taip pat bus didžiausias, kaip ir trinties slėgio nuostoliai kanale.



2.10 pav. GE14 distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.

Distancinės gardelės su 3-ojo tipo sraigtais yra suprojektuotos su keturiais vienos eigos sraigtais. Pamatavus distancinės gardelės pjūvio užimamą skerspjūvio plotą, pastebime, kad šio tipo distancinės gardelės mažiausiai blokuoja srautą, o taip pat ir jų paviršiaus plotas yra mažiausias palyginti su 1-ojo ir 2-ojo tipo distancinėmis gardelėmis, todėl slėgio nuostoliai dėl trinties šio tipo konstrukcijoje bus mažiausi.

Atitekėjęs vandens-garo srautas patenka į tarpkanalinę erdvę, kurioje yra sraigtas. Dėl sumažėjusio srauto skerspjūvio ploto padidėja tekėjimo greitis. Sraigto kreipiančiosios konstrukcijos srautą įsuka, sukuria dirbtinį sūkurį - dėl to padidėja turbulencinis maišymasis. Dėl šių faktorių šilumos nuvedimas nuo kuro strypų turėtų suintensyvėti, kas leistų padidinti reaktoriaus galią. 2.11 paveiksle pavaizduoti skirtingų tipų distancinių gardelių pjūviai, šie pjūviai parodo, kokį fluido skerspjūvio plotą blokuoja distancinės gardelės.



2.11 pav. Distancinių gardelių pjūvis. Kairėje - distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, viduryje - distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, dešinėje - distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.

Atliekant skaitinį modeliavimą, bus stengiamasi nustatyti optimaliausią distancinės gardelės konstrukciją, kuri labiausiai suintensyvins turbulentinį maišymąsi ir šilumos mainus kanale, taip pat bus atsižvelgiama į slėgio nuostolius kanale.

## 2.2. ANSYS CFX matematiniai modeliai

Šiame darbe skaitiniam kuro rinklės modeliavimui buvo naudojamas ANSYS CFX v.14.5 fluidų dinamikos skaičiavimo programinis paketas.

ANSYS CFX yra aukštos kokybės bendrosios paskirties fluidų dinamikos skaičiavimo programinis paketas, kuris jau daugiau kaip 20 metų yra taikomas įvairioms fluidų srautų problemoms spręsti. ANSYS CFX naudoja pažangias sprendimo priemonių technologijas, kurios leidžia greitai gauti patikimus ir tikslius rezultatus. Sprendimo priemonių modernumo pagrindas yra galimybė pasirinkti iš daugybės skirtingų fizikinių modelių, leidžiančių užfiksuoti ir išspręsti beveik visų tipų reiškinius, susijusius su fluidų tekėjimu. Sprendimo priemonės ir daugybė



fizikinių modelių yra sujungti modernioje, intuityvioje ir lanksčioje grafinėje vartotojo sąsajoje bei vartotojo aplinkoje, su plačiomis pritaikymo ir automatizavimo galimybėmis, naudojant sesijos failus, scenarijus ir galingą programavimo kalbą [10]. Efektyvūs ir sudėtingi algoritmai leidžia tinkamai atsižvelgti į sudėtingas srauto geometrijos detales. Reglamentuotas dalinių diferencialinių lygčių rinkinys yra diskretizuojamas, tiesiškai priartėjama prie funkcijų reikšmės tam tikruose taškuose, galiausiai lygtys išsprendžiamos, naudojant pažangius iteracinius metodus, taip nustatant srauto laukus prie iš anksto nustatytų tinklelio mazgų. CFX remiasi baigtinių tūrių metodu, nestruktūrinių tinklelių formulavimu ir turi didelį pasirinkimo diapazoną fizikiniams ir skaitiniams problemos modeliavimams [14].

ANSYS CFX programų pakete naudojami fizikiniai ir matematiniai modeliai, kurie buvo taikomi baigiamojo darbo skaičiavimuose, yra aprašyti sekančiuose skyreliuose.

### **2.2.1. Daugiafazių srautų teorija**

Daugiafazis srautas - tai toks srautas, kuriame yra daugiau negu vienas fluidas. Dažniausiai fluidas susideda iš kelių skirtingų cheminių medžiagų, tokių kaip oras-vanduo. Mūsų tiriamu atveju daugiafazį srautą sudaro skirtingų termodinaminių fazių ta pati cheminė medžiaga, t.y. garas-vanduo. Daugiafaziam sraute tariama, jog fluidai yra susimaišę makroskopinių dydžių skalėse, žymiai didesnėse nei molekulinės skalės, esančios daugiakomponentiniame sraute. Pavyzdys gali būti garo burbuliukai vandenyje arba vandens lašeliai gare. Šiuo atveju yra būtina spręsti kiekvieno fluideo skirtingus greičių ir temperatūrų laukus. Fluidai tarpusavyje kontaktuoja tarpfazinėmis jėgomis, šilumos ir masės perdavimu per fazių sąsajas, pavyzdžiui, jei šaltos ir drėgnos dalelės yra įleidžiamos į greitai judantį garo srautą, jos bus pagreitinamos, pašildomos ir išdžiovinamos. ANSYS CFX įtraukia įvairius daugiafazių srautų skaičiavimo modelius, skirtus skirtingų fluidų srautų, burbuliukų, lašelių, kietų dalelių ir laisvų paviršių srautų simuliacijoms atlikti. ANSYS CFX leidžia pasirinkti iš dviejų skirtingų daugiafazių srautų modelių – Eulerio-Eulerio daugiafazis modelis ir Lagranžo dalelių sekimo daugiafazis modelis [9].

### **2.2.2. Daugiafazių srautų homogeninis modelis**

Homogeninis daugiafazis srautas yra išskirtinis Eulerio-Eulerio daugiafazių srautų modelio atvejis, kur visi fluidai dalinasi tarpusavyje tuos pačius greičio, temperatūros, turbulencijos, slėgio ir kitus laukus [9]. Tai leidžia atlikti tam tikrus supaprastinimus kelių fluidų modelyje. Duotame transportavimo procese homogeninis modelis užtikrina, kad visi transportuojami dydžiai, išskyrus tūrinę dalį, bus vienodi visoms to proceso fazinėms būsenoms, tai yra:

$$\phi_{\alpha} = \phi \quad 1 \leq \alpha \leq N_p . \quad (2.1)$$

Kadangi transportuojami dydžiai yra bendri homogeniniame daugiafaziam sraute, užtenka spręsti tik bendrus laukus, naudojant tūrinės transportavimo lygtis, nei spręsti individualių fazių transportavimo lygtis.

Tūrinio transportavimo lygtys gali būti gaunamos, susumavus visų individualių fazių transportavimo lygtis, siekiant gauti vientisą srauto transportavimo lygtį:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho U\phi - \Gamma\nabla\phi) = S, \quad (2.2)$$

kur:

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_P} r_{\alpha}\rho_{\alpha} \quad (2.3)$$

$$U = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_P} r_{\alpha}\rho_{\alpha}U_{\alpha} \quad (2.4)$$

$$\Gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_P} r_{\alpha}\Gamma_{\alpha}. \quad (2.5)$$

Homogeninis modelis nebūtinai turi būti taikomas nuosekliai visoms lygtims. Pavyzdžiui, greičio laukas gali būti modeliuojamas kaip nehomogeninis, bet susietas su homogeniniu turbulencijos modeliu. Taip pat homogeninis greičio laukas gali būti susietas su nehomogeniais temperatūrų laukais. Papildomi homogeniniai kintamieji taip pat yra randami CFX programiniame pakete [8].

Kadangi homogeniniame srauto tekėjimo modelyje skirtingų fazių greičiai, temperatūros ir slėgiai yra laikomi vienodais, tai dvifazis srautas yra laikomas kaip vienas fluidas. Šis tekėjimo modelis yra pagrinde taikomas tokiomis sąlygomis, kai yra aukštas slėgis ir debitas. Homogeniniame modelyje slydimo koeficientas yra lygus vienetui, taigi ryšys tarp tūrinio ir masinio garingumų yra toks [22]:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \frac{\rho_{g\text{aro}}}{\rho_{v\text{andens}}}}. \quad (2.6)$$

### 2.2.3. Transportavimo lygtys

Lygtys, sprendžiamos ANSYS CFX aplinkoje, yra nepastoviosios Navjė-Stokso lygtys tvermės formoje. Pagrindinės transportavimo lygtys yra momentinės masės, momento ir energijos tvermės lygtys. Turbulenciniams srautams momentinės lygtys yra suvidurkinamos dėl papildomų sąlygų. Momentinės masės, momento ir energijos tvermės lygtys aprašomos taip :

Tęstinumo lygtis :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0. \quad (2.7)$$

Momento lygtys :

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M. \quad (2.8)$$

kur:  $\tau$  yra įtempimų tenzorius, susijęs su įtempimais tokia išraiška :

$$\tau = \mu \left( \nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right). \quad (2.9)$$

Suminės energijos lygtis :

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E, \quad (2.10)$$

kur:  $h_{tot}$  yra suminė entalpija, susijusi su statine entalpija  $h(T, p)$ , tokiu ryšiu :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2. \quad (2.11)$$

Išraiška  $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$  yra klampumo jėgų atliktas darbas.

Išraiška  $U \cdot S_M$  yra išorinių momento šaltinių atliktas darbas, tačiau šiuo metu yra nepaisomas [8].

Suminės energijos lygtis aprašo entalpijos transportavimą, įskaitant kinetinės energijos efektus. Ši lygtis turi būti naudojama ten, kur kinetinės energijos efektai yra labai žymūs, pavyzdžiui, dujų srautams, kurių Macho skaičius viršija 0,3 reikšmę [9].

Šiluminės energijos lygtis :

Šiluminė energijos lygtis yra supaprastinta suminės energijos lygtis, kuri yra tinkama lėtų greičių srautams. Bendroji šiluminės energijos lygties išraiška yra tokia :

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + U \cdot \nabla p + \tau : \nabla U + S_E. \quad (2.12)$$

Priimant tam tikras prielaidas, galima gauti kitokias bendrosios išraiškos formas.

Šiluminės energijos lygtis, nepaisant to, kad ji yra supaprastinta suminės energijos lygtis, gali būti naudinga tiek skysčių, tiek dujų modeliavimui, išvengiant potencialių stabilumo problemų, skaičiuojant suminės energijos lygtimi. Pavyzdžiui, šiluminės energijos lygtis yra dažnai naudojama trumpalaikiams skysčių modeliavimams. Iš kitos pusės, jei reikia gauti tikslesnius rezultatus, pavyzdžiui, garso greičio nustatymui arba aukštų greičių srautams, tuomet patartina naudoti suminės energijos lygtį [8]. Šiluminės energijos lygtis nuo suminės energijos lygties skiriasi tuo, kad ji neįvertina kinetinės energijos efektų [9].

#### 2.2.4. Turbulentiniai modeliai

Turbulencija - tai srauto dalelių svyravimai laike ir erdvėje. Tai yra sudėtingas procesas, kuris vyksta trijose dimensijose, yra nestabilus, susidaro skirtingų dydžių dalelių sūkuriai. Turbulencija pastebimai įtakoja srauto charakteristikas. Turbulencija susidaro, kai inercinės fluidų jėgos ženkliai viršija klampumo jėgas, ir pasižymi aukštu Reinoldso skaičiumi [8]. Turbulencijos modeliai yra naudojami, siekiant numatyti turbulencijos efektus fluidų srautams, išvengiant atskirų turbulencijos svyravimų skaičiavimų. Buvo sukurta daugelis modelių, paremtų RANS lygtimis, kurie gali būti naudojami, siekiant priartėti prie realių turbulentinių procesų. Kai kurie iš tų modelių gali būti naudojami tik specifiniams uždaviniams spręsti, kiti gali būti naudojami plačiau su priimtinu patikimumo laipsniu [9]. Iš esmės Navjė-Stokso lygtys aprašo tiek laminarinį, tiek turbulentinį srautus, nereikalaujamos papildomos informacijos. Tačiau turbulentiniai srautai prie realių Reinoldso skaičių aprėpia platų spektrą turbulentinių ilgių ir laiko skalių, kur turbulentiniai ilgiai paprastai yra žymiai mažesni nei mažiausio baigtinių tūrių

tinklelio elemento ilgis, kuris gali būti praktiškai naudojamas skaitiniame modeliavime. Tiesioginiam tokio tekėjimo skaitiniam modeliavimui reikėtų labai aukštų parametru kompiuterio, o tokių šiais laikais dar nėra sukurta. Tam, kad būtų galima įvertinti turbulencijos įtaką srautams, buvo atliekama daugybė mokslinių tyrimų, kurie akcentuoja turbulentinių modelių kurimą. Turbulentiniai modeliai buvo kuriami taip, kad kuo tiksliau įvertintų turbulencijos įtaką, nenaudojant pernelyg smulkaus tinklelio ir tiesioginio skaitinio modeliavimo. Dauguma turbulentinių modelių yra statistiniai [8].

### 2.2.5. Dviejų lygčių k-ε turbulentinis modelis

Dviejų lygčių turbulentiniai modeliai yra labai plačiai naudojami, kadangi siūlo gerą kompromisą tarp skaitinių bandymų ir kompiuterinio tikslumo. Dviejų lygčių modeliai yra daug modernesni nei nulinių lygčių modeliai. Greičio ir ilgio skaičiavimo sistemos naudoja skirtingas transportavimo lygtis, dėl to šie modeliai ir vadinami dviejų lygčių. Dviejų lygčių k-ε turbulencinis modelis remiasi gradiento difuzijos hipoteze, siekiant nustatyti ryšį tarp Reinoldso įtempimų ir vidutinių greičio gradientų bei turbulentinės klamos. Turbulentinė klampa yra modeliuojama kaip turbulentinio greičio ir turbulentinio ilgio skalių pasekmė. Dviejų lygčių modeliuose turbulentinio greičio skalė yra apskaičiuojama iš turbulentinės kinetinės energijos, kuri yra apskaičiuojama iš transportavimo lygčių. Turbulentinio ilgio skalė yra apskaičiuojama iš dviejų turbulentinio lauko savybių - dažniausiai turbulentinės kinetinės energijos ir jos sklaidos spartos. Turbulentinės kinetinės energijos sklaidos sparta yra apskaičiuojama iš transportavimo lygčių. Dviejų lygčių k-ε modelyje, k yra turbulentinė kinetinė energija ir yra apibrėžiama kaip greičio svyravimų pakitimas. Turbulentinės kinetinės energijos dimensijos yra  $L^2T^{-2}$  pavidalo, kur L-ilgio vienetas, T-laiko vienetas, pavyzdžiui,  $m^2/s^2$ . ε yra turbulentinių sukurių sklaida (greičio svyravimų išsisklaidymo tempas), matavimo vienetas yra turbulentinė kinetinė energija k per laiko vienatę  $L^2T^{-3}$ , pavyzdžiui,  $m^2/s^3$ . Dviejų lygčių k-ε modelis įveda du naujus kintamuosius į lygčių sistemą.

Tęstinumo lygtis tuomet atrodo taip :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 . \quad (2.13)$$

Momento lygtis įgauna tokią išraišką:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M , \quad (2.14)$$

kur:  $S_m$  yra kūną veikiančių jėgų suma,  $\mu_{eff}$  yra efektyvioji klampa turbulencijos skaičiavimams,  $p'$  yra modifikuotas slėgis lygus :

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} . \quad (2.15)$$

Kadangi k-ε turbulencinis modelis, kaip ir nulinių lygčių modelis, yra paremtas sukurių klampumo konceptu, tai :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad (2.16)$$

kur:  $\mu_t$  yra turbulentinė klampa, k- $\epsilon$  turbulencinis modelis teigia, kad turbulentinė klampa priklauso nuo turbulentinės kinetinės energijos ir sūkurių sklaidos tokia išraiška :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (2.17)$$

kur:  $C_\mu$  yra konstanta, lygi 0,09 reikšmei.

k ir  $\epsilon$  reikšmės yra gaunamos tiesiogiai iš diferencialinių transportavimo lygčių, skirtų turbulentinei kinetinei energijai ir turbulencinių sūkurių sklaidai skaičiuoti :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon + P_{kb}, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon b}), \quad (2.19)$$

kur:  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  ir  $\sigma_\epsilon$  yra konstantos, lygios atitinkamai 1,44, 1,92, 1,0 ir 1,3.  $P_{kb}$  ir  $P_{\epsilon b}$  nariai yra atsakingi už plūdrumo jėgų įtaką.  $P_k$  yra turbulencijos atsiradimas dėl klampumo jėgų.

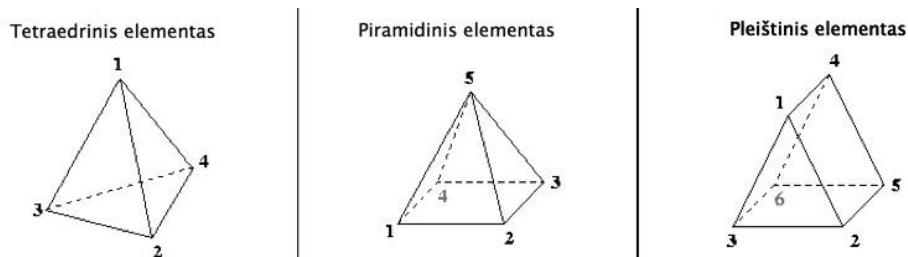
$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left( 3 \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right). \quad (2.20)$$

Nesuslegiamiesiems srautams dydis  $\left( \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right)$  yra mažas, o tai reiškia, jog antroji lygties dalis mažai prisideda prie turbulencijos atsiradimo. Suslegiamiesiems srautams šis dydis yra didelis tik regionuose, kuriuose greičio nukrypimai yra aukšti [8].

### 2.3. Baigtinių tūrių tinklelis

Siekiant kuo tiksliau nustatyti distancinių gardelių su maišymo elementais įtaką termohidrauliniams procesams, buvo nuspręsta tirti atskirų distancinių gardelių regionus, padalintus į 170 mm ilgio kuro rinklės pjūvius. Buvo tiriamos keturių skirtingų konstrukcijų distancinės gardelės - be maišymo elementų, su 1-ojo tipo sraigtais, su 2-ojo tipo sraigtais ir su 3-ojo tipo sraigtais, aprašytas 3.3 skyriuje. Distancinių gardelių pozicija kuro rinklėje taip pat svarbus veiksnys, dėl to pasirinkta tirti 2-ąją, 4-ąją, 6-ąją ir 8-ąją gardeles. 2-oji ir 4-oji gardelės patenka į kuro rinklės dalį, kai yra visi kuro strypai, o 6-oji ir 8-oji gardelės yra toje dalyje, kai baigiasi pusinio ilgio kuro strypai. Pagaliau, įvertinus skirtingų distancinių gardelių įtaką ir nustačius šilumos mainų pagerinimo požiūriu pačią efektyviausią konstrukciją, buvo tiriama visa kuro rinklė. Bendras kuro rinklės ilgis yra 4166,3 mm. Siekiant sukurti kuo tikslesnį ir smulkesnį baigtinių tūrių tinklelį, tam, kad gautume adekvačius rezultatus, kuro rinklė buvo padalinta į keturias dalis pagal ilgį. Pirmoji tiriama kuro rinklės dalis užima atstumą nuo 0 mm iki 1042,1 mm ilgio. Antroji dalis užima atstumą nuo 1042,1 mm iki 2084,2 mm ilgio. Trečioji dalis užima atstumą nuo 2084,2 mm iki 3216,3 mm ilgio. Ketvirtoji dalis užima atstumą nuo 3216,3 mm iki 4166,3 mm. Toks būdas buvo pasirinktas dėl nepakankamų kompiuterio resursų, siekiant sukurti

tinklelį visai kuro rinklei iš karto. Sukurtus tinklelius sudaro tetraedriniai, pleištiniai ir piramidiniai baigtinių tūrių elementai, jie pavaizduoti 2.12 pav.



2.12 pav. Tiriamuoju atveju baigtinių tūrių tinklelį sudarantys elementai [32].

Bendra informacija apie kiekvienai tiriamai kuro rinklės daliai sukurtų baigtinių tūrių tinklelių elementų ir mazgų skaičių bei elementų tipus ir asimetrijos rodiklį yra pateikta 2.3 ir 2.4 lentelėse.

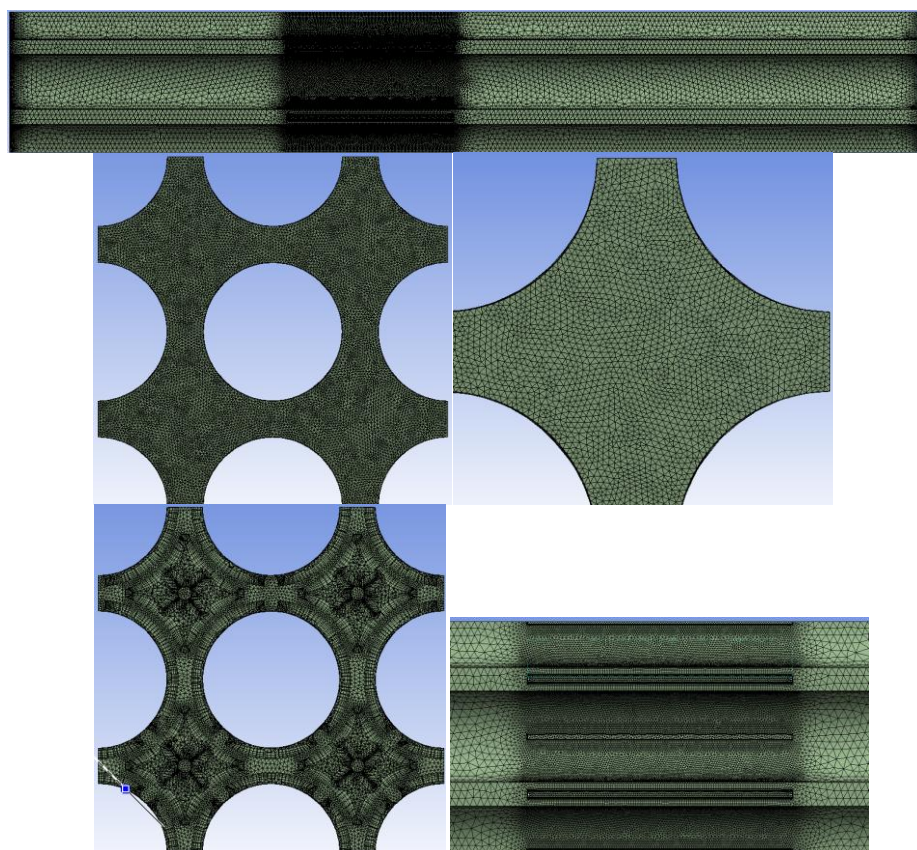
2.3 lentelė. Tiriamų distancinių gardelių zonų (170mm ilgio) tinklelių duomenys.

Tiriamoji konstrukcija	Gardelės pozicija	Mazgų skaičius, vnt.	Tinklelio elementų skaičius, vnt.	Tetraedrinių el. skaičius, vnt.	Pleištinių el. skaičius, vnt.	Piramidinių el. skaičius, vnt.	Vid. Asimetrijos rodiklis
Distancinė gardelė be maišymo elementų	2	1679268	4837137	2759392	2064263	13482	0,269
	4	1680540	4872166	2806487	2049828	15851	0,269
	6	1676129	5104121	3116360	1969224	18537	0,269
	8	1685112	5085510	3064486	2003272	17752	0,272
Distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais	2	1668903	4742977	2633998	2074808	34171	0,281
	4	1666279	4762698	2669988	2055829	36881	0,281
	6	1643622	4912108	2908242	1964683	39183	0,279
	8	1673800	4951692	2889362	2027047	35283	0,281
Distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais	2	1061620	5184343	5184343	0	0	0,236
	4	1883080	5393327	3027093	2300907	65327	0,284
	6	1089453	5426757	5426757	0	0	0,236
	8	1905861	5632118	3275864	2293209	63045	0,283
Distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais	2	840770	4092397	4092397	0	0	0,236
	4	846682	4130418	4130418	0	0	0,236
	6	839444	4181182	4181182	0	0	0,235
	8	803599	3979359	3979359	0	0	0,236

2.4 lentelė. Tiriamų kuro rinklių tinklelių duomenys.

Kuro rinklė	Tiriamos kuro rinklės dalis	Tiriamos kuro rinklės dalies ilgis, mm	Tinklelio mazgų skaičius, vnt.	Tinklelio elementų skaičius, vnt.	Tetraedrinių elementų skaičius, vnt.	Pleištinių elementų skaičius, vnt.	Piramidinių elementų skaičius, vnt.	Vid. Asimetrijos rodiklis
GE14 su distancinėm gardelėm be maišymo elementų	1 dalis	1042,1	1957675	5733125	3562536	2142391	28198	0,281
	2 dalis	1042,1	1869529	5500919	3458582	2016022	26315	0,277
	3 dalis	1132,1	2041517	5763787	3357348	2373334	33105	0,281
	4 dalis	950	1477670	4803511	3341983	1443374	18154	0,269
GE14 su distancinėm gardelėm su 1-ojo tipo sraigtais	1 dalis	1042,1	1455475	6799696	6799696	0	0	0,253
	2 dalis	1042,1	1328819	6162509	6162509	0	0	0,250
	3 dalis	1132,1	1022632	4653032	4653032	0	0	0,247
	4 dalis	950	951305	4596533	4596533	0	0	0,242

Tiriamai 4-os pozicijos distancinės gardelės su 1-ojo tipo sraigtais zonai sukurto baigtinių tūrių tinklelio vaizdai yra pateikti 2.13 pav.



2.13 pav. 4-os pozicijos distancinės gardelės su 1-ojo tipo sraigtais baigtinių tūrių tinklelis. Viršuje - tiriamos zonos tinklelis iš šono, viduryje kairėje pusėje - tinklelis išėjime, viduryje dešinėje pusėje - tarpkanalinės erdvės tinklelis išėjime, apačioje kairėje pusėje - tinklelis pjūvyje ties distancine gardele, apačioje dešinėje pusėje - tinklelis ties distancine gardele iš šono.

## 2.4. Kraštinės sąlygos

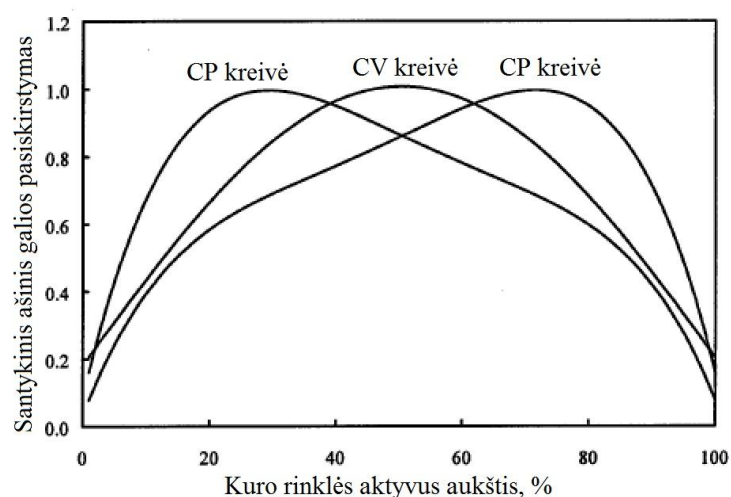
Atliekant skaitinį GE14 kuro rinklės termohidrodinaminių procesų modeliavimą, buvo priimtos tokios kraštinės sąlygos:

- Šilumnešio temperatūra įėjime: 278,33°C.
- Šilumnešio slėgis įėjime: 7,17 MPa.
- Šilumnešio debitas įėjime: 0,6899 kg/s.
- Greičio komponentė ašine kryptimi: 1,2 m/s.
- Vandens masinė dalis įėjime: 1.
- Turbulencija įėjime: vidutinė (Intensyvumas = 5%).

Taip pat buvo naudojamas „*Buoyancy*” modelis, kuriame pagreitis ašine kryptimi buvo nustatytas reikšmei, lygiai neigiamam laisvojo kritimo pagreičiui –g. Atskaitomasis šio modelio tankis buvo nustatytas reikšmei, lygiai 37,52 kg/m<sup>3</sup>.

Turbulencijos reiškiniams numatyti, atliekant skaičiavimus, buvo naudojamas k-Epsilon modelis. Vandens ir garo parametrų apskaičiuoti buvo naudojami duomenys iš IAPWS-97 duomenų bazės. Aprašant vandens-garo mišinį, buvo pasirinktas homogeninis dvifazio mišinio modelis.

Aprašant šilumos srautą kuro rinklėje, buvo naudojami Hitachi pateikti eksploataciniai duomenys [12], ir buvo pasirinkta ciklo pradžios kreivė (žr. 2.14 pav.). Naudojant Microsoft Excel programą, buvo nubraižytas ašinis galios pasiskirstymas GE14 kuro rinklėje (žr. 2.15 pav.), naudojant polinominės krypties linijos funkciją, buvo gauta šeštos eilės polinomo lygtis (2.21), aprašanti galios kitimo funkciją.

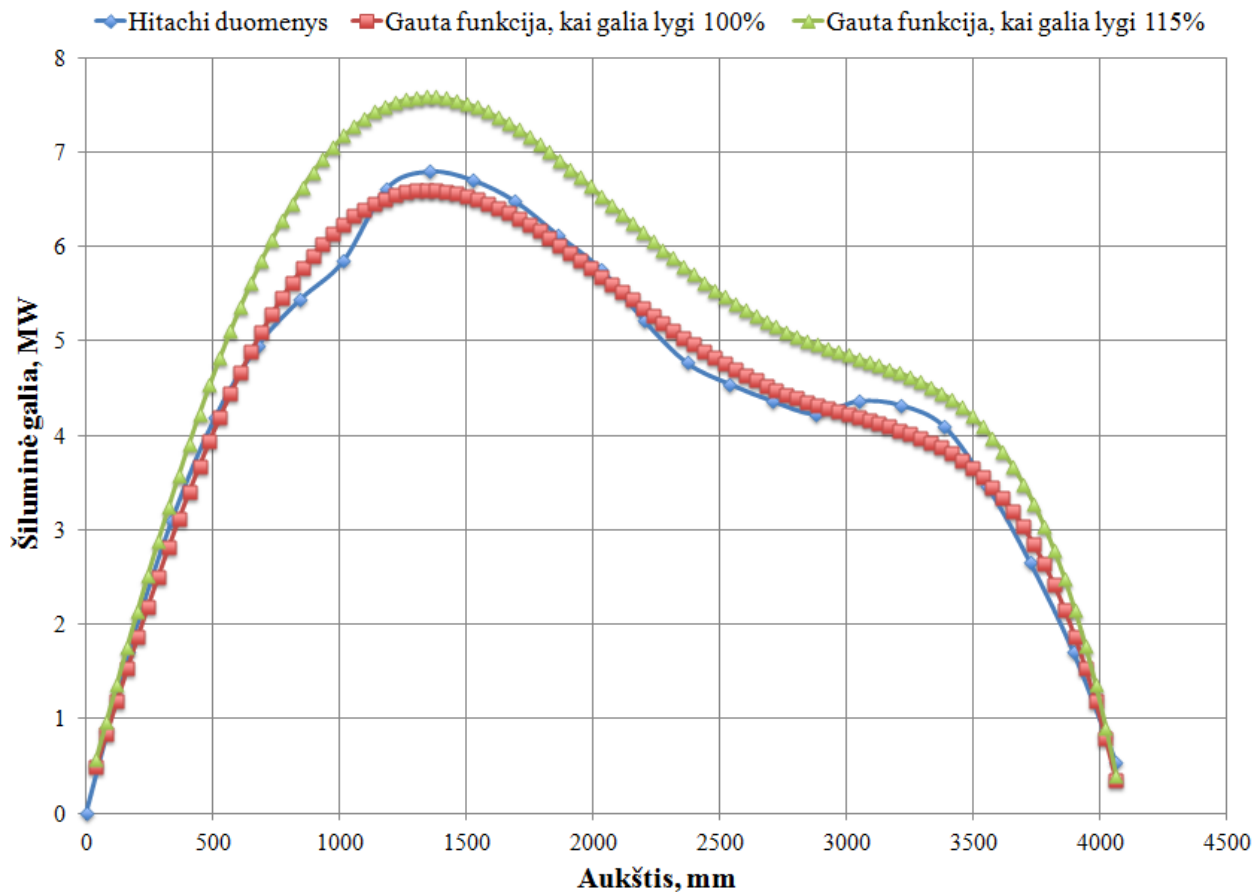


2.14 pav. Skirtingų branduolinio kuro ciklų reaktoriuje santykinis ašinis galios pasiskirstymas

Šeštos eilės polinomo išraiška yra tokia :

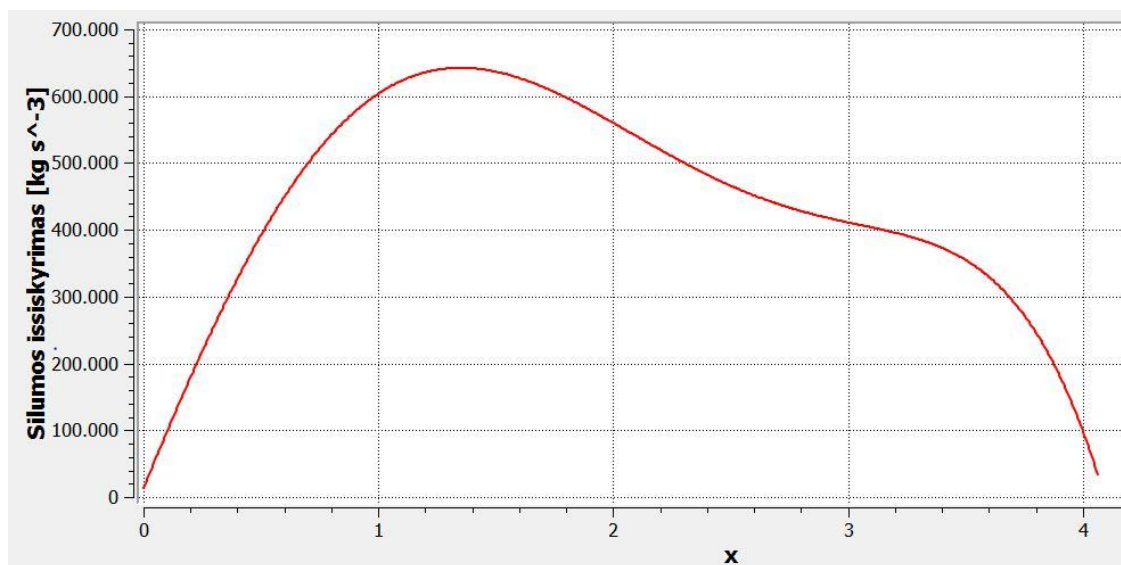
$$y = -5,46 \cdot 10^{-22} \cdot x^6 - 1,58 \cdot 10^{-16} \cdot x^5 + 1,37 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 3,29 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 5,47 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 8,69 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (2.21)$$





2.15 pav. GE14 kuro rinklės ašinis galios pasiskirstymas Hitachi pateiktais eksploataciniais duomenimis (mėlyna kreivė), gautos polinominės kitimo funkcijos kreivė, kai galia lygi 100% (raudona kreivė) ir kai galia lygi 115% (žalia kreivė).

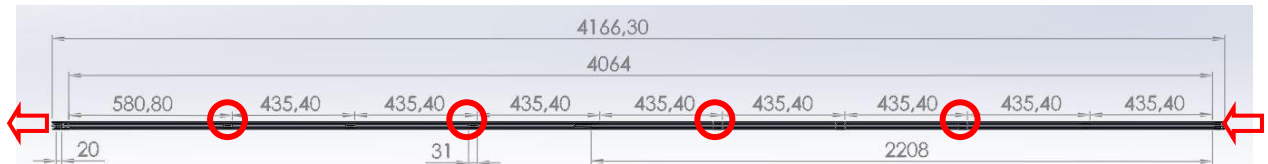
Įkėlus šią (2.21) šeštos eilės polinomo lygtį į ANSYS CFX ir ją tinkamai sutvarkius, buvo gautas šilumos srauto tankio ( $W/m^2=kg/s^3$ ) per kuro elemento aukštį grafikas, kuris pavaizduotas 2.16 pav.



2.16 pav. Ašinis šilumos srauto tankio per kuro elemento aukštį pasiskirstymas ANSYS CFX aplinkoje.

### 3. REZULTATŲ ANALIZĖ

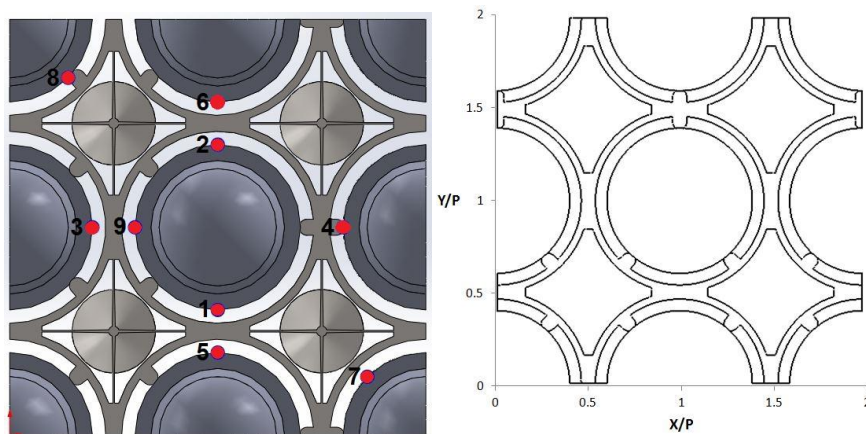
Šiame darbe buvo tiriama keturių skirtingų distancinių gardelių konstrukcijų - be maišymo elementų (atskaitos modelis) ir su 1-ojo, 2-ojo ir 3-ojo tipo sraigtiniais maišymo elementais (žr. 2.6 pav., 2.8 pav., 2.9 pav. ir 2.10 pav.), įtaka termohidrauliniams procesams. Šių distancinių gardelių pozicija kuro rinklėje - taip pat svarbus veiksnys, dėl to buvo pasirinkta tirti 2-os, 4-os, 6-os ir 8-os pozicijos distancines gardeles (žr. 3.1 pav.).



3.1 pav. Tiriamosios distancinių gardelių pozicijos kuro rinklėje.

Šių tiriamų distancinių gardelių regionai buvo padalinti į 170 mm ilgio kuro rinklės pjūvius, siekiant tiksliai įvertinti termohidraulinius procesus tiek prieš distancinę gardelę, tiek už jos. Šis pjūvis atitinka 20 hidraulinių diametrų atstumą iki distancinės gardelės ir 40 hidraulinių diametrų atstumą, srautui ją pratekėjus.

Skirtingų distancinių gardelių tyrimo tikslas yra nustatyti optimaliausią gardelės konstrukciją, atsižvelgiant į sukeliama turbulencijos intensyvumą ir sūkurių susidarymą, šilumos mainų pagerinimą ir slėgio nuostolius kanale. Siekiant kaip įmanoma tiksliau nustatyti kiekvienos konstrukcijos šilumos atidavimo koeficiento kitimą, buvo pasirinkta tirti 9 charakteringus taškus prie kuro strypų paviršiaus (žr. 3.2 pav.).



3.2 pav. Charakteringi šilumos atidavimo koeficiento tyrimo taškai (kairėje) ir skersinių termohidraulinių procesų distancinėje gardelėje tyrimų koordinatės (dešinėje).

Per šiuos charakteringus taškus buvo išvestos ašinės linijos per visą tiriamos zonos aukštį. Kiekviename iš charakteringų taškų buvo skaičiuojama vidutinė šilumos atidavimo koeficiento reikšmė per tiriamą aukštį, o tuomet pagal 3.1 formulę buvo išvestas šilumos atidavimo

koeficiento pokytis lyginant su distancinės gardelės be maišymo elementų reikšmėmis (žr. 3.1 lentelę).

3.1 lentelė. Skirtingų konstrukcijų ir pozicijų distancinių gardelių šilumos atidavimo koeficientų reikšmės ir pokytis lyginant su atskaitos modeliu.

	Pozicija	Šilumos atidavimo koeficientas, W/m <sup>2</sup> K										Δh <sub>%</sub>
		1 taškas	2 taškas	3 taškas	4 taškas	5 taškas	6 taškas	7 taškas	8 taškas	9 taškas	Vid.	
Distancinė gardelė be maišymo elementų	2 gardelė	28754	28921	28488	22616	28617	28543	31753	27258	28598	28172	0.00
	4 gardelė	35487	35614	34937	28208	35557	35239	39161	33679	35235	34791	0.00
	6 gardelė	27193	27120	-	-	27195	27252	30005	25996	28786	27650	0.00
	8 gardelė	28419	28345	-	-	28229	28295	31372	27264	30104	28861	0.00
Distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais	2 gardelė	34197	34107	33256	26963	33899	34009	37054	32465	33554	33278	18.13
	4 gardelė	42783	42581	41968	33266	42770	42893	45268	39353	42055	41437	19.10
	6 gardelė	31234	31163	-	-	31632	31709	33427	28427	31694	31327	13.30
	8 gardelė	32865	32701	-	-	33142	33254	34676	29492	33234	32766	13.53
Distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais	2 gardelė	33725	33636	33210	27682	33454	33528	35402	31804	33287	32859	16.64
	4 gardelė	42842	42966	42801	32989	42719	43100	43675	37848	42490	41270	18.62
	6 gardelė	30976	30840	-	-	30684	30769	31680	27637	31053	30520	10.38
	8 gardelė	33351	33312	-	-	32886	33278	33283	28882	33609	32657	13.15
Distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais	2 gardelė	31940	32495	33206	27118	32504	32204	34612	31297	32221	31955	13.43
	4 gardelė	40132	40901	41587	33389	40838	40091	43046	38171	39848	39778	14.34
	6 gardelė	29771	30388	-	-	30327	30198	31732	27414	30362	30027	8.60
	8 gardelė	31167	31754	-	-	31558	31304	32947	28826	31656	31316	8.51

$$\Delta h_{\%} = \frac{(h - h_{ats})}{h_{ats}} \cdot 100\% \quad , \quad (3.1)$$

kur: Δh<sub>%</sub> yra šilumos atidavimo koeficiento pokytis (%), h - modifikuotos konstrukcijos vidutinė šilumos atidavimo koeficiento reikšmė (W/m<sup>2</sup>K), h<sub>ats</sub> - atskaitos modelio vidutinė šilumos atidavimo koeficiento reikšmė (W/m<sup>2</sup>K).

Taip pat buvo skaičiuojama vidutinė šilumos atidavimo koeficiento reikšmė ant kuro elementų paviršiaus. Gautas vidutinis pokytis lyginant su atskaitos modeliu. Rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Vidutinio šilumos atidavimo koeficiento ant kuro elementų paviršiaus reikšmės ir jų pokytis palyginti su atskaitos modeliu.

Konstrukcijos tipas	Vidutinis šilumos atidavimo koeficientas, W/m <sup>2</sup> K				Vid.	Δh <sub>%</sub>
	2 pozicija	4 pozicija	6 pozicija	8 pozicija		
Be maišymo elementų	36575	46747	36372	38385	39520	0,00
Su 1-ojo tipo sraigtais	44692	57710	43339	45391	47783	20,91
Su 2-ojo tipo sraigtais	46106	56880	43411	44906	47826	21,02
Su 3-ojo tipo sraigtais	44692	56386	42463	44442	46996	18,92

Paskaičiavę kiekvienos konstrukcijos ir pozicijos vietinių pokyčių vidurkį (3.2 formulė), gauname vidutinę vietinio šilumos atidavimo koeficiento pokyčio reikšmę kuro rinklėje (žr. 3.3 lentelę).

$$\Delta h_{vid\% (vietinis)} = \frac{(\Delta h_{2\%} + \Delta h_{4\%} + \Delta h_{6\%} + \Delta h_{8\%})}{4}. \quad (3.2)$$

3.3 lentelė. Šilumos atidavimo koeficiento pokyčiai bei bendri slėgio nuostoliai (visų tirtų zonų) ir slėgio nuostolių pokytis lyginant su atskaitos modeliu.

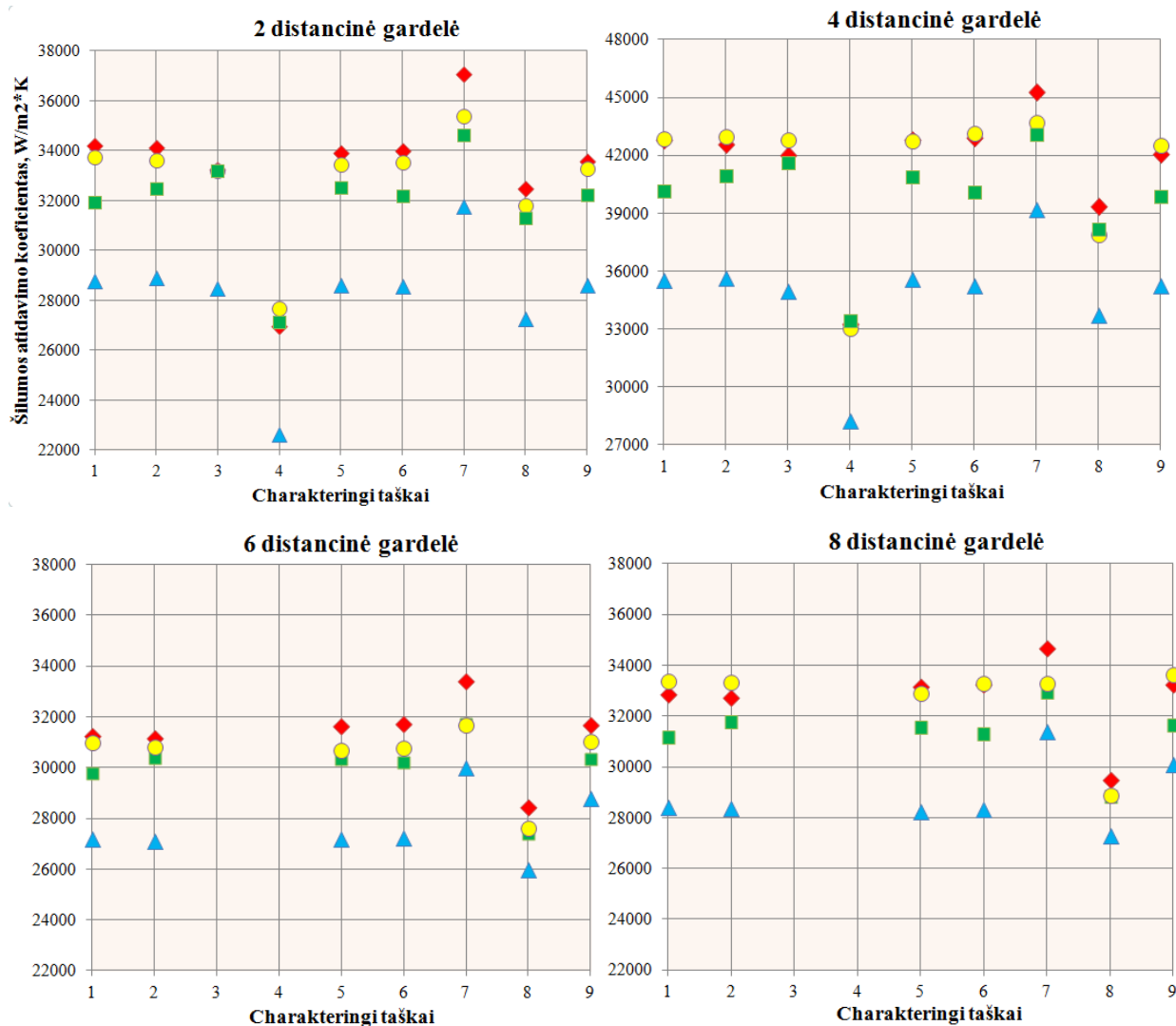
Distancinės gardelės konstrukcija	$\Delta h_{vid\%}$ (vietinis)	$\Delta h_{vid\%}$ (ant visų kuro elementų paviršiaus)	$\Delta p$ , Pa	$\Delta p\%$
Be maišymo elementų	0,00	0,00	30173	0,00
Su 1-ojo tipo sraigtais	16,02	20,91	44578	47,74
Su 2-ojo tipo sraigtais	14,70	21,02	47424	57,17
Su 3-ojo tipo sraigtais	11,22	18,92	43006	42,53

Iš 3.3 lentelės matome, kad didžiausią šilumos atidavimo koeficiento pagerinimo efektą charakteringuose taškuose sukuria distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais. Ši konstrukcija pagerina vietinį šilumos atidavimo koeficientą net 16,02 proc., konstrukcijos su 2-ojo ir 3-ojo tipo sraigtais WHTC pagerina atitinkamai 14,70 ir 11,22 proc. Bendrą vidutinį šilumos atidavimo koeficientą tirtose distancinių gardelių zonose ant kuro elementų paviršiaus labiausiai pagerina konstrukcija su 2-ojo tipo sraigtais - 21,02 proc., tačiau konstrukcijos su 1-ojo tipo sraigtais WHTC pagerinimas beveik toks pats ir lygus 20,91 proc. Mažiausią WHTC pagerinimo efektą sukuria distancinė gardelė su 3-ojo tipo vienos eigos sraigtais. Didžiausius slėgio nuostolius kanale sukuria distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, ir slėgio nuostoliai, palyginti su atskaitos modeliu, išauga net 57,17 proc. Konstrukcijos su 1-ojo ir 3-ojo tipo sraigtais slėgio nuostolius padidina atitinkamai 47,74 ir 42,53 proc. Reikia paminėti, kad bendras slėgio nuostolių padidėjimas per visą kuro rinklės aukštį nebus toks didelis, kadangi šie slėgio nuostoliai buvo gauti būtent distancinių gardelių regionuose - ten, kur jie yra didžiausi. Taigi apibendrinę lentelės duomenis, galime daryti išvadą, kad optimaliausia distancinės gardelės konstrukcija yra su 1-ojo tipo sraigtais, kadangi ji labiausiai pagerina vietinį WHTC padidėjimą, taip pat bendras WHTC padidėjimas ant kuro elementų paviršiaus nedaug atsilieka nuo konstrukcijos su 2-ojo tipo sraigtais, o slėgio nuostoliai gerokai mažesni. Vietinių WHTC reikšmių kitimai, esant skirtingoms konstrukcijoms, yra pavaizduoti 3.3 pav. Paveikslėlis puikiai iliustruoja, kad distancinės gardelės su 1-ojo tipo sraigtais labiausiai padidina vietinį WHTC charakteringuose taškuose, tai reiškia, kad būtent šiuose taškuose yra sumažinama kritinio šilumos srauto tankio susidarymo galimybė, nes šilumnešio srautas sugeba geriau nuvesti šilumą nuo kuro strypų paviršiaus. Kadangi, projektuojant reaktoriaus sistemą, yra atsižvelgiama į

kritinio šilumos srauto tankio susidarymą ir yra paliekama tam tikra atsarga (žr. 22 psl.), tai teoriškai pakeitus tik distancinių gardelių konstrukciją kuro rinklėse ir padidinus šilumos atidavimo koeficiento reikšmę - atitinkamu dydžiu galima padidinti ir šilumos srauto tankį, vis tiek išlaikant CHF atsargos ribas. Taip yra dėl to, jog, padidėjus WHTC reikšmei, tekantis šilumnešis prie to paties šilumos srauto tankio geba nuvesti didesnę kiekį šilumos nuo paviršiaus. Pagal 1.16 lygtį gauname, kad:

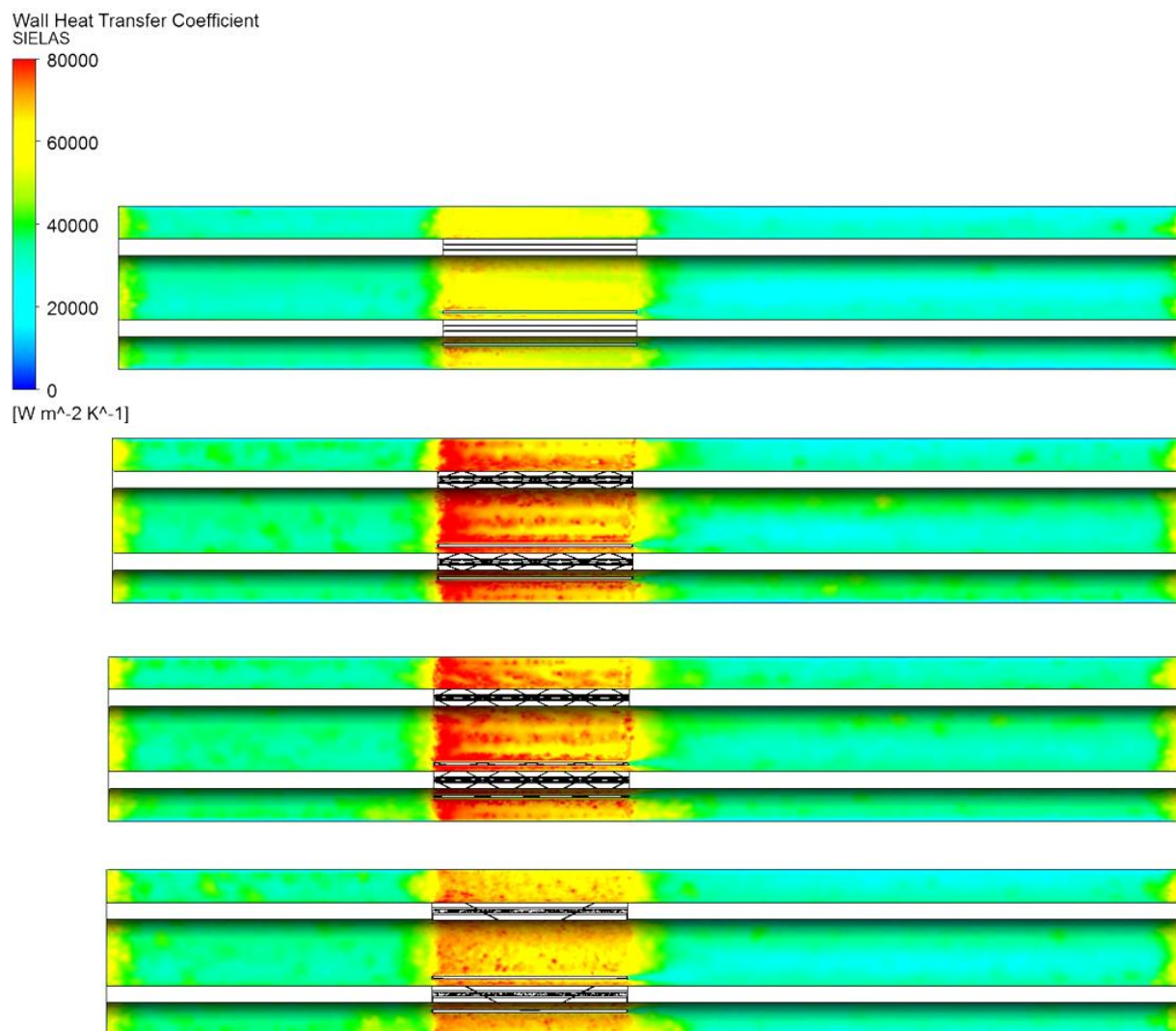
$$\uparrow h = \frac{\uparrow q}{(T_s - T_f)} \quad \text{arba} \quad \uparrow h = \frac{q}{\downarrow (T_s - T_f)}. \quad (3.3)$$

Žinoma, padidėję slėgio nuostoliai, pakeitus konstrukciją, taip pat turi įtakos. Kadangi cirkuliaciniams siurbliams reikia įveikti didesnę pasipriešinimą - jie turi būti galingesni, o tai reiškia, kad padidėja atominės elektrinės elektros suvartojimas savoms reikmėms.



3.3 pav. Vietinių šilumos atidavimo koeficientų reikšmės charakteringuose taškuose, esant skirtingoms konstrukcijoms. Mėlyni trikampiai - atskaitos modelis, raudoni rombai - distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, geltoni apskritimai - distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, žali kvadratai - distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.

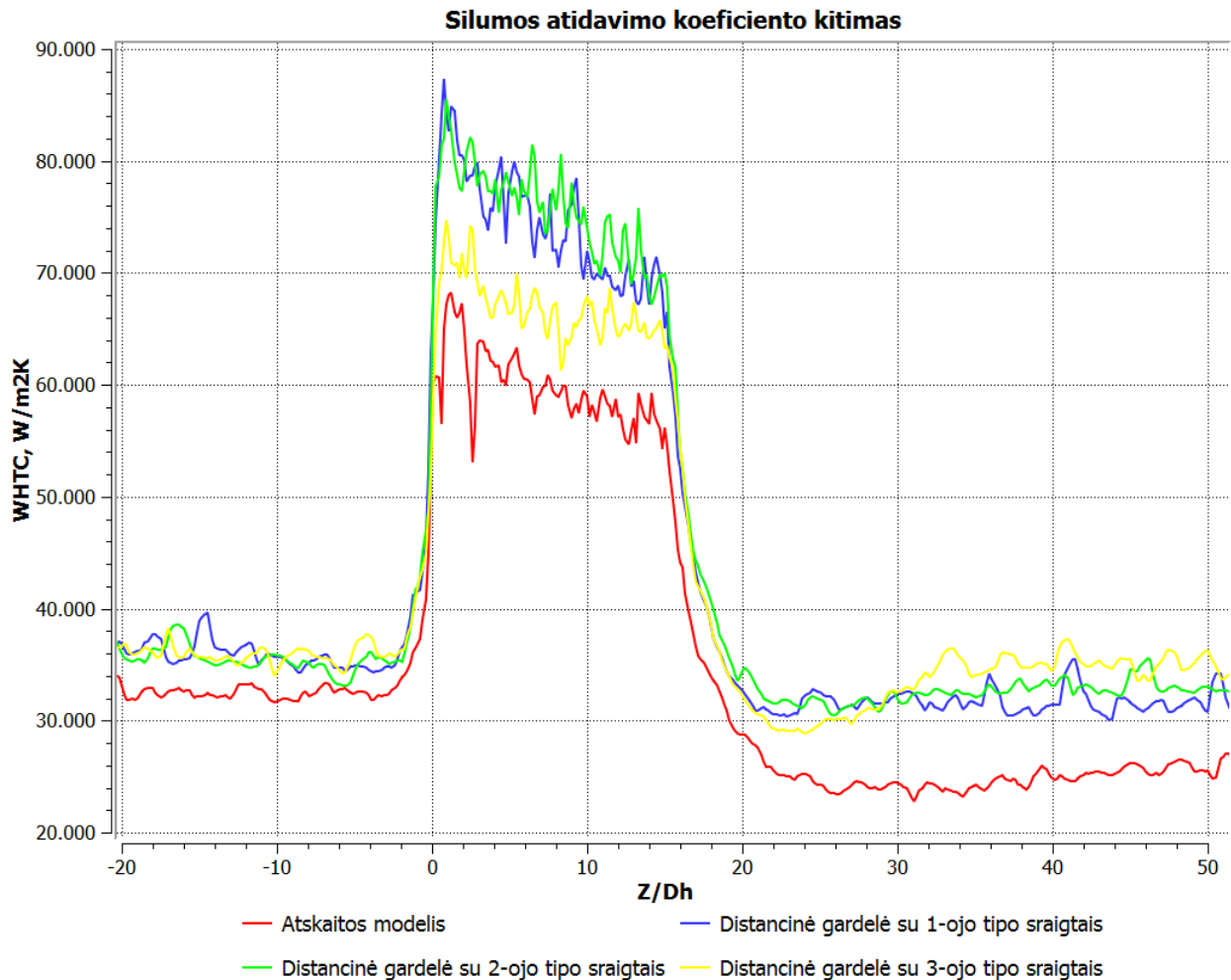
3.4 paveikslėlyje yra pavaizduotas šilumos atidavimo koeficiento pasiskirstymas ant kuro strypų paviršiaus. Matome, kad didžiausios WHTC reikšmės yra distancinės gardelės regione ir jos gerokai didesnės konstrukcijose su sraigtais palyginti su atskaitos modeliu.



3.4 pav. Šilumos atidavimo koeficiento pasiskirstymas ant kuro strypų 4-os distancinės gardelės regione. Viršuje - atskaitos modelis, antras nuo viršaus - distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, trečias nuo viršaus - distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, apačioje - distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.

Srautui pratekėjus distancinę gardelę, WHTC staiga sumažėja. Atskaitos modelio vaizde matome, kad WHTC reikšmės distancinės gardelės regione siekia apie  $60000 \text{ W/m}^2\text{K}$ , o už jos - apie  $25000 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tuo tarpu konstrukcija su 1-ojo tipo sraigtais padidina WHTC reikšmes distancinės gardelės regione iki  $75000 \text{ W/m}^2\text{K}$  ir daugiau, o už jos - iki maždaug  $30000\text{-}35000 \text{ W/m}^2\text{K}$ , tai pavaizduota 3.5 pav.

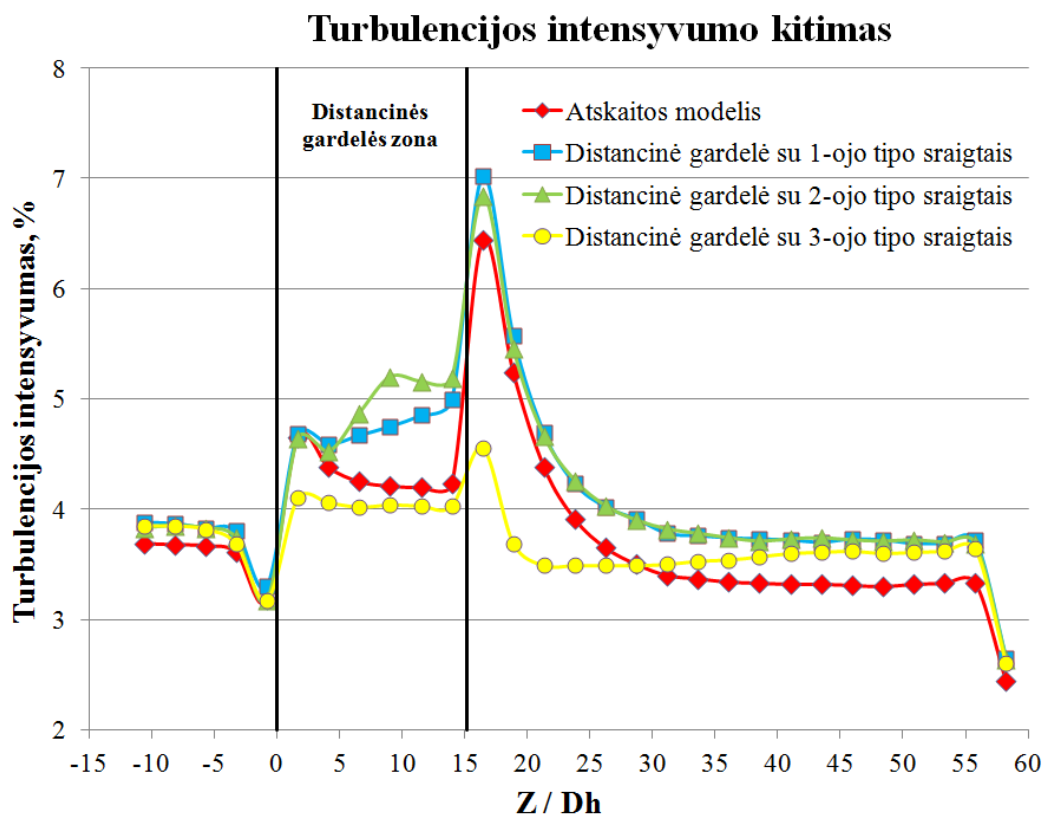




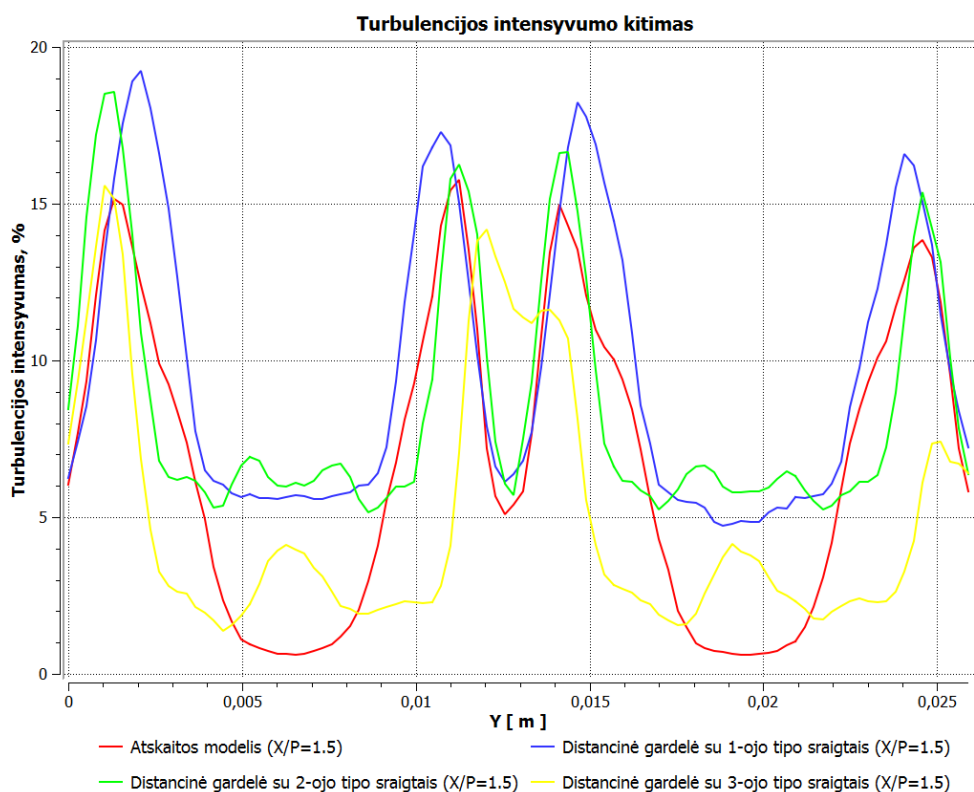
3.5 pav. Šilumos atdavimo koeficiento kitimas 4-os pozicijos regione, 3-iaame charakteringame taške.

3.6 pav. pavaizduotas skirtingų distancinių gardelių konstrukcijų vidutinis ašinis turbulencijos intensyvumo (žr. 1.21 formulę) kitimas. Iš grafiko matome, kad prieš distancinę gardelę turbulencijos intensyvumas visose konstrukcijose staiga sumažėja, kadangi srautas išsilygina. Srautui įtekėjus į distancinę gardelę, turbulencijos intensyvumas padidėja ir konstrukcijose su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais išsilaiko didžiausias. Srautui ištekėjus iš distancinės gardelės zonos, turbulencijos intensyvumas pasiekia piko reikšmę apie 6-7 proc. atskaitos modelio, su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais konstrukcijose ir apie 4,5 proc. su 3-ojo tipo sraigtais, toliau turbulencijos intensyvumas po truputį mažėja ir maždaug po 15 hidraulinių diametrų atstumo pasiekia stabilią reikšmę. Konstrukcijoje su 3-ojo tipo sraigtais turbulencijos intensyvumas nusistovi po maždaug 5 hidraulinių diametrų ir po to dėl trinties su kuro strypų paviršiumi palengva didėja. Visame tiriamame aukštyje konstrukcijos su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais sukuria didžiausią turbulencijos intensyvumą kanale, kuris maždaug 0,4 proc. didesnis nei atskaitos modelio. 3.7 ir 3.8 pav. pavaizduoti skirtingų distancinių gardelių konstrukcijų

skersinis turbulencijos intensyvumo pasiskirstymai tarpkanalinėje zonoje (kai  $X/P=1.5$ , žr. 5.2 pav.) - srautui pratekėjus 1 ir 4 hidraulinius diametrus nuo distancinės gardelės.

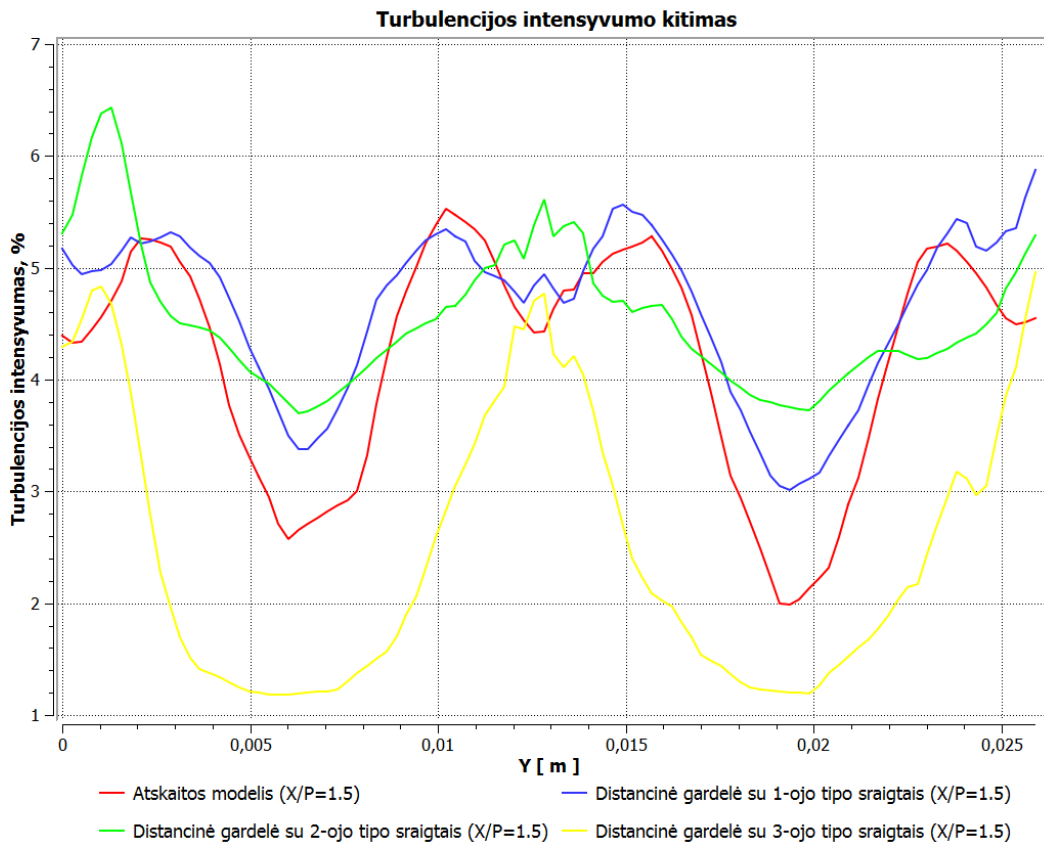


3.6 pav. Vidutinis ašinis turbulencijos intensyvumo kitimas 4-os pozicijos distancinės gardelės tiriamoje zonoje.



3.7 pav. Skersinis turbulencijos intensyvumo pasiskirstymas tarpkanalinėje zonoje (kai  $X/P=1.5$ ), srautui pratekėjus 1 hidraulinį diametrą nuo distancinės gardelės.





3.8 pav. Skersinis turbulencijos intensyvumo pasiskirstymas tarpkanalinėje zonoje (kai  $X/P=1.5$ ), srautui pratekėjus 4 hidraulinius diametrus nuo distancinės gardelės.

Iš 3.7 ir 3.8 pav. matyti, kad didžiausi turbulencijos intensyvumai yra tarpuose tarp kuro strypų, taip yra dėl trinties su paviršiumi. Centrinėse tarpkanalinės erdvės zonose yra pasiekiami turbulencijos intensyvumo minimumai, kadangi šioje vietoje srautas mažiausiai kontaktuoja su paviršiumi. Srautui pratekėjus 1 hidraulinį diametrą nuo distancinės gardelės, turbulencijos intensyvumo maksimumai siekia apie 15-18 proc., o, pratekėjus 4 hidraulinius diametrus, jie sumažėja iki maždaug 5 proc. Atskaitos modelio turbulencijos intensyvumo minimumai siekia 1 proc., pratekėjus 1 hidraulinį diametrą, ir 2-3 proc., pratekėjus 4 hidraulinius diametrus. Tuo tarpu konstrukcijų su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais minimalios turbulencijos intensyvumo reikšmės yra gerokai aukštesnės ir atitinkamai, pratekėjus 1 ir 4 hidraulinius diametrus, lygios 6 proc. ir 3-4 proc. Tai parodo keturių eigų sraigtų gebėjimą išmaišyti srautą taip, kad turbulencijos intensyvumas pasiskirsto po visą tarpkanalinę erdvę ir jis yra gerokai didesnis palyginti su atskaitos modeliu be maišymo elementų. Mažiausias turbulencijos intensyvumas tiriamoje tarpkanalinės erdvės zonoje sukuriama konstrukcijos su 3-ojo tipo sraigtais, greičiausiai tam įtakos turi tai, kad šio tipo sraigtas yra vienos eigos ir nukreipia srautą tik į vieną pusę, taip nesukurdamas sūkurio, o tik stabdydamas srauto tekėjimą.

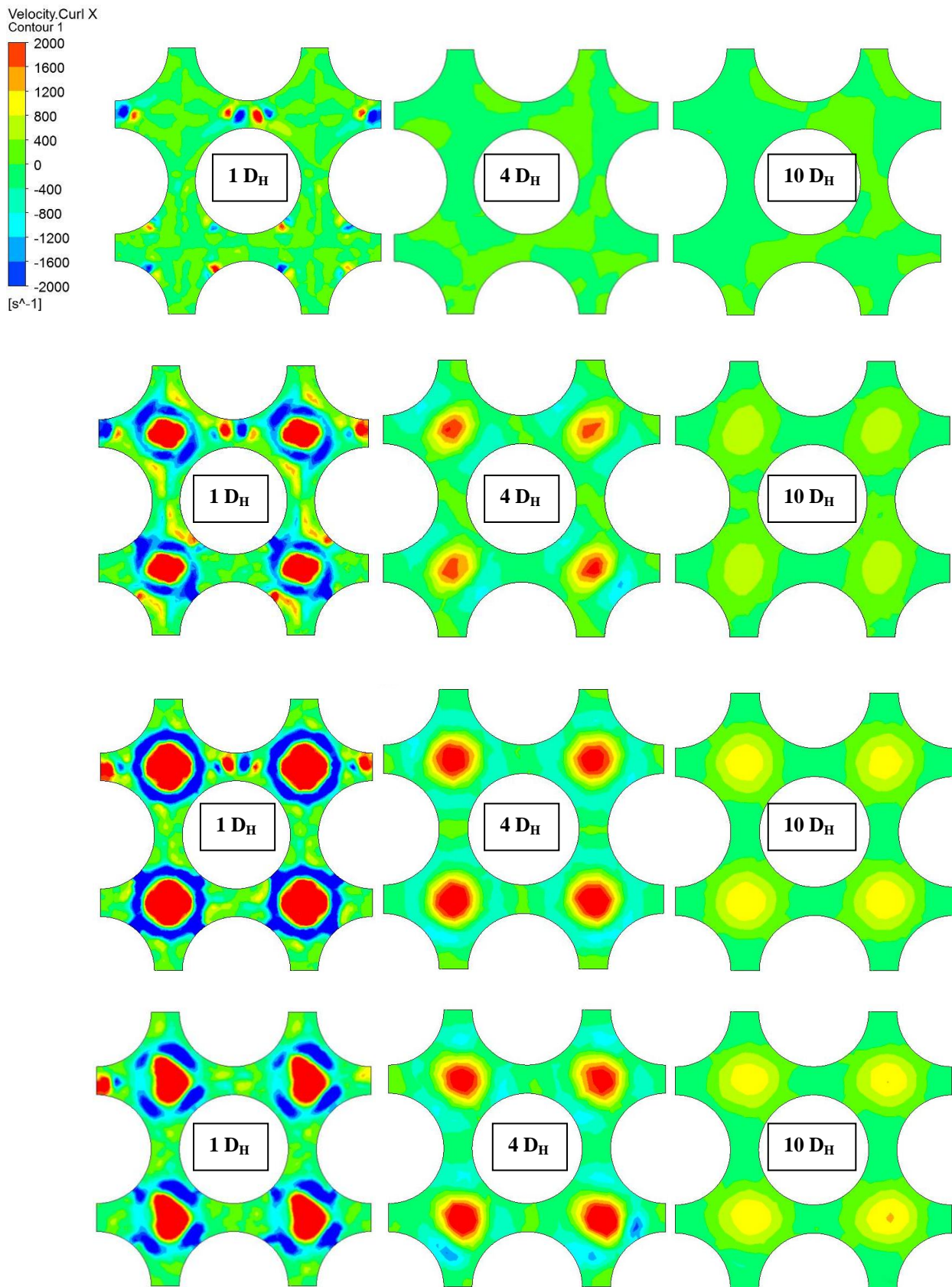
Vidutinės turbulencijos intensyvumo reikšmės tarpkanalinėje erdvėje, esant skirtingoms koordinatėms, yra pateiktos 3.4 lentelėje. Iš pateiktų duomenų matome, kad distancinė gardelė su

1-ojo tipo sraigtais visais atvejais sukuria intensyviausią turbulenciją kanale, pratekėjus 1 hidrauliniį diametrą, o, pratekėjus 4 hidraulinius diametrus ties  $Y/P=0,5$  ir  $1,5$  koordinatėmis, turbulencijos intensyvumas yra nežymiai mažesnis nei distancinės gardelės be maišymo elementų. Taigi, apibendrinę rezultatus, galime teigti, kad distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais užtikrina intensyviausią turbulenciją kanale tiek ašiniu atveju, tiek skersiniu atveju, o taip pat sraigtais blokuoja mažesnę srauto skerspjūvio plotą palyginti su 2-ojo tipo sraigto konstrukcija. Iš to galima daryti išvadą, kad geriausiai turbulenciją intensyvina būtent 4-eigų sraigtais, užimantys mažesnę nei maksimalų srauto skerspjūvio plotą. Dėl to vėlesniuose tyrimuose bus stengiamasi surasti optimalų 4-eigų sraigto dydį, kuris, mažiausiai blokuodamas srautą, sukurtų geriausiai turbulencijos intensyvinimo ir šilumos mainų pagerinimo kanale efektą.

3.4 lentelė. Turbulencijos intensyvumo vidutinės reikšmės tarpkanalinėje erdvėje, esant tam tikroms koordinatėms.

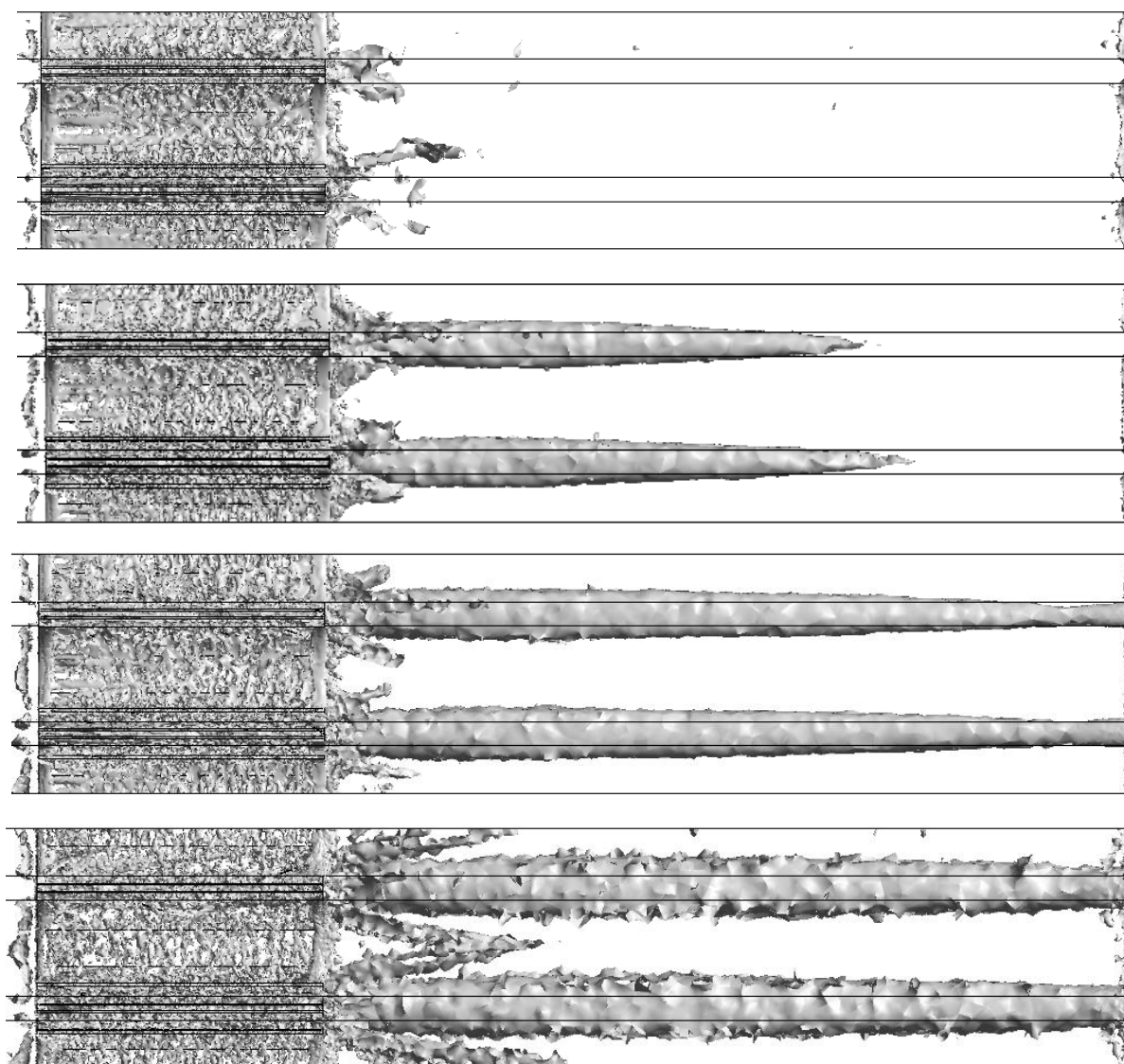
Distancinės gardelės konstrukcija	Turbulencijos intensyvumo vidutinė reikšmė % tarpkanalinėje erdvėje, kai				
	Pratekėjus $Z/D_h$	$X/P=0,5$	$X/P=1,5$	$Y/P=0,5$	$Y/P=1,5$
Be maišymo elementų	1	6,85	6,74	7,00	7,59
	4	4,23	4,19	<b>4,63</b>	<b>5,15</b>
Su 1-ojo tipo sraigtais	1	<b>9,71</b>	<b>9,66</b>	<b>8,18</b>	<b>8,85</b>
	4	<b>4,65</b>	<b>4,63</b>	4,57	5,05
Su 2-ojo tipo sraigtais	1	8,31	8,48	8,12	8,76
	4	4,51	4,53	4,47	4,84
Su 3-ojo tipo sraigtais	1	4,77	4,92	4,87	6,64
	4	2,39	2,45	2,41	3,03

3.9 paveiksle pavaizduotos sūkurinių susidarymo ir kitimo tendencijos, srautui pratekėjus 1, 4 ir 10 hidraulinių diametrų nuo distancinės gardelės. Tiek raudonos, tiek mėlynos spalvos šiuose profiliuose nurodo tą patį srauto sukimosi intensyvumą, tačiau skiriasi sukimosi kryptis. Šie profiliai rodo fluideo dalelių sukimosi apie savo ašį intensyvumą (*angl. Vorticity*). Atskaitos modelio atveju, srautui pratekėjus 1 hidrauliniį diametrą nuo distancinės gardelės regiono, susidaro maži sūkuriai tose vietose, kur buvo distancinių gardelių lietimosi elementai su kuro strypais, tačiau šie sūkuriai greitai išnyksta, ir toliau, srautui tekant kanalu, vyrauja tolygus nesisukantis (*angl. Irrotational*) tekėjimas su tam tikrais srauto trikdymais, kuriuos sukelia trintis su kuro strypų paviršiumi.



3.9 pav. Sūkurių susidarymo ir kitimo tendencija kuro rinklėje, srautui pratekėjus atitinkamai 1, 4 ir 10 hidraulinių diametrų nuo distancinės gardelės. Viršuje - distancinė gardelė be maišymo elementų, antras nuo viršaus - distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, antras nuo apačios - distancinė gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, apačioje - distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.

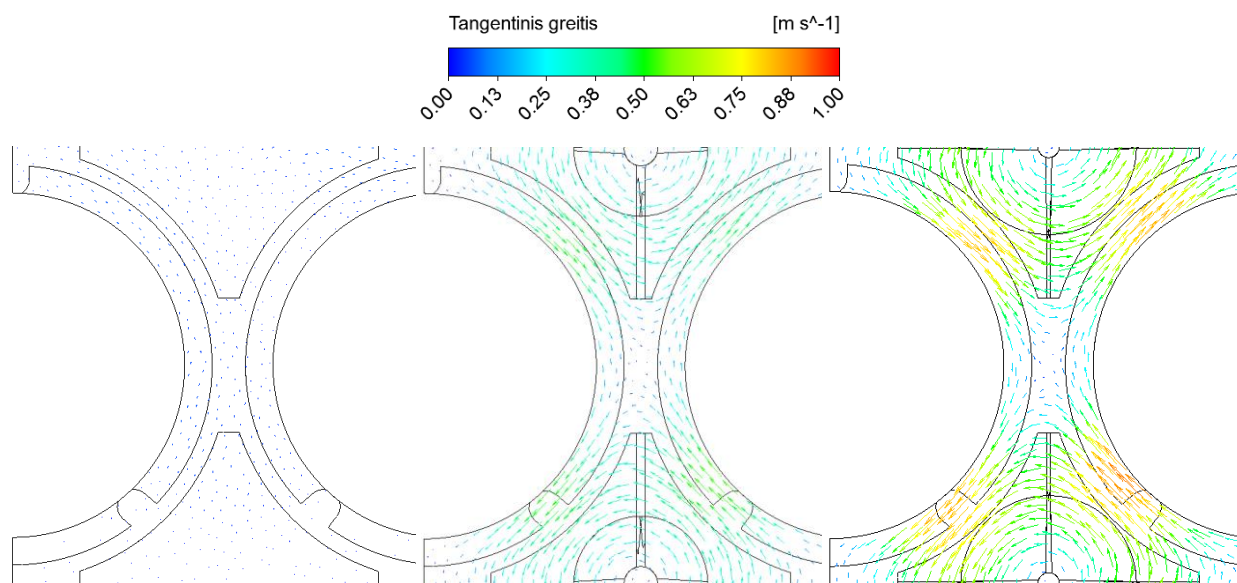
Distancinių gardelių su visų tipų sraigtais atvejais matome, kad, srautui pratekėjus distancinės gardelės regioną, susidaro intensyvūs sūkuriai tarpkanalinės erdvės centruose ir jie išlieka, net ir srautui pratekėjus 10 hidraulinių diametrų. Toks fluido dalelių sukimasis intensyvina energijos ir masės mainus kanale, dėl to pagerėja šilumos nuvedimas nuo kuro strypų paviršiaus. Distancinės gardelės su 1-ojo tipo sraigtais atveju susidariusių sūkurių forma yra elipsinė, su 2-ojo tipo sraigtais susidaro apvalūs sūkuriai, o su 3-ojo tipo susidariusių sūkurių forma yra netaisyklinga, tačiau, pratekėjus didesnį atstumą, tekantis srautas suformuoja taisyklingos apvalios formos sūkurį. Pratekėjus 10 hidraulinių diametrų atstumą, matome, kad konstrukcijoje su 1-ojo tipo sraigtais sūkuriai dėl savo elipsinės formos yra pasiskirstę ir išilgai tarpkanalinių erdvių, o tai skatina maišymąsi ir tarp gretimų tarpkanalinių erdvių. Tuo tarpu konstrukcijų su 2-ojo ir 3-ojo tipo sraigtais sukurti sūkuriai išlieka savo tarpkanalinėje erdvėje ir pagrinde skatina tik vietinį maišymąsi.



3.10 pav. Sūkurių susidarymas tiriamoje zonoje (kai sūkurio stiprumo lygis - 0,002). Viršuje - atskaitos modelis, antras nuo viršaus - su 1-ojo tipo sraigtais, antras nuo apačios - su 2-ojo tipo sraigtais, apačioje su 3-ojo tipo sraigtais.

3.10 paveikslėlyje pavaizduotas sūkurių susidarymas skirtingose konstrukcijose. Pavaizduoti sūkuriai, kurių stiprumo lygis yra lygus 0,002 arba daugiau (*angl. Swirling strength level*). Sūkurių stiprumas yra tangentinio ir ašinio greičio santykis. Matome, kad distancinė gardelė be maišymo elementų nesukuria sūkurių sraute, o tuo tarpu distancinės gardelės su sraigtais juos sukuria. Distancinė gardelė su 3-ojo tipo sraigtais sukuria sūkurį, kuris yra platesnis ir ne toks koncentruotas, kaip 1-ojo ir 2-ojo tipo gardelėse, dėl to srautas gali būti pristabdomas. Distancinės gardelės su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais sukuria siaurus, koncentruotus sūkurius, o jų intensyvumas priklauso nuo sraigtų užimamo srauto skerspjūvio ploto, platesni 2-ojo tipo sraigta sukuria intensyvesnį sūkurį palyginti su 1-ojo tipo sraigtais.

1 ir 2 prieduose yra pateikti tangentinio greičio vektorių pasiskirstymai skirtingų tiriamų konstrukcijų tarpkanalinėse erdvėse, srautui pratekėjus 1, 4, 10 ir 20 hidraulinių diametrų. Iš 1-7 paveikslėlių matyti, kad distancinių gardelių su sraigtais centrinėje tarpkanalinėje erdvėje susidaro sūkuriai, skatinantys fluido maišymąsi tarpkanalinėje erdvėje ir sukuriantys skersinius srautus, kurie intensyvina fluido maišymąsi tarp gretimų tarpkanalinių erdvių. Tuo tarpu distancinė gardelė be maišymo elementų skersinių srautų nesukuria (žr. 3.11 pav.).

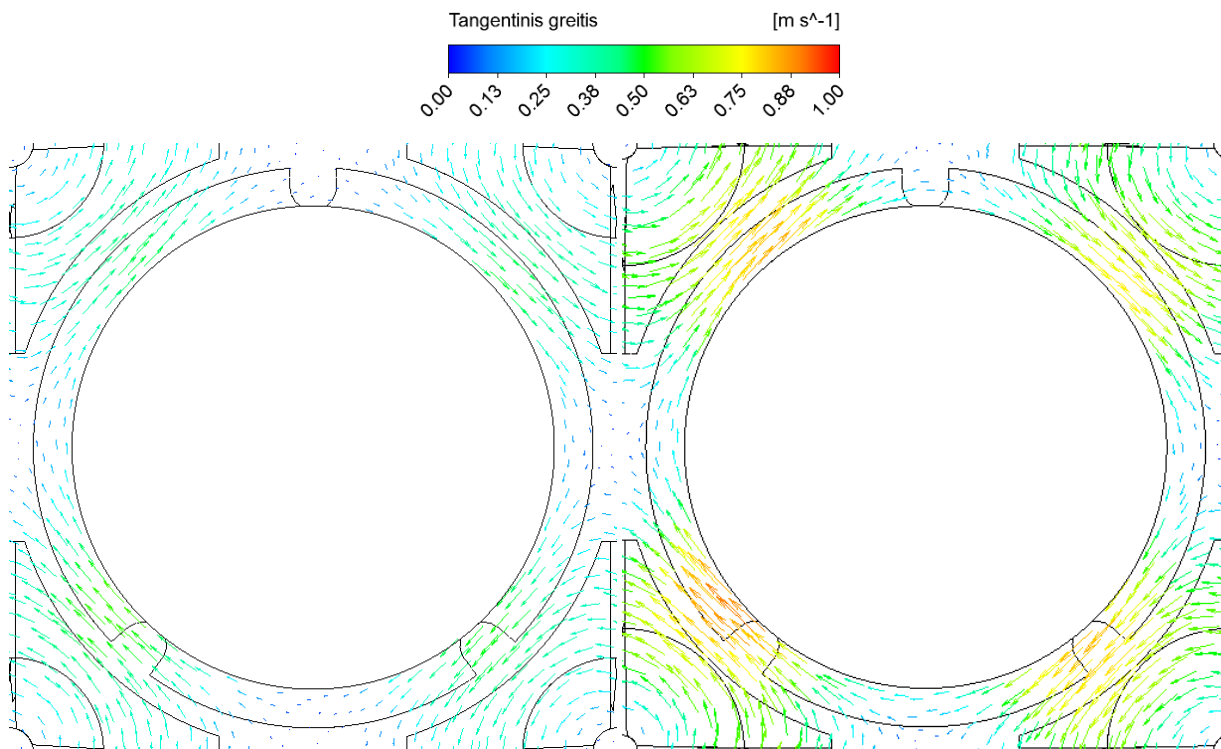


3.11 pav. Tangentinio greičio vektoriai erdvėje tarp dviejų kuro strypų, srautui pratekėjus 20 hidraulinių diametrų nuo distancinės gardelės. Kairėje - atskaitos modelis, viduryje - gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, dešinėje - gardelė su 2-ojo tipo sraigtais.

Iš 3.11 paveikslėlio matyti, kad, srautui pratekėjus 20 hidraulinių diametrų atstumą nuo distancinės gardelės, atskaitos modelio konstrukcijoje skersiniai srautai neegzistuoja, o tuo tarpu konstrukcijose su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais jie vis dar aktyviai vyksta. Tokie skersiniai srautai intensyvina energijos ir masės mainus tarp gretimų tarpkanalinių erdvių, o tai greitina susijusius termohidraulinius procesus. Intensyviausi skersiniai srautai vyksta konstrukcijoje su 2-ojo tipo sraigtais, kadangi šie sraigta blokuoja didesnę srauto skerspjūvio ploto dalį ir išsuka didesnę



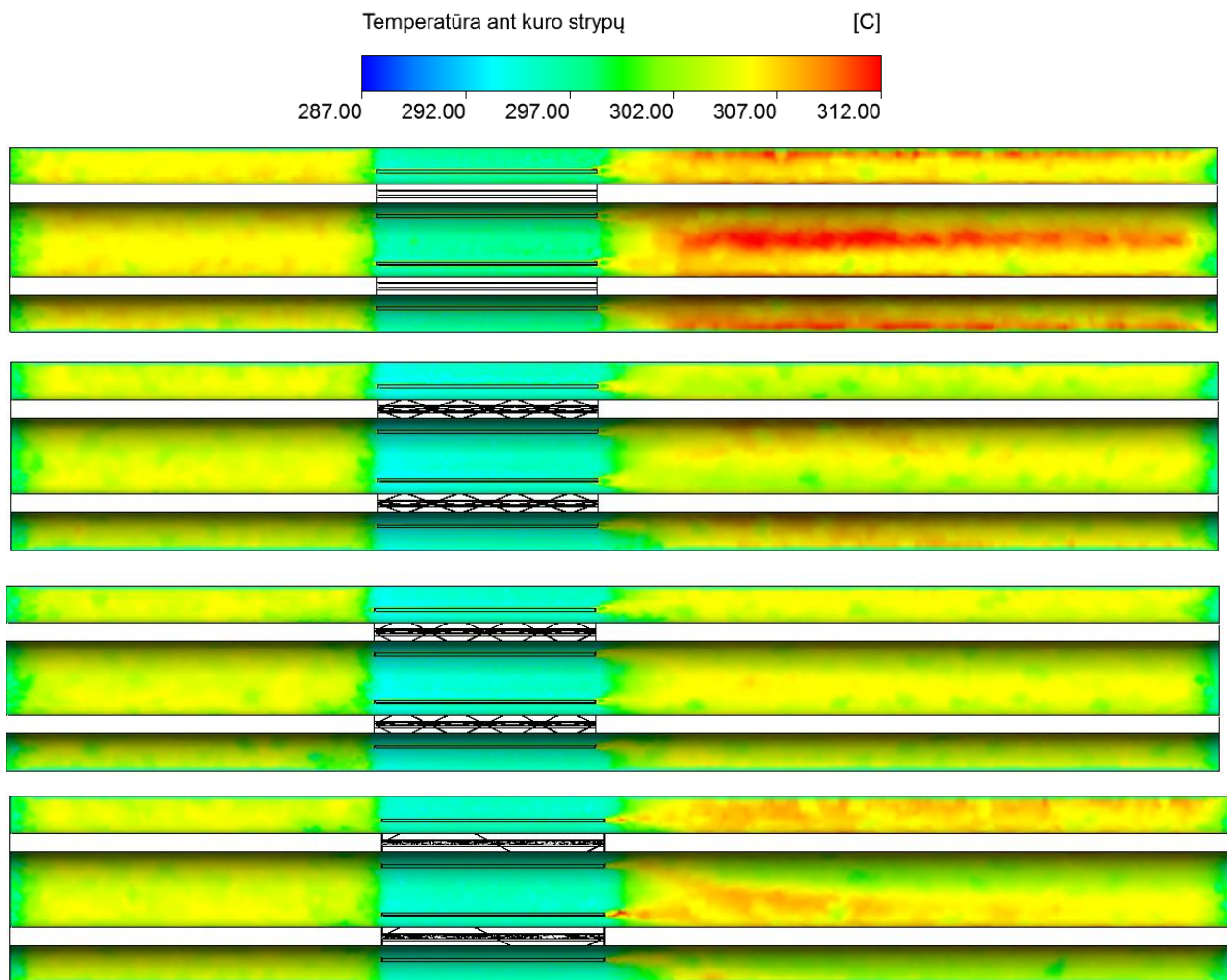
srauto sūkurį, kuris ir intensyvina tarpkanalinį maišymą. Iš 3.12 paveikslėlio matyti, kaip skersiniai srautai apiplauna centrinį kuro strypą.



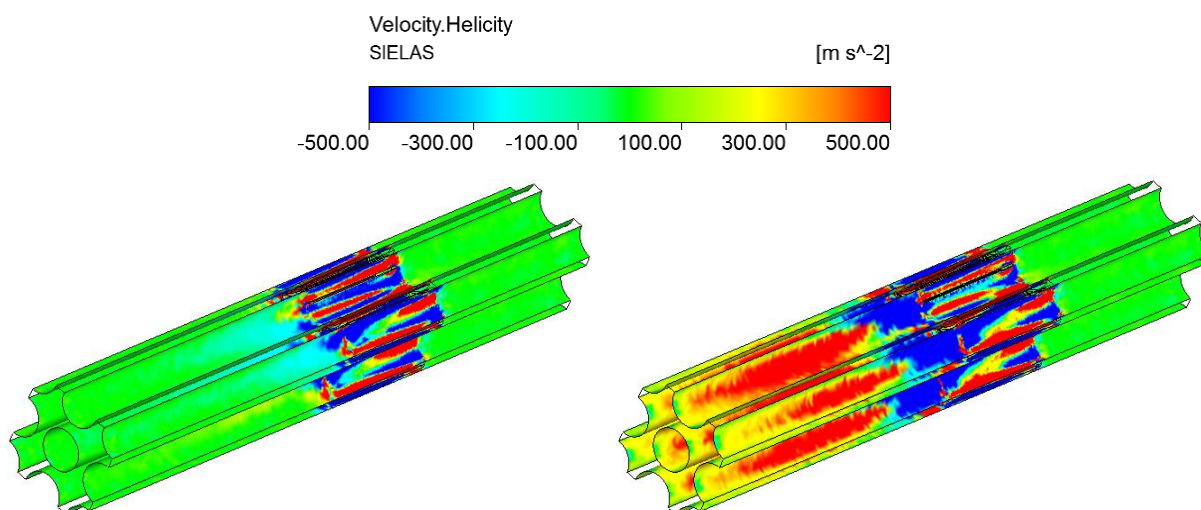
3.12 pav. Tangentiniai greičio vektoriai aplink centrinį kuro strypą, srautui pratekėjus 20 hidraulinių diametrų nuo distancinės gardelės. Kairėje - gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, dešinėje - gardelė su 2-ojo tipo sraigtais.

Maišymo sraigtų sukelti skersiniai fluido srautai intensyviai apiplauna kuro strypus, net ir pratekėjus 20 hidraulinių diametrų atstumą nuo distancinės gardelės, ir tokia tendencija išlieka visame tiriamame 170 mm ilgio regione. Šie skersiniai srautai ne tik skatina turbulenciją kanale, bet ir pagerina konvekcinius šilumos mainus tarp kuro strypų ir fluido. Taip pat toks priverstinis kuro strypų apiplovimas atitolina CHF susidarymą kuro rinklėje.

3.13 pav. yra pavaizduotas temperatūros profilis ant kuro strypų. Kaip matome, kuro rinklėje be maišymo elementų ant strypų paviršiaus susidaro karštosios zonos. Karštosios zonos kuro rinklėje susidaro dėl distancinių gardelių lietimosi elementų su kuro strypais, kadangi, jas aptekę, srautas yra pristabdomas ir negali efektyviai aušinti kuro strypų paviršiaus. Atitinkamai kuro rinklėse su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais temperatūros reikšmės ant strypų paviršiaus yra gerokai žemesnės, kadangi tiek skersiniai fluido srautai, tiek sūkuriai apiplauna kuro strypus, o dėl padidėjusios turbulencijos šioje zonoje yra geriau nuvedama šiluma. Kuro rinklėje su 3-ojo tipo sraigtais temperatūros reikšmės yra aukštesnės nei su kitų tipų sraigtais. Paveikslėlyje pateiktas kuro strypų vaizdas tik iš vienos pusės, o, išanalizavę visų kuro strypų sieneles, nustatėme, kad mažiausiai karštųjų zonų atsiranda konstrukcijoje su 1-ojo tipo sraigtais, šio tipo distancinės gardelės užtikrina geriausią kuro strypų aušinimą.

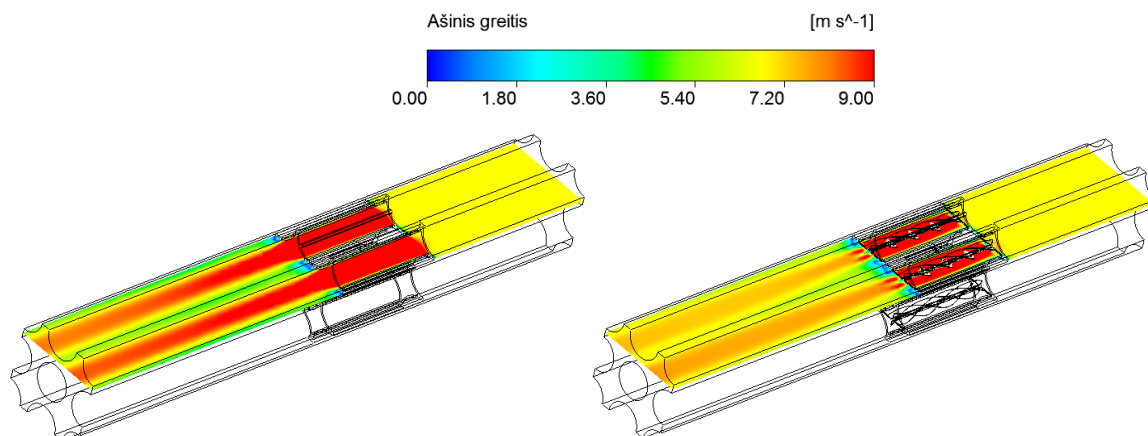


3.13 pav. Temperatūros pasiskirstymas ant kuro strypų paviršiaus. Viršuje - atskaitos modelis, antras nuo viršaus - gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, antras nuo apačios - gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, apačioje - gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.



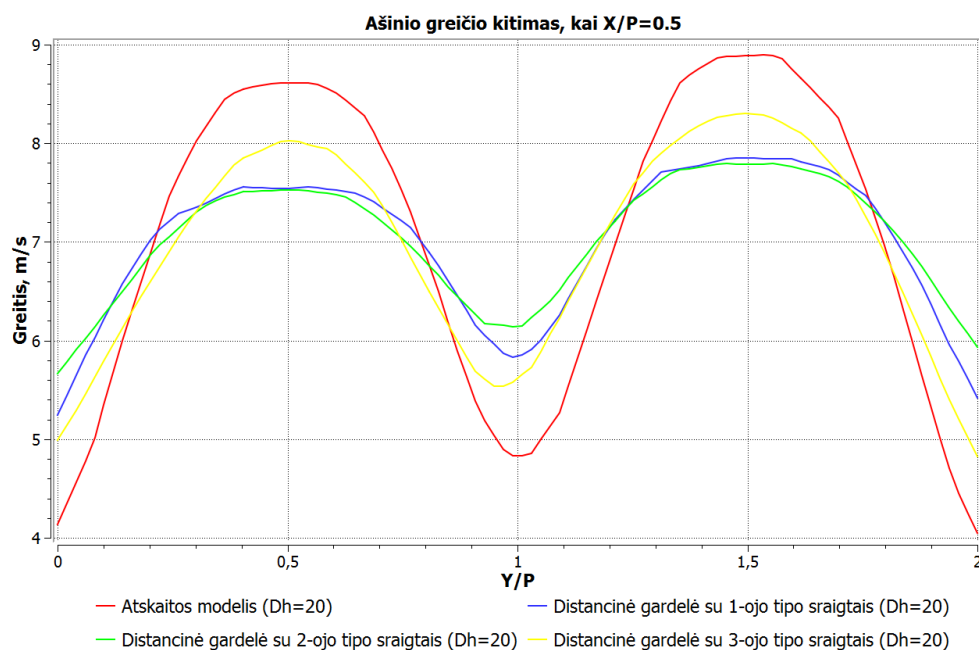
3.14 pav. Fluido dalelių sukimosi ir linijinio judėjimo bendro maišymosi efekto (*angl. Velocity helicity*) pasiskirstymas ant kuro strypų paviršiaus. Kairėje - atskaitos modelis, dešinėje - gardelė su 1-ojo tipo sraigtais.

3.14 pav. yra pavaizduotas bendras maišymosi efektas gautas, dėl fluideo dalelių linijinio judesio ir jų sukimosi aplink savo ašį. Abiejų konstrukcijų distancinių gardelių regione šis maišymasis yra labai efektyvus, tai įtakoja pagerėjusius šilumos mainus šioje zonoje. Fluidui pratekėjus distancinę gardelę, konstrukcijoje be maišymo elementų šis maišymasis išnyksta ir srautas išsilygina, fluideo dalelės juda be sukimosi judesio, dėl to susilpnėja energijos ir masės mainai tarp gretimų dalelių, tačiau ašinis tekėjimo greitis centrinėje tarpkanalinės erdvės dalyje (žr. 3.15 pav.) yra šiek tiek didesnis, kadangi sumažėja trintis tarp atskirų fluideo dalelių.



3.15 pav. Ašinio greičio pasiskirstymas plokštumoje, kai  $X/P=0,5$ . Kairėje - atskaitos modelis, dešinėje - distancinė gardelė su 1-ojo tipo sraigtais.

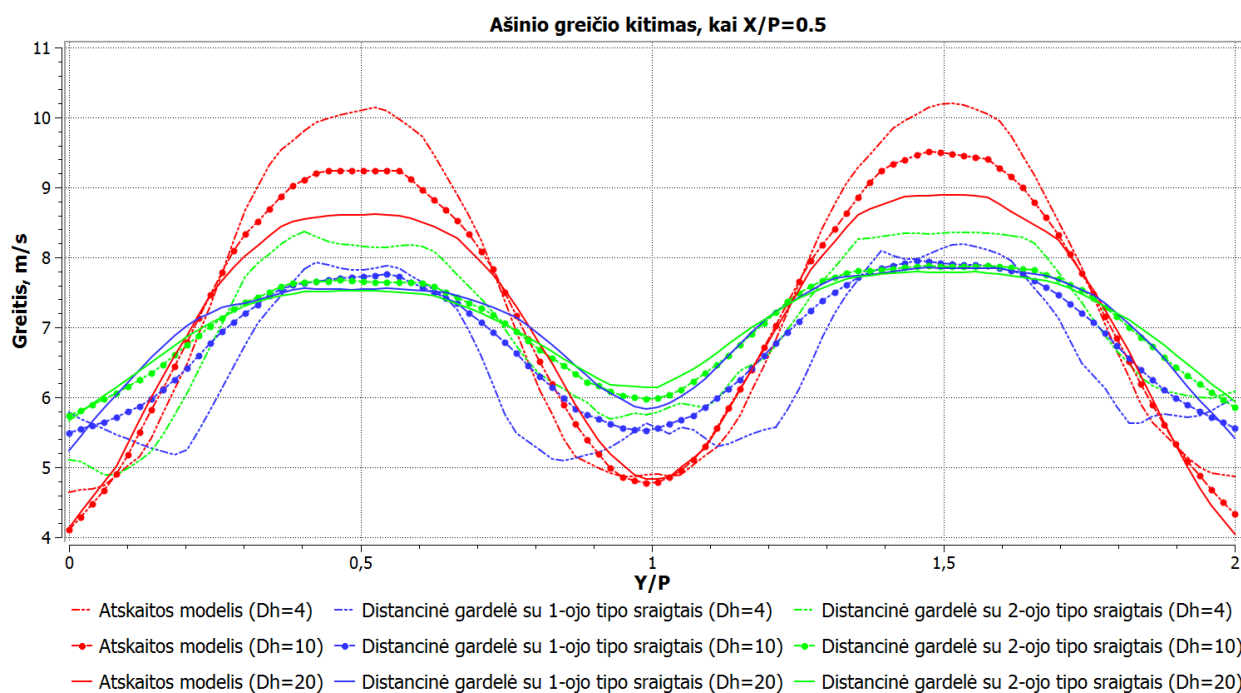
Atitinkamai konstrukcijoje su 1-ojo tipo sraigtais, fluideo maišymosi efektas išlieka gana intensyvus ir srautui pratekėjus distancinę gardelę.



3.16 pav. Ašinio greičio kitimas tarpkanalinės erdvės dalyje, kai  $X/P=0.5$ , srautui pratekėjus 20 hidraulinių diametrų nuo distancinės gardelės. Raudona kreivė - atskaitos modelis, mėlyna kreivė - gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, žalia kreivė - gardelė su 2-ojo tipo sraigtais, geltona kreivė - gardelė su 3-ojo tipo sraigtais.



Dėl atskirų fluideo dalelių sukimosi judesio, padidėja vidinė trintis ir srauto tekėjimo greitis centrinėje tarpkanalinės erdvės dalyje šiek tiek sumažėja palyginti su atskaitos modeliu, tačiau dėl susidariusio sūkuriu padidėja srauto greitis tarpuose tarp kuro strypų (žr. 3.16 ir 3.17 pav.), o tai užtikrina geresnį šilumos nuvedimą nuo jų paviršiaus.

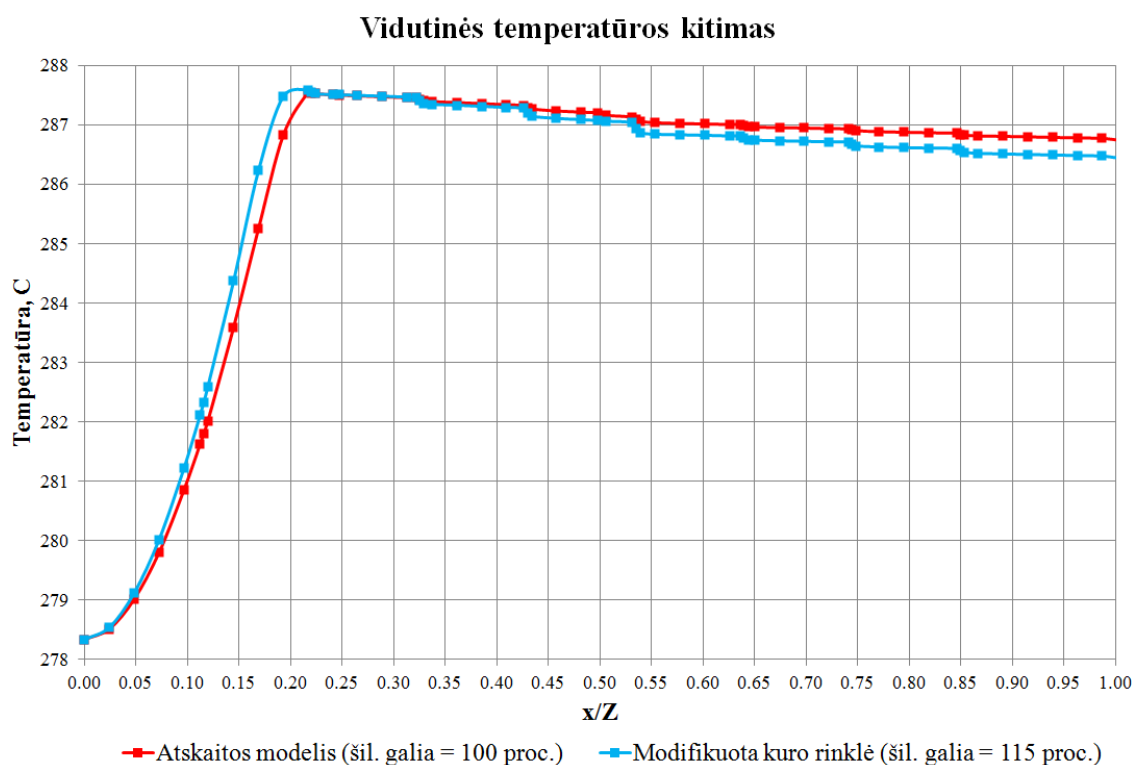


3.17 pav. Ašinio greičio kitimas tarpkanalinės erdvės dalyje, kai  $X/P=0.5$ , srautui pratekėjus 4, 10 ir 20 hidraulinių diametrų nuo distancinės gardelės. Raudona kreivė - atskaitos modelis, mėlyna kreivė - gardelė su 1-ojo tipo sraigtais, žalia kreivė - gardelė su 2-ojo tipo sraigtais.

Iš 3.16 pav. matyti, kad atskaitos modelio kuro rinklėje srauto tekėjimo greitis, pratekėjus 20 hidraulinių diametrų nuo gardelės, yra didžiausias tarpkanalinių erdvių centrinėje dalyje ir mažiausias tarpuose tarp kuro strypų. Atitinkamai tolygiausiai ašinis greitis pasiskirsto konstrukcijose su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais ir tarpuose tarp kuro strypų yra lygus maždaug 5-6 m/s, kai atskaitos modelio rinklėje šiose vietose greitis yra lygus maždaug 4-5 m/s. Centrinėje dalyje atskaitos modelio greitis lygus 8,5 m/s, o konstrukcijose su 1-ojo ir 2-ojo sraigtais - maždaug 7,5 m/s. Konstrukcija su 3-ojo tipo sraigtais mažiausiai skiriasi nuo atskaitos modelio.

3.17 pav. pavaizduotas ašinio greičio kitimas, srautui tekant tolyn nuo distancinės gardelės, kai atstumas lygus 4, 10 ir 20 hidraulinių diametrų. Matome, kad atskaitos modelio konstrukcijoje srauto greitis tarpuose tarp kuro strypų tolygiau kinta nuo distancinės gardelės kinta labai nežymiai, o centrinėje dalyje greitis mažėja. Kuro rinklėse su 1-ojo ir 2-ojo tipo sraigtais, srauto greitis centrinėje dalyje nusistovi, pratekėjus 10 hidraulinių diametrų, o greitis tarpuose tarp kuro strypų didėja, didėjant atstumui nuo gardelės.

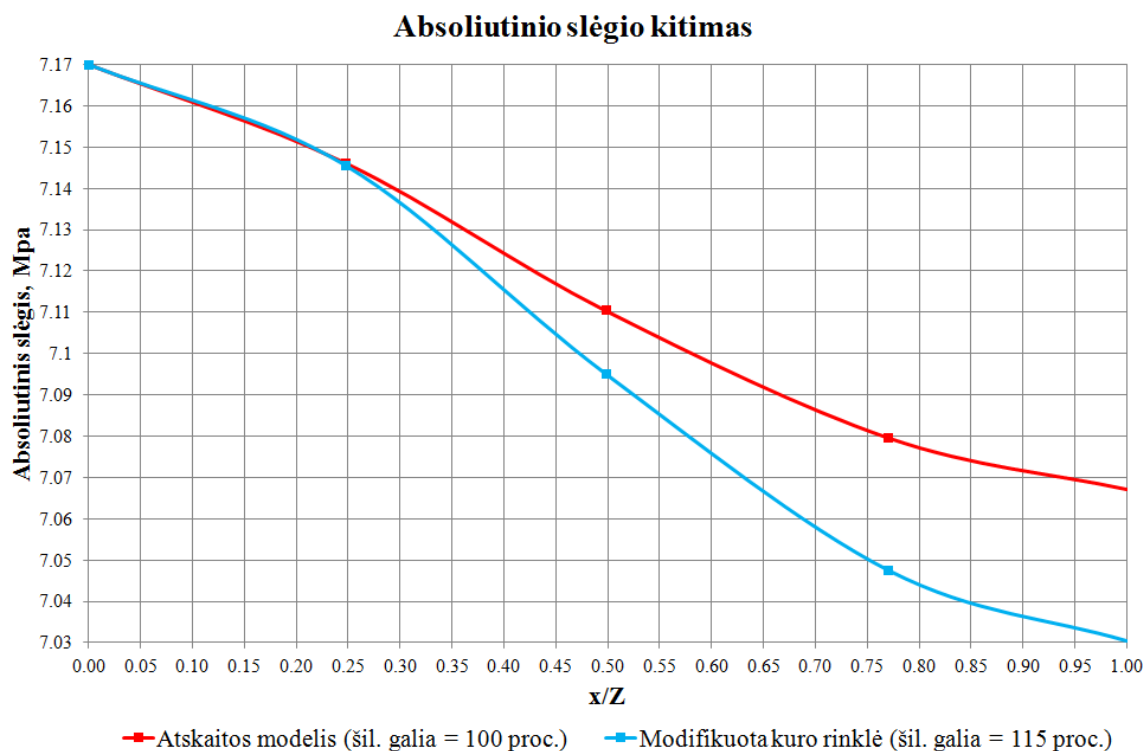
Taigi apibendrinami galime teigti, kad sraigtų sukeliamas srauto maišymosi efektas pagerina šilumos mainus tarp kuro strypų ir šilumnešio, įtakoja ašinio greičio tolygesnį pasiskirstymą, skersinių fluideo srautų atsiradimą, padidina turbulencijos intensyvumą kanale, sumažina kuro strypų temperatūrą, ir dėl to padidina kritinio šilumos srauto tankio atsargą. Tačiau papildomai blokuodami tekančio šilumnešio srautą ir padidindami aptekamų konstrukcijų paviršiaus plotą, yra atsakingi už padidėjusius slėgio nuostolius kanale. Pagal gaunamos naudos santykį su papildomais slėgio nuostoliais, optimaliausia yra distancinės gardelės konstrukcija su 1-ojo tipo sraigtais. Ši konstrukcija padidina bendrą šilumos atidavimo koeficientą ant kuro strypų paviršiaus 20,91 proc. ir vietinį šilumos atidavimo koeficientą tirtuose devyniuose charakteringuose taškuose 16,02 proc., sukurdami papildomai 47,74 proc. didesnius slėgio nuostolius palyginti su atskaitos modelio konstrukcija. Būtina paminėti, kad šis slėgio nuostolių padidėjimas bus mažesnis, ištyrus viso ilgio kuro rinklę, nes santykinai buvo tiriama tik maža kuro rinklės dalis - 4 rinklės pjūviai po 170mm, esant 4 gardelėms, o, kaip žinome, didžiausius slėgio nuostolius kuro rinklėje ir sukelia distancinės gardelės. Taigi pagal 3.3 lygtį galime daryti teorinę išvadą, kad, padidinę šilumos srauto tankio reikšmę 15 proc., dėl pakankamai aukšto šilumos atidavimo koeficiento kanale ir geresnių šilumos mainų tarp strypų ir šilumnešio, turėtume išlaikyti kritinio šilumos srauto tankio atsargos ribas ir neleisti perkaisti kuro strypams kanale. Dėl to toliau bus pateikiami rezultatai, atlikus viso ilgio kuro rinklių skaitinį modeliavimą. Bus lyginami termohidrauliniai procesai tarp atskaitos modelio konstrukcijos, esant 100 proc. galiai ir konstrukcijos su 1-ojo tipo distancinėmis gardelėmis, esant 115 proc. galiai.



3.18 pav. Vidutinės srauto temperatūros kitimas kuro rinklėje per visą aukštį.

Modifikuotos su 1-ojo tipo distancinėmis gardelėmis ir atskaitos modelio kuro rinklių tiriamoji kuro kanalo dalis buvo padalinta į 63 pjūvius. Pjūviai buvo sudaryti per visą kuro rinklės aukštį kas 100 mm, o distancinių gardelių zonoje buvo išskiriami trys pjūviai - distancinės gardelės pradžioje, viduryje ir pabaigoje, srautui ją pratekėjus. Visuose šiuose pjūviuose buvo matuojami pagrindiniai termohidrauliniai parametrai - vidutinė šilumnešio temperatūra, garo masinė dalis, mišinio tankis ir vidutinis srauto greitis. Absoliutinis slėgis kanale buvo matuojamas kiekvieno tiriamo kuro rinklės ketvirčio (žr. 2.3 skyrių) išėjime. Nuselto kriterijus buvo matuojamas 7 charakteringame taške (žr. 3.2 pav.) ant kuro strypo paviršiaus per visą kuro rinklės aukštį, tuose pačiuose pjūviuose.

3.18 paveikslėlyje yra pavaizduotas vidutinės šilumnešio temperatūros kitimo grafikas visame kuro rinklės aukštyje. Į kuro rinklę įtekėjęs 278,33°C temperatūros šilumnešis šyla, kol pasiekia soties temperatūrą, kuri yra lygi 287,58°C. Kaip matome, modifikuotos kuro rinklės temperatūros kreivė soties būseną pasiekia anksčiau, srautui pratekėjus maždaug 20 proc. kuro rinklės aukščio, o tuo tarpu atskaitos modelio kreivė soties būseną pasiekia, pratekėjus 22 proc. kuro rinklės aukščio. Pasiekus soties temperatūros reikšmę, dėl slėgio nuostolių kanale, temperatūra pradeda mažėti ir išėjime siekia 286,74°C ir 286,44°C atitinkamai atskaitos modelio ir modifikuotos konstrukcijos, taigi dėl slėgio nuostolių kanale temperatūra sumažėja atitinkamai 0,84°C ir 1,14°C.



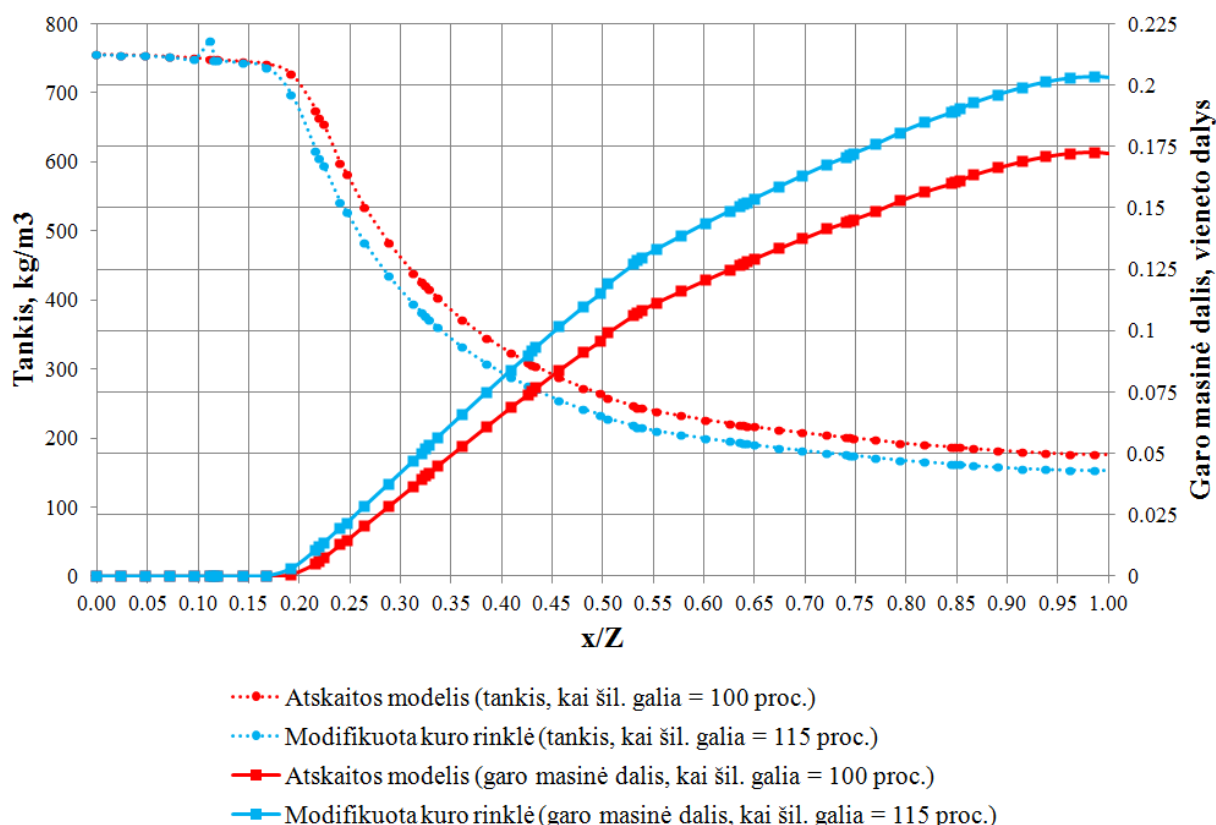
3.19 pav. Absoliutinio slėgio kitimas kuro rinklėje per visą aukštį.

Pateiktame kuro kanalo absoliutinio slėgio kitimo grafike (žr. 3.19 pav.), matome, kad slėgis dėl slėgio nuostolių mažėja per visą kuro rinklės aukštį. Iki 50 proc. kuro rinklės aukščio

slėgio mažėjimas yra intensyvesnis dėl trinties nuostolių, kuriuos sukelia pusinio ilgio kuro strypai, o, jiems pasibaigus, kreivė tampa mažiau nuolydi. Pirmame ketvirtyje abiejų konstrukcijų slėgio nuostoliai yra panašūs ir lygūs 23800 Pa ir 24380 Pa. Toliau didėjant garo kiekiui, slėgio nuostoliai 2-oje, 3-oje ir 4-oje kuro rinklės dalyse pradeda ženkliai skirtis (žr. 3 priedą) ir yra atitinkamai lygūs 35760 Pa ir 50580 Pa, 30780 Pa ir 47640 Pa, 12410 Pa ir 17060 Pa atskaitos modelyje ir modifikuotoje konstrukcijoje. Galiausiai išėjime absoliutinio slėgio reikšmės yra lygios 7,06725 ir 7,03034 MPa, taigi bendri slėgio nuostoliai visoje kuro rinklėje yra 102750 Pa ir 139660 Pa atitinkamai atskaitos modelio ir modifikuotos konstrukcijos. Slėgio nuostoliai konstrukcijoje su 1-ojo tipo maišymo sraigtais padidėja 35,92 proc. palyginti su atskaitos modeliu.

3.20 paveikslėlyje yra pateiktas mišinio tankio ir garo masinės dalies kitimo grafikas kuro rinklėje. Matome, kad tankio ir garo masinės dalies kreivės yra priklausomos viena nuo kitos, didėjant garo kiekiui mišinyje, mažėja jo tankis. Garas modifikuotoje konstrukcijoje dėl didesnio šilumos srauto tankio pradeda formuotis greičiau, srautui pratekėjus maždaug 17 proc. kuro rinklės aukščio, o atskaitos modelio konstrukcijoje - srautui pratekėjus maždaug 19 proc. Pasibaigus pusinio ilgio kuro strypams, garo generavimo intensyvumas susilpnėja, kadangi sumažėja tiriamos dalies šiluminė galia. Dėl 15 proc. didesnės šiluminės galios modifikuotos kuro rinklės išėjime garo masinė dalis yra didesnė ir lygi 0,20307 palyginti su atskaitos modelio 0,17225 reikšme. Taigi bendras garo masinės dalies padidėjimas yra lygus 17,9 proc.

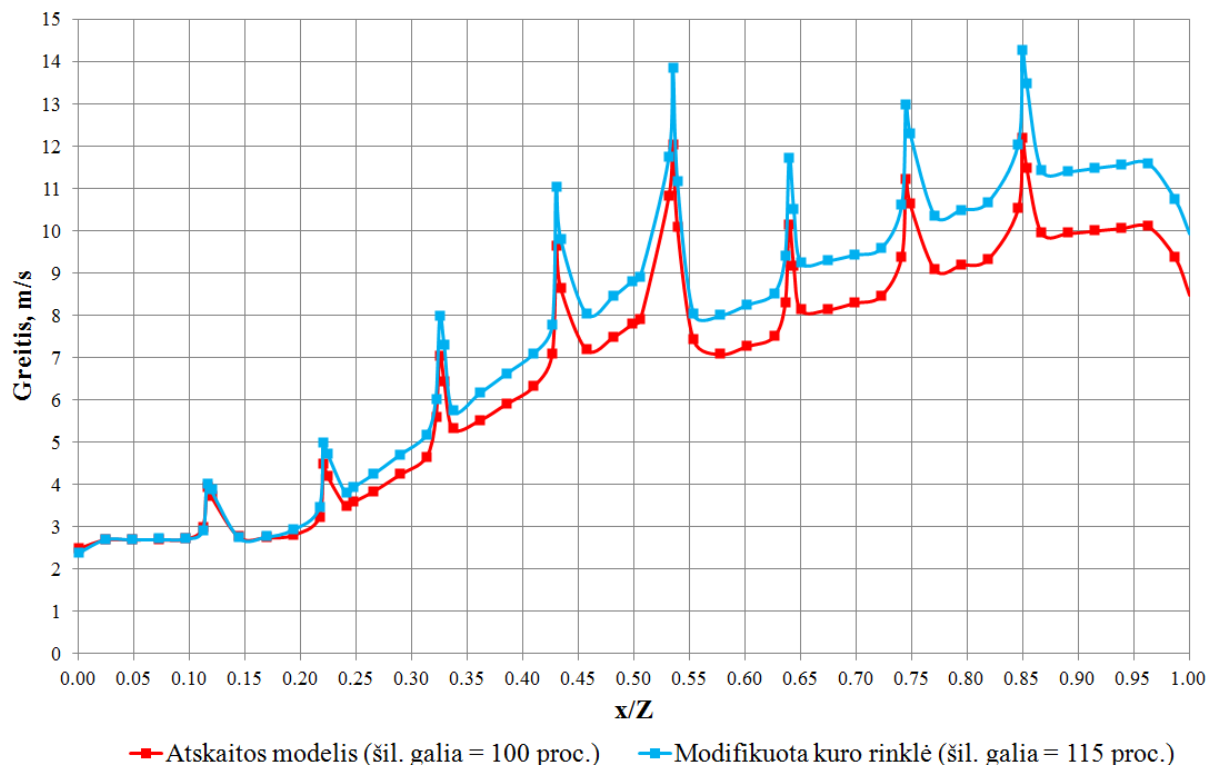
**Mišinio tankio ir garo masinės dalies kitimas**



3.20 pav. Mišinio tankio ir garo masinės dalies kitimas kuro rinklėje per visą aukštį.

Įtekėjusio vandens į kuro rinklę tankis yra lygus  $754,73 \text{ kg/m}^3$ . Tankis truputį mažėja, didėjant temperatūrai, kol ties maždaug 17-19 proc. kuro rinklės aukščiu, pasiekus soties temperatūrą, pradeda formuotis garas, tuomet tankis pradeda intensyviai mažėti, ir kuro rinklės išėjime dvifazio vandens-garo srauto reikšmės yra lygios  $175,91$  ir  $153,058 \text{ kg/m}^3$  atitinkamai atskaitos modelyje ir modifikuotoje konstrukcijoje. Taigi mišinio tankis modifikuotos konstrukcijos išėjime yra 13,0 proc. mažesnis nei atskaitos modelyje. Pagal 2.6 lygtį galime paskaičiuoti homogeninio modelio dvifazio srauto tūrinį garingumą - atskaitos modelio ir modifikuotos konstrukcijos gaunamos reikšmės yra atitinkamai 0,807 ir 0,837.

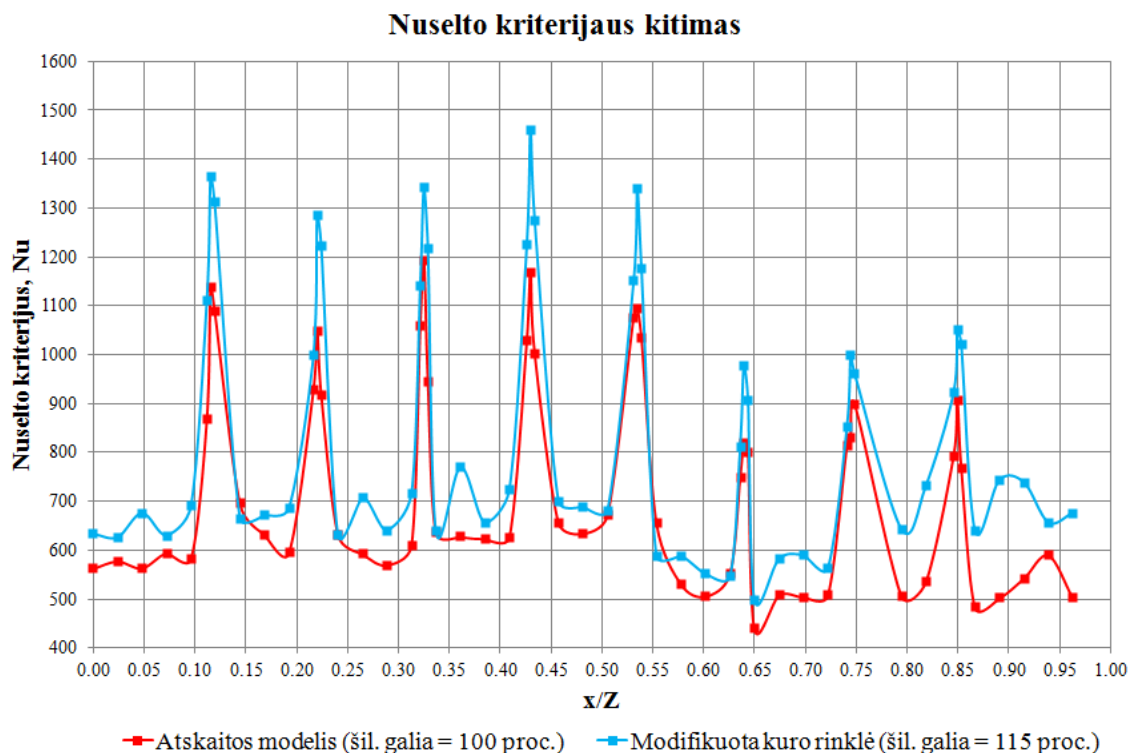
### Vidutinio greičio kitimas



3.21 pav. Vidutinio srauto greičio kitimas kuro rinklėje per visą aukštį.

Vidutinio greičio kitimo kuro rinklėje grafike (žr. 3.21 pav.) matome, kad greitis kuro kanale didėja, didėjant garo kiekiui vandens-garo mišinyje. Ties 17-19 proc. kuro rinklės aukščiu, pradėjus formuotis garui, mišinio greitis pradeda augti, kol pasiekia 8-9 m/s reikšmę, pratekėjus pusę kuro rinklės. Vėliau, pasibaigus pusinio ilgio kuro strypams, dėl padidėjusio srauto skerspjūvio ploto greitis nukrenta iki 7-8 m/s ir toliau stabiliai auga, didėjant garo kiekiui, kol išėjime siekia atitinkamai 8,485 ir 9,927 m/s atskaitos modelio ir modifikuotoje konstrukcijoje. Greičio sumažėjimas paskutiniuose 5 proc. kuro rinklės aukščio įvyksta todėl, kad srautas išteka pro viršutinę jungiamąją plokštę, ir padidėja srauto skerspjūvio plotas. Atitinkamai distancinių gardelių zonose yra pastebimi staigūs greičio šuoliai, kurie įvyksta dėl ženkliai sumažėjusio srauto skerspjūvio ploto. Kadangi modifikuotoje kuro rinklėje distancinės gardelės zonoje yra įmontuoti sraigčiai, tai srauto skerspjūvio plotas yra dar mažesnis ir greičio

šuočiai yra didesni palyginti su atskaitos modeliu. Matome, kad maksimalūs greičio šuočiai modifikuotoje konstrukcijoje pasiekia reikšmes, lygias maždaug 14 m/s, o atskaitos modelyje šios maksimalios reikšmės siekia tik 12 m/s. Modifikuotoje konstrukcijoje srauto greitis taip pat didesnis visame aukštyje dėl susidariusio didesnio garo kiekio. Taigi 15 proc. padidinta šiluminė galia ir modifikuota kuro rinklės konstrukcija padidina dvifazio srauto greitį išėjime 17,0 proc.



3.22 pav. Nuselto kriterijaus kitimas 7 charakteringame taške ant kuro strypo paviršiaus, per visą kuro rinklės aukštį.

3.22 paveikslėlyje pateiktame Nuselto kriterijaus kitimo grafike ( $D_h=0.010435$  m) matome, kad ties distancinėmis gardelėmis dėl suintensyvėjusio maišymosi, padidėjus šilumos atidavimo koeficientui, pagerėja konvekciniai šilumos mainai, ir Nu reikšmės padidėja maždaug dvigubai. Bendrai visame kuro rinklės aukštyje modifikuotos kuro rinklės Nu reikšmės yra didesnės nei atskaitos modelio. Srautui ištekėjus iš distancinės gardelės, atskaitos modelio konstrukcijoje Nu kriterijus nukrenta iki maždaug 500-600 reikšmės, o modifikuotoje konstrukcijoje - iki maždaug 600-700, tačiau toliau, srautui tekant, vėl iškyla mažesnės pikų viršūnės, kadangi sraigtai išsuka srautą ir sukuria skersinius srautus, kurie apiplauna kuro strypus ir pagerina šilumos mainus. Srautui pratekėjus 50 proc. kuro rinklės aukščio, Nuselto kriterijus šiek tiek sumažėja, kadangi, pasibaigus pusinio ilgio kuro strypams, sumažėja šilumos atidavimo koeficientas. Vidutinis Nu kriterijus visame aukštyje yra lygus atitinkamai 737,6 ir 859,6 atskaitos modelio ir modifikuotoje konstrukcijoje. Taigi, padidinus šiluminę galią 15 proc., modifikuotoje konstrukcijoje gaunamas 16,5 proc. Nuselto padidėjimas palyginti su atskaitos modeliu.

## IŠVADOS

Naudojant ANSYS CFX programinį paketą, baigiamajame darbe buvo nagrinėjama keturių skirtingų distancinių gardelių konstrukcijų - be maišymo elementų (atskaitos modelis) ir su 1-ojo, 2-ojo ir 3-ojo tipo sraigtiniais maišymo elementais – įtaka kuro kanale vykstantiems termohidrauliniams procesams. Siekiant įvertinti modifikuotos konstrukcijos suteikiamą naudą, išrinkus optimaliausią distancinę gardelę ir atitinkamai padidinus šiluminę galią, buvo skaičiuojama kuro rinklė visame aukštyje, ir rezultatai lyginami su atskaitos modeliu.

1. Modifikuotos distancinių gardelių konstrukcijos su sraigtinio tipo maišymo elementais padidina turbulencijos intensyvumą kanale bei dėl sukurių susidarymo sukuria skersinius fluideo srautus, o tai pagerina šilumnešio maišymąsi ir konvekcinius šilumos mainus kanale;
2. Modifikuotos distancinės gardelės tolygiau paskirsto šilumnešį kanale ir padidina srauto tekėjimo greitį tarpuose tarp kuro strypų, o tai pagerina strypų paviršiaus aušinimą;
3. Dėl geresnio kuro strypų aušinimo, esant modifikuotoms konstrukcijoms, sumažėja karštųjų zonų plotas ant paviršiaus, ir dėl to sumažėja tikimybė, kad susidarys kritinis šilumos srauto tankis;
4. Nustatyta optimaliausia distancinės gardelės konstrukcija yra su 1-ojo tipo sraigtiniais maišymo elementais. Ši konstrukcija, palyginus su atskaitos modeliu:
  - Padidina šilumos atidavimo koeficientą kanale maždaug 16-21 proc.;
  - Padidina turbulencijos intensyvumą tiriamos zonos išėjime maždaug 0,4 proc.;
  - Padidina suminius slėgio nuostolius tirtose zonose 47,74 proc.;
  - Sukuria intensyvių skersinį fluideo maišymąsi, kuris išlieka visame tiriamos zonos aukštyje;
  - Užtikrina tolygesnį ašinio greičio pasiskirstymą kanale. Greitis tarpuose tarp kuro strypų padidėja maždaug 1-2 m/s, o centrinėse dalyse sumažėja 1 m/s;
5. Modifikuotos konstrukcijos su 1-ojo tipo sraigtais padidintas šilumos atidavimo koeficientas kanale įgalina padidinti kuro kanalo šiluminę galią 15 proc. Apskaičiavus šią konstrukciją su padidinta galia ir palyginus rezultatus su atskaitos modeliu, buvo gauti tokie pokyčiai:
  - 17,9 proc. garo masinės dalies padidėjimas;
  - 35,92 proc. padidėję slėgio nuostoliai kanale;
  - 0,3°C mažesnė šilumnešio temperatūra išėjime;
  - 17,0 proc. padidėjęs srauto ištekėjimo greitis;
  - 16,5 proc. padidėjęs Nuselto kriterijus.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. GE Hitachi Nuclear Energy, The ABWR Plant General Description, <http://www.ge-energy.com/content/multimedia/files/downloads/ABWR%20General%20Description%20Book.pdf>, 7.1.2007, p. 71-75.
2. United States Nuclear Regulatory Commission Technical Training Center, GE Systems Technology Manual (R-304B), Chapter 2.2 Fuel and Control Rods System, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1125/ML11258A302.pdf>, p. 7-13, 23-38.
3. M. DeFilippis, R. Higgins, GNF Global Nuclear Fuel, Licensing Topical Report, GE14 Fuel Assembly Mechanical Design Report, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0535/ML053540338.pdf>, November 2005, p. 11-13.
4. TVO, Nuclear power plant units Olkiluoto 1 and Olkiluoto 2, <http://www.tvo.fi/uploads/File/nuclear-power-plant-units.pdf>, 2005, p. 14-15.
5. S. B. Shelton, R. A. Rand, GNF Global Nuclear Fuel, Licensing Topical Report, GE14 Fuel Rod Thermal-Mechanical Design Report, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0535/ML053540343.pdf>, p. 11, 15, 24., November 2005.
6. J. Buongiorno, L. Hu, S.J. Kim, R. Hannink, B. Truong, E. Forrest, Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features, issues, and research gaps, *Nucl. Technol.* 162 (2008) 80-91.
7. Kazuo Ikeda, CFD application to advanced design for high efficiency spacer grid / *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 279, 2014, p. 73-82.
8. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, November 2009, p. 18-19, 53-55, 57, 104
9. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, November 2010, p. 9, 121, 175-177.
10. Oficialus ANSYS programinio paketo internetinis adresas, <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>
11. ANSYS FLUENT 6.3 Documentation, 7.2.2 Determining Turbulence Parameters, <http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node217.htm>, 2006.09.20.
12. Tokyo Institute of Technology, Hitachi Ltd., Nuclear Engineering Intensive course 2013, Kaunas University of Technologies, October 14th-18th, 2013, p. 157-180.
13. Hitachi-GE Nuclear Energy, UK ABWR Generic Design Assessment Preliminary Safety Report on Reactor Core and Fuels, Document ID GA91-9901-0046-00001, Rev. B, Document Number XE-GD-0156, 2014, p. 3, 7-9, 24-30.
14. S. Jayanti, K. Rajesh Reddy, Effect of spacer grids on CHF in nuclear rod bundles / *Nuclear Engineering And Design*, Vol. 261, August 2013, p. 66-75.



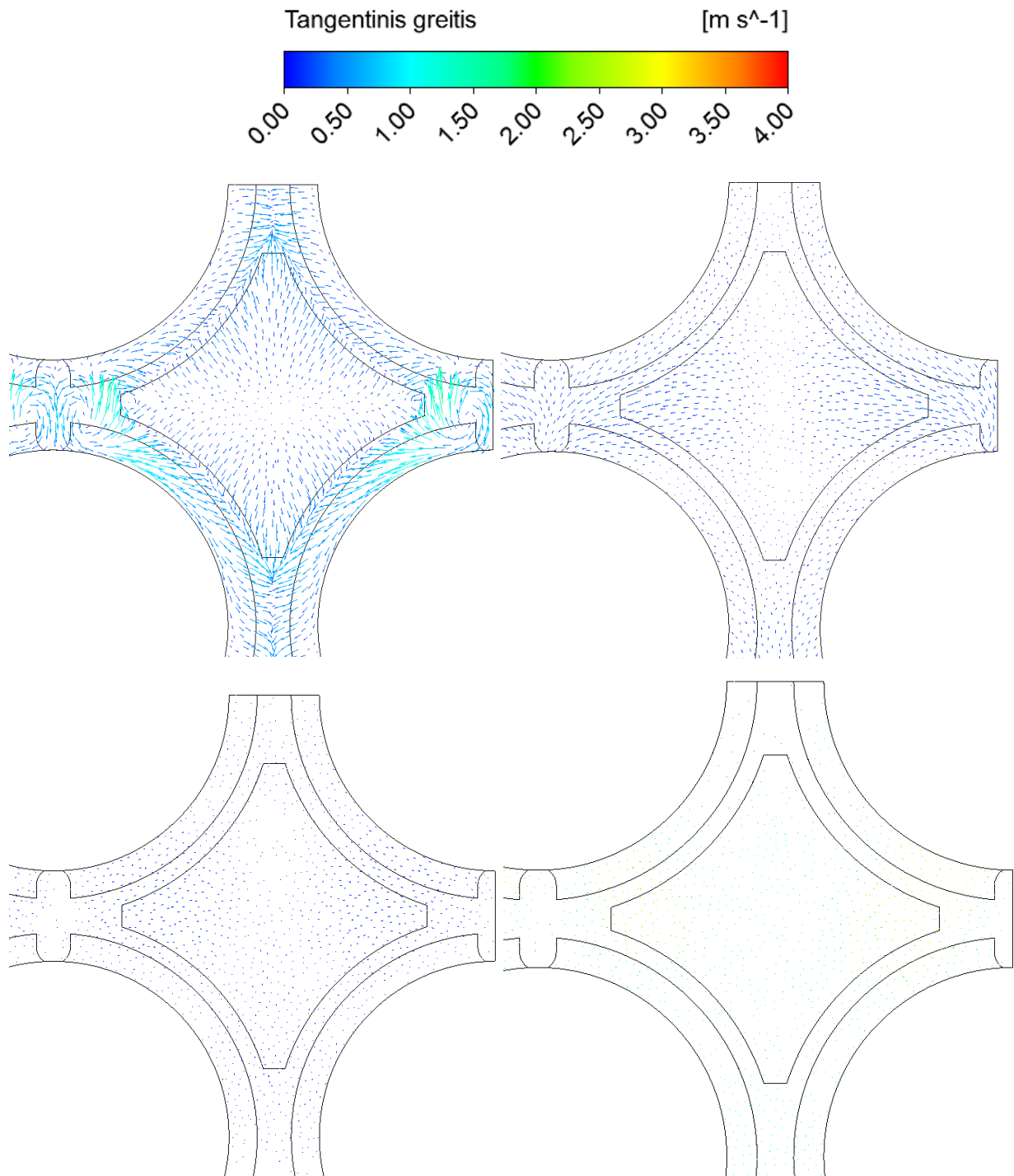
15. NASA Aeronautics and space administration, Tom Benson, Reynolds Number, <http://www.grc.nasa.gov/WWW/BGH/reynolds.html>, 2014.06.12.
16. Bright Hub Engineering, Harlan Bengtson, Lamar Stonecypher, Calculation of Forced Convection Heat Transfer Coefficients, <http://www.brighthubengineering.com/hvac/91056-calculation-of-forced-convection-heat-transfer-coefficients/>, 2013.08.05.
17. Diana Caraghiaur Garrido, Experimental Study and Modelling of Spacer Grid Influence on Flow in Nuclear Fuel Assemblies, 2009, p. 1.
18. Seok Kyu Chang, Sang Ki Moon, Won Pil Baek, Young Don Choi, Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices / *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, 2008, p. 600-609.
19. W.K. In, a C.H. Shin, a D.S. Oh, a T.H. Chun a, Thermal-Hydraulic Performance of a Hybrid Vane and Split Vane in a PWR Fuel Assembly, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, November 2-3, 2006, p.1-2.
20. X. Cheng, U. Muller, Review on Critical Heat Flux in Water Cooled Reactors, 2003, p. 5-10, 19-20.
21. Groeneveld, D.C., A general method of predicting critical heat flux in advanced water-cooled reactors. Proc. of NURETH-9, October 1999.
22. Kenneth D. Kok, Nuclear Engineering Handbook, CRC Press, 2009, p. 657-708.
23. Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Bruce R. Munson, David P. DeWitt, Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., 2003, p. 344-345, 405-410, 423-427.
24. Napoleonas Liutikas, Juozas Gudzinskas, Termohidromechanika, KTU Vadovėlis, 2001, p. 329-335.
25. Paul E. Dimotakis, The mixing transition in turbulent flows, Cambridge University Press, J.Fluid Mech (2000), vol. 409, p. 69-98.
26. Boyan Neykov, Development and validation of advanced CFD models for detailed predictions of void distribution in a BWR bundle, Dissertation, The Pennsylvania State University, 2010, p. 25-26.
27. Wang Kee In, Dong Seok Oh, Tae Hyun Chun, Flow Analysis for Optimum Design of Mixing Vane in a PWR Fuel Assembly, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 33, Number 3, June 2001, p. 327-338.
28. C.M. Lee, Y.D. Choi, Comparison of thermo-hydraulic performances of large scale vortex flow (LSVF) and small scale vortex flow (SSVF) mixing vanes in 17x17 nuclear rod bundle, Nuclear Engineering and Design 237, 2007, p. 2322-2331.
29. Xiang-Zhe CUI, Kwang-Yong KIM, Three-dimensional Analysis of Turbulent Heat Transfer and Flow through Mixing Vane in A Subchannel of Nuclear Reactor, Journal of

Nuclear Science and Technology Vol. 40, Received 2003, Published online 07 Feb 2012, p. 719-724.

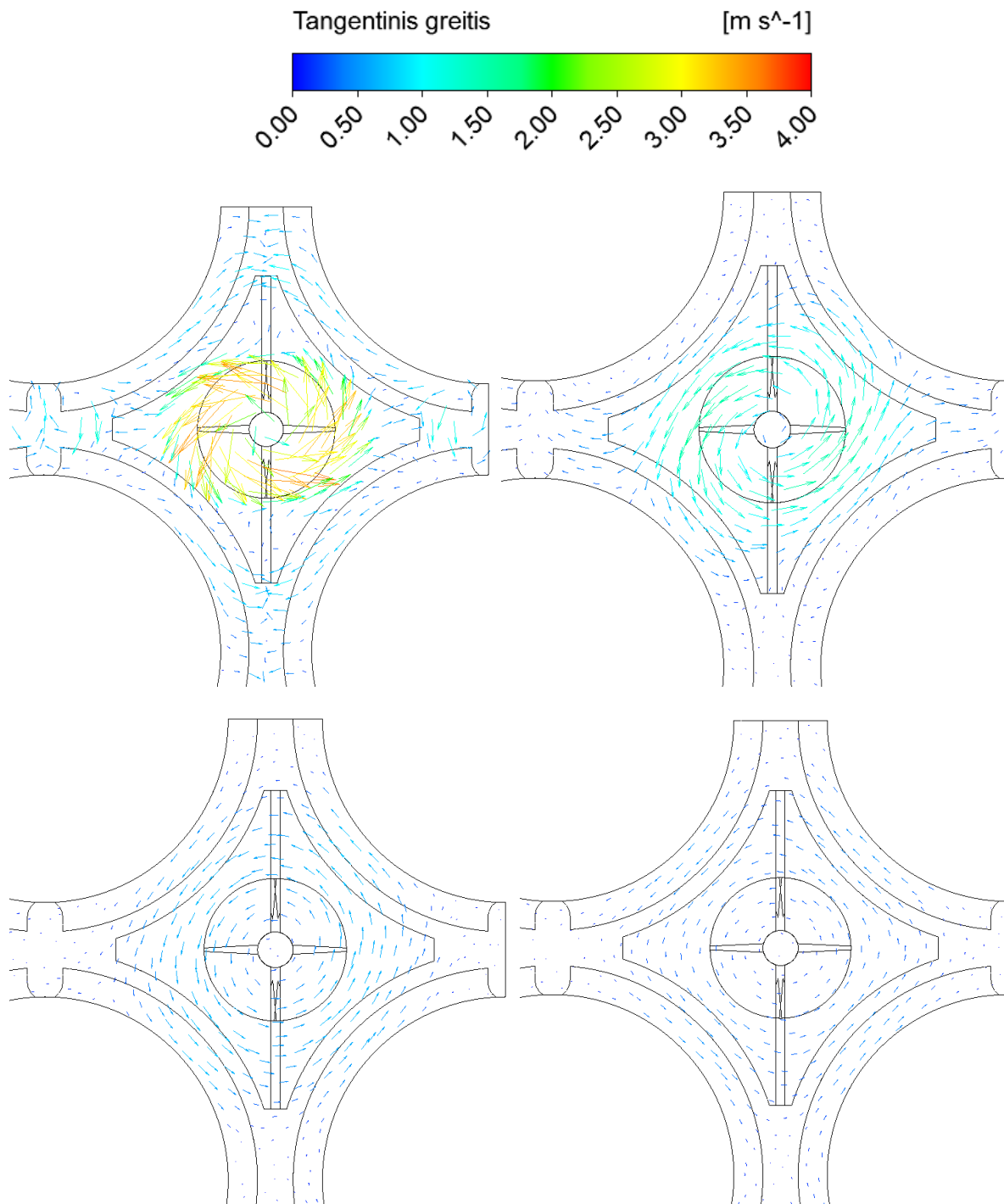
30. Seok-Kyu Chang, Seok Kim, Chul-Hwa Song, Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids: OECD/NEA-KAERI CFD benchmark exercise test, Nuclear Engineering and Design 279, 2014, p. 19-36.
31. D.K. Chandraker, A.K. Nayak, P.K. Vijayan, Effect of spacer on the dryout of BWR fuel rod assemblies, Nuclear Engineering and Design 294, 2015, p. 262-273.
32. Robert A. Fiedler, John C. Norris, Rocketeer User's Guide, University of Illinois Center for Simulation of Advanced Rockets, [http://www.csar.illinois.edu/rocstar/rocketeer/v1.3/Rocketeer\\_Users\\_Guide.html](http://www.csar.illinois.edu/rocstar/rocketeer/v1.3/Rocketeer_Users_Guide.html), 9/22/2005.

## PRIEDAI

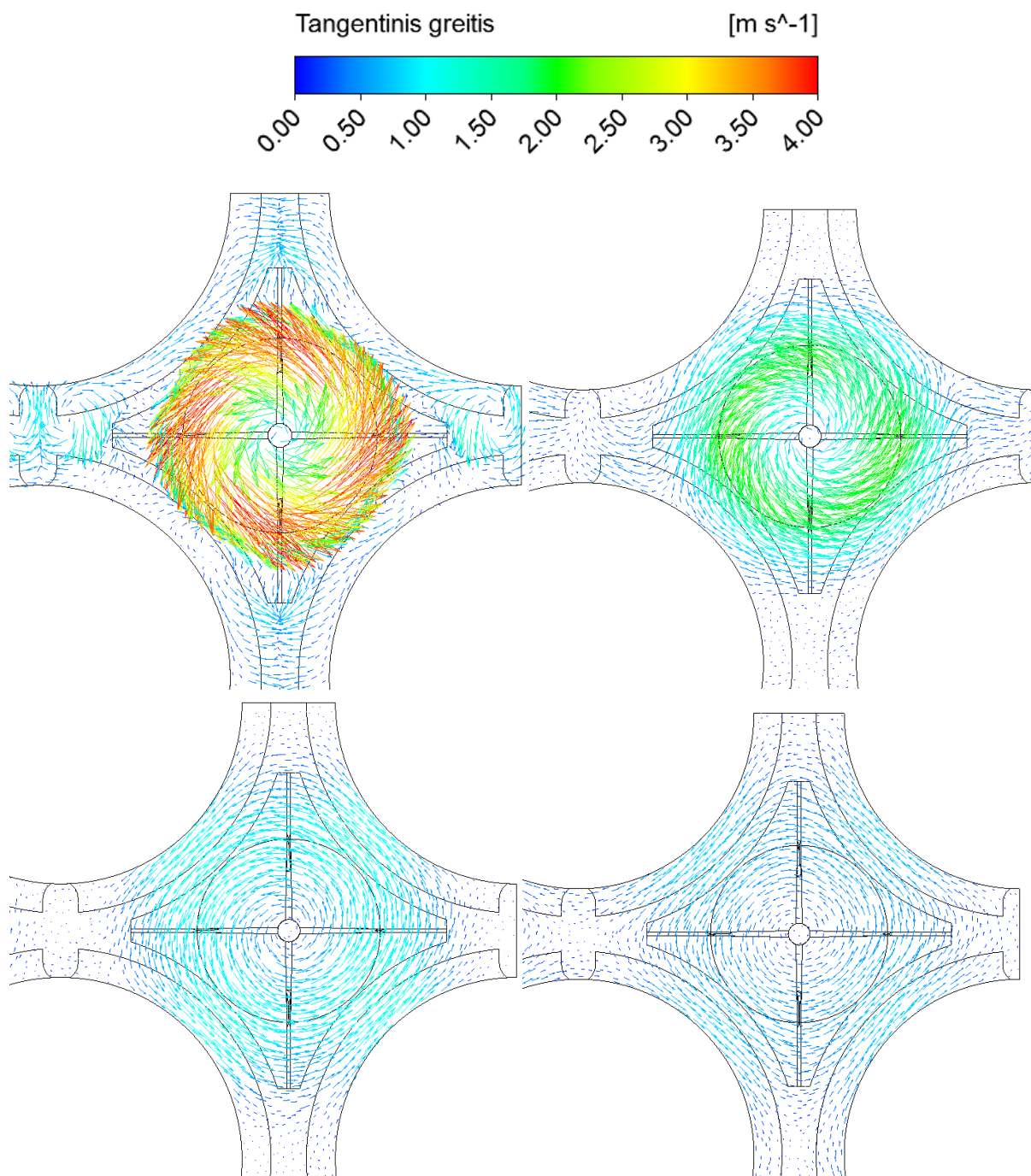
1 Priedas. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas tarpkanalinėje erdvėje, esant skirtingoms distancinių gardelių konstrukcijoms.



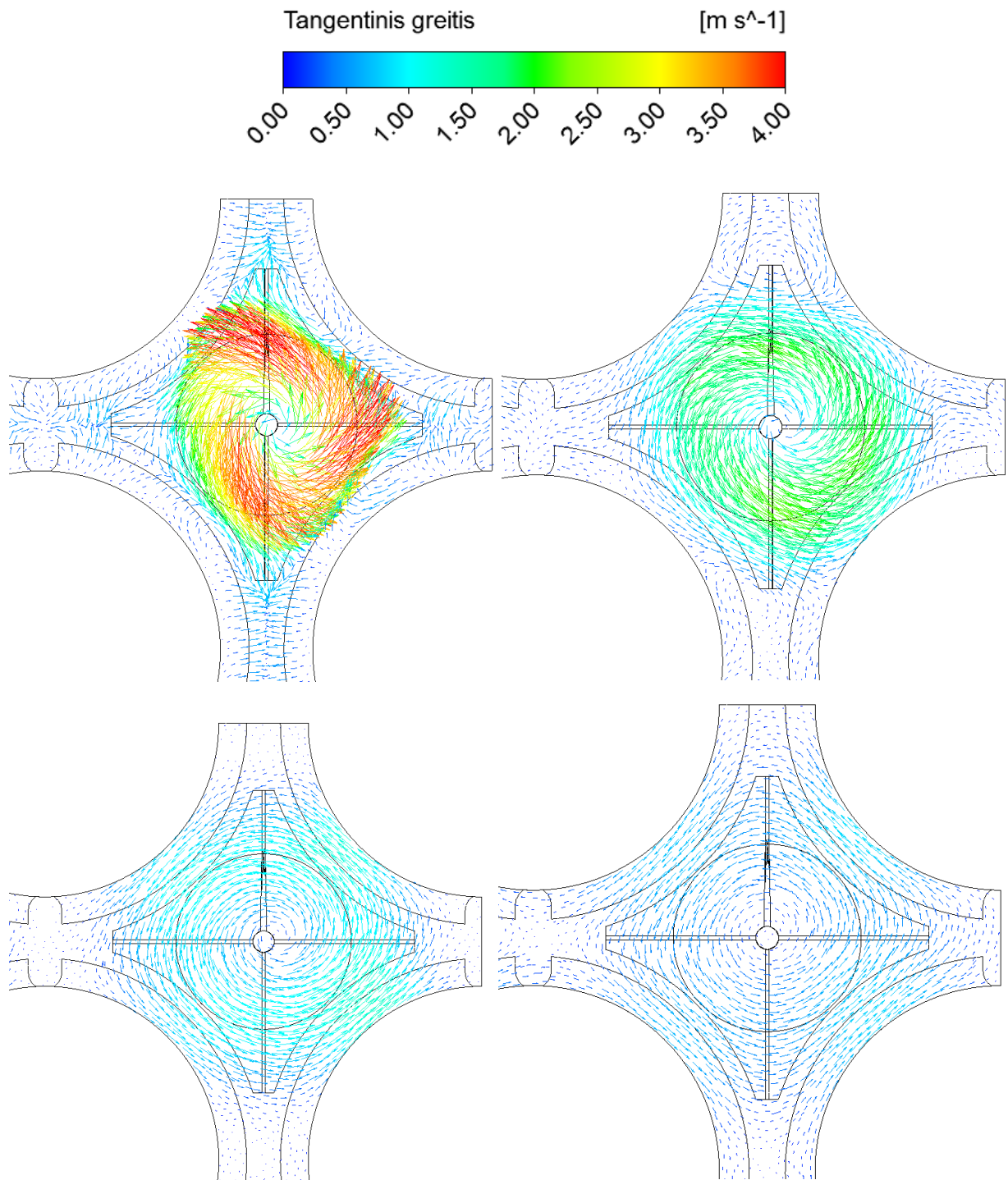
1 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas tarpkanalinėje erdvėje, kai distancinė gardelė yra be maišymo elementų. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.



2 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas tarpkanalinėje erdvėje, kai distancinė gardelė yra su 1-ojo tipo maišymo sraigtais. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.

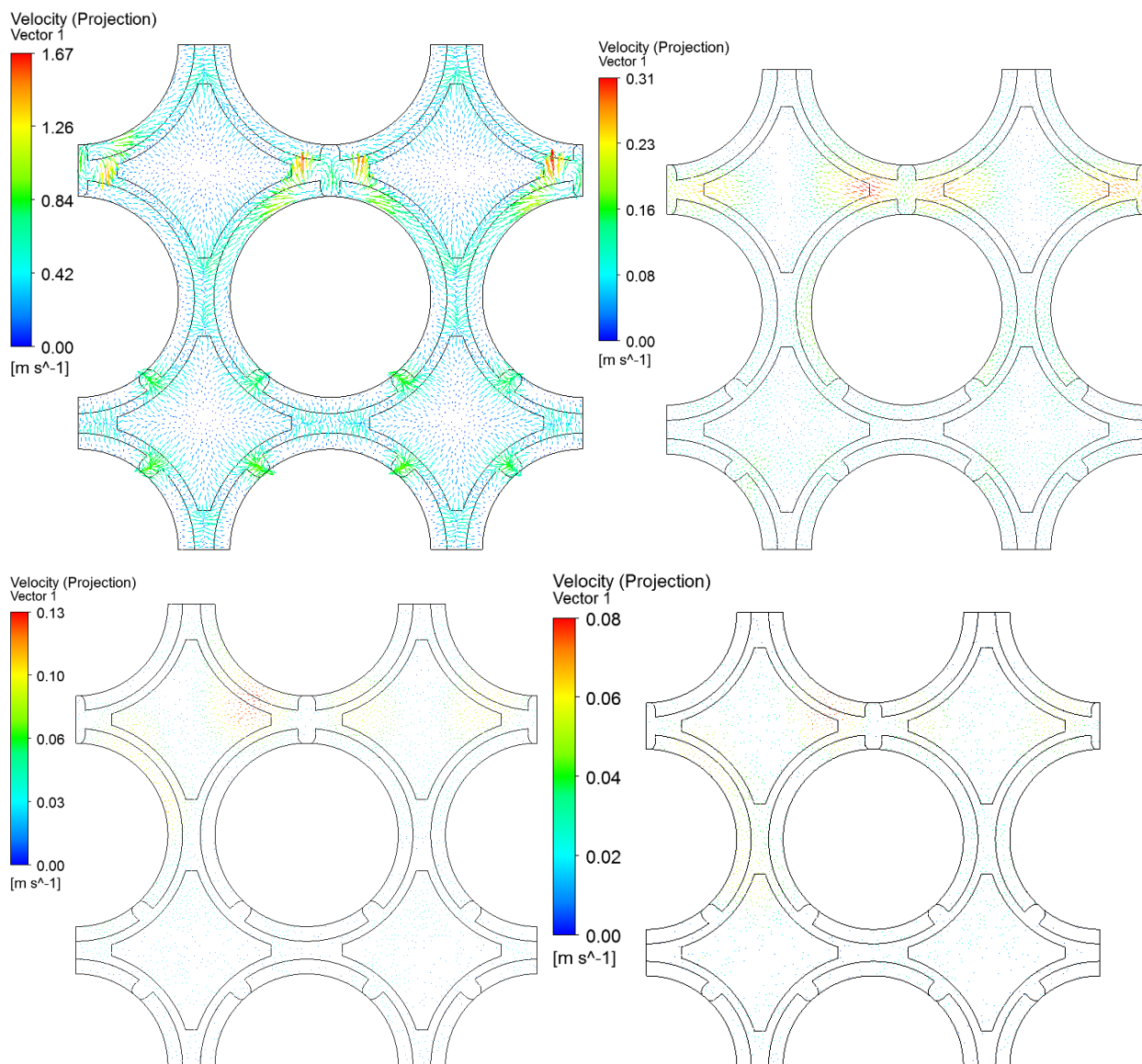


3 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas tarpkanalinėje erdvėje, kai distancinė gardelė yra su 2-ojo tipo maišymo sraigtais. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.



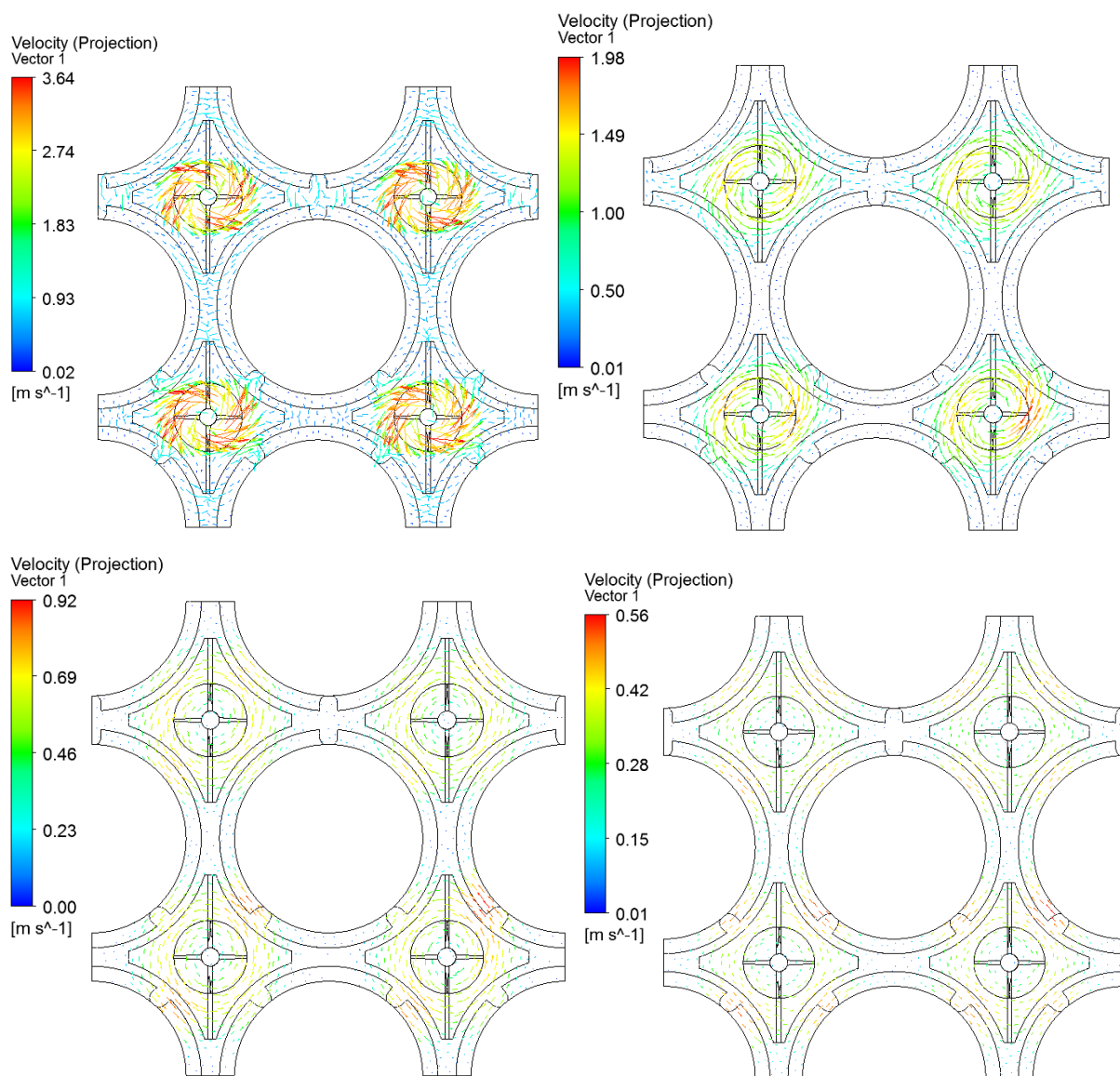
4 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas tarpkanalinėje erdvėje, kai distancinė gardelė yra su 3-ojo tipo maišymo sraigtais. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.

## 2 Priedas. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas skirtingų konstrukcijų kuro rinklėse, srautui pratekėjus 1, 4, 10 ir 20 Dh.



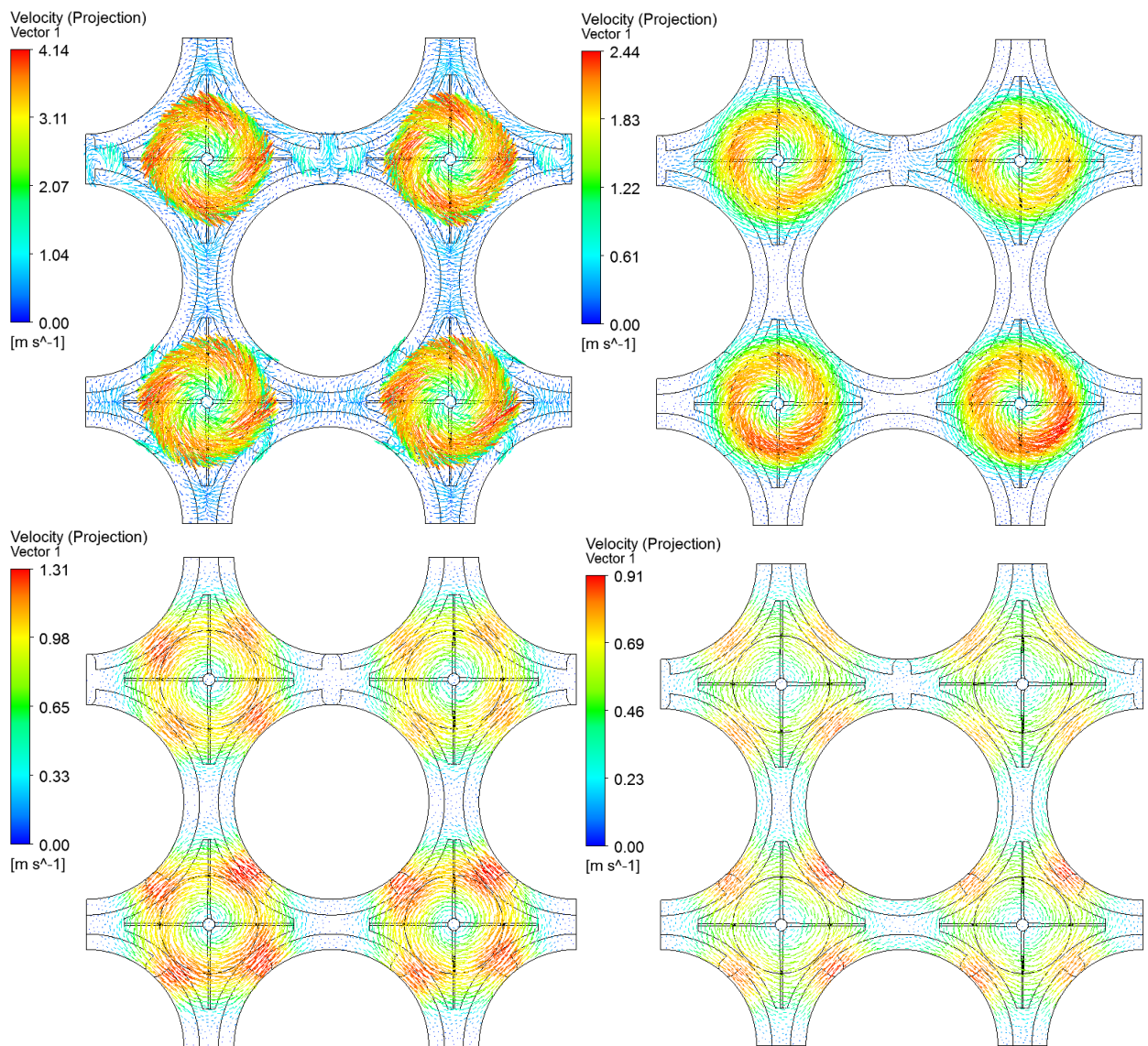
5 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas atskaitos modelio kuro rinklėje. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.



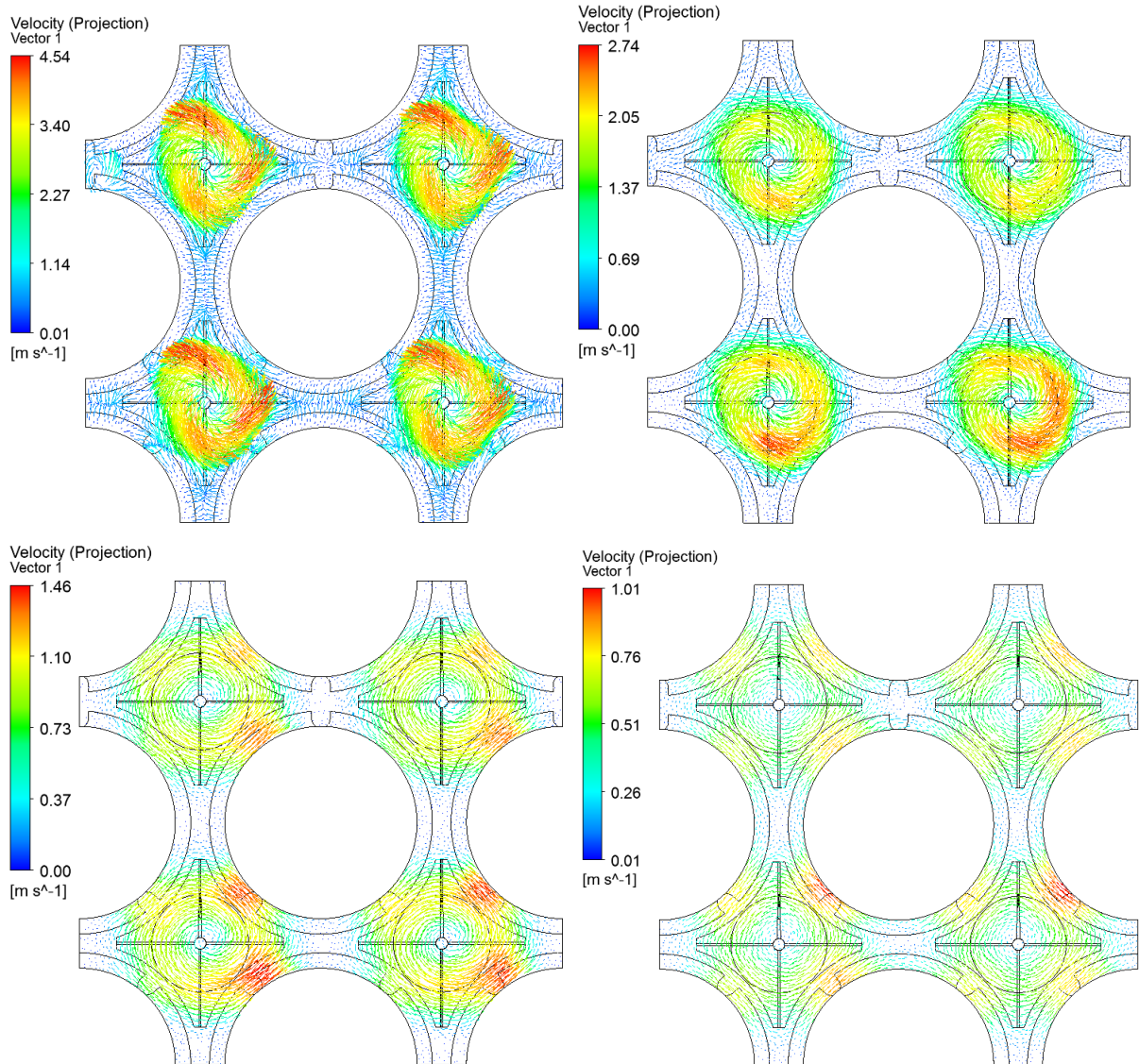


6 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas kuro rinklėje su 1-ojo tipo sraigtais. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.



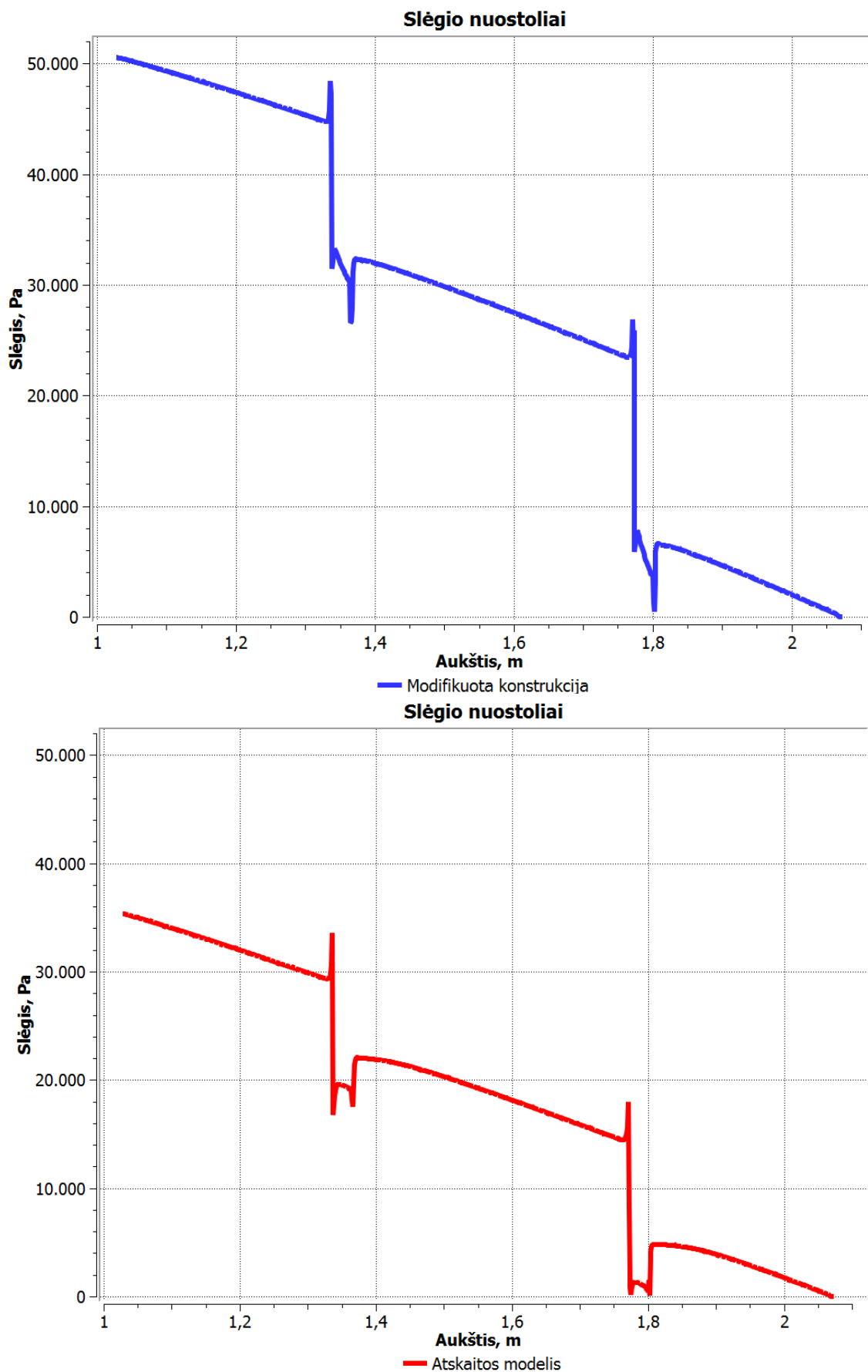


7 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas kuro rinklėje su 2-ojo tipo sraigtais. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.



8 pav. Tangentinio greičio vektorių pasiskirstymas kuro rinklėje su 3-ojo tipo sraigtais. Viršuje kairėje - srautui pratekėjus 1 Dh nuo distancinės gardelės, viršuje dešinėje - pratekėjus 4 Dh, apačioje kairėje - pratekėjus 10 Dh, apačioje dešinėje - pratekėjus 20 Dh.

### 3 Priedas. Slėgio nuostolių grafikas kuro rinklės antrame ketvirtyje tarpe tarp kuro strypų.



9 pav. Slėgio nuostolių grafikas kuro rinklės antrame ketvirtyje tarpe tarp kuro strypų. Viršuje - modifikuotos konstrukcijos kuro rinklė, apačioje - atskaitos modelio konstrukcija.