



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

Mantas Biknius

**BRANDUOLINIO KURO ELEMENTO ŠILUMINIS IR
HIDRAULINIS TYRIMAS SKAITINIAIS METODAIS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

dr. Linas Paukštaitis

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**BRANDUOLINIO KURO ELEMENTO ŠILUMINIS IR
HIDRAULINIS TYRIMAS SKAITINIAIS METODAIS**

Baigiamasis magistro projektas
Branduolinė energetika (621E32001)

Vadovas

(parašas) dr. Linas Paukštaitis

(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. Jonas Gylis

(data)

Projektą atliko

(parašas) Mantas Biknius

(data)

KAUNAS, 2016

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

Tvirtinu: _____
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)
katedros vedėjas doc. E. Puida
(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS
Studijų programa BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema **Branduolinio kuro elemento šiluminis ir hidraulinis tyrimas skaitiniais metodais**

Thermal and hydraulic investigation of nuclear fuel element by numerical methods

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

2. Darbo tikslas: **Nustatyti efektyviausią branduolinio kuro elemento maišymosi mentelių pasvirimo kampą, taip siekiant pagerinti šilumos mainus.**

3. Darbo struktūra

1. Įvadas;
2. Branduolinės energetikos apžvalga;
3. Suslėgtojo vandens reaktorių analizė;
4. Kuro elemento tyrimo kryptis;
5. Skaitinio modeliavimo pagrindas;
6. Kuro elemento skaitinio tyrimo rezultatai.

4. Reikalavimai ir sąlygos: **rengiant baigiamąjį darbą prisilaikyti Lietuvos Respublikos norminių aktų reikalavimų bei magistro baigiamojo darbo apiforminimo reikalavimų.**

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

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui: Mantui Bikniui

Užduotį gavau Mantas Biknius _____ 2016.02.02
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas dr. Linas Paukštaitis _____ 2016.02.02
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Mantas Biknius

(Studento vardas, pavardė)

Branduolinė energetika (621E32001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Manto Bikniaus**, baigiamasis projektas tema „**Branduolinio kuro elemento šiluminis ir hidraulinis tyrimas skaitiniais metodais**“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Biknius, Mantas. BRANDUOLINIO KURO ELEMENTO ŠILUMINIS IR HIDRAULINIS TYRIMAS SKAITINIAIS METODAIS. Magistro baigiamasis projektas / vadovas dr. Linas Paukštaitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: branduolinė energetika, termohidrauliniai reaktoriaus parametrai.

Reikšminiai žodžiai: *suslėgtojo vandens reaktorius, kuro rinklė, maišymosi mentė, skaičiuojamoji fluidų dinamika, efektyvumas, .*

Kaunas, 2016 m. 71 p.

SANTRAUKA

Populiariausiems suslėgtojo vandens reaktoriams pasaulyje generuojant ženklų elektros energijos kiekį jų veiklos ypatybės bei darbo parametrų optimizavimas visada išliks reikšmingais uždaviniais branduolinėje energetikoje.

Šiame darbe aprašomas suslėgtojo vandens reaktorių kuro elementas bei jo sandara, nustatoma kokia elementų paskirtis bei pasirenkama šiluminio ir hidraulinio skaitinio modeliavimo kryptis – nagrinėjamos maišymosi mentelės, sumontuotos kiekvienos tarpinės rėtinės viršuje. Šių mentelių paskirtis – sukurti dirbtines vietines kliūtis tekančiam aušinančiam vandeniui, taip sukeliant sūkurius, turbulizuojant vandens srautą bei didinant šilumos nuo kuro elementų paviršiaus atidavimą.

Šiame darbe keliami uždaviniai – modifikuoti geometrinį kuro elemento modelį keičiant rėtinės struktūrą – maišymosi mentelės pasvirimo kampą ašinio aušinančio vandens srauto atžvilgiu, apskaičiuoti reikiamas kraštines sąlygas, aprašyti vykstančią fiziką skaitiniais metodais paremtoje ANSYS CFX 15.0 programoje bei apskaičiuoti šiluminius ir hidraulinius parametrus nagrinėjamoje sistemoje. Pagrindinis darbo tikslas – nustatyti, koks maišymosi mentelių pasvirimo kampas yra efektyviausias gerinant šilumos mainus bei įvertinti įtaką kitiems reaktoriaus aktyviosios zonos parametrams.

Atlikus modeliavimą bei gavus rezultatus, įvertinama maišymosi mentelių įtaka šiluminiams bei hidrauliniams procesams, apskaičiuojamas reaktoriaus efektyvumo padidėjimas. Darbe taip pat nustatomos tolimesnės panašių tyrimų rekomendacijos bei galimi tikslai, siekiant dar efektyviau išnaudoti maišymosi menteles, pagal gautus rezultatus pateikiamos išvados.

Biknius, Mantas. *THERMAL AND HYDRAULIC INVESTIGATION OF NUCLEAR FUEL ELEMENT BY NUMERICAL METHODS*. Master's final project / supervisor dr. Linas Paukštaitis. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: nuclear engineering, thermohydraulic reactor parameters

Key words: pressurized water reactor, fuel bundle, mixing vane, computational fluid dynamics, efficiency.

Kaunas, y. 2016. 71 p.

SUMMARY

The most popular pressurized water reactors generate a significant amount of electricity worldwide. Analysing their performance and optimising working parameters therefore will remain meaningful tasks in nuclear engineering.

This paper incorporates description of pressurised water reactor fuel bundles and their assemblies, defines the purpose of each element, thus enabling to select the area of thermal and hydraulic on top of all interim grid spacers in the fuel bundle. The purpose of these mixing vanes is to create local flow obstructions and induce vortexes, which in turn makes the flow more turbulent and enables the fuel rods to give off their generated heat more easily to the cooling water.

The tasks of this paper are to make modifications of the geometrical model of the fuel bundle by changing the grid spacer design – changing the mixing vanes' angle relative to the coolant flow, also to calculate the needed inlet conditions of the system, make evaluation and description of the ongoing physics by using the numerical simulation software ANSYS CFX 15.0. Calculating thermal and hydraulic parameters of the system is also considered as one of the tasks. The main goal is to find out at which angle the mixing vanes create the biggest effect on the reactor efficiency by making heat transfer from the fuel to the coolant more effective, also evaluating the influence to other reactor core parameters is to be analysed.

After the numerical simulations are done and the results are calculated, the mixing vane effect for the thermal and hydraulic processes is investigated, the increased efficiency of the reactor is calculated. This paper also includes future recommendations for similar works in establishing the best mixing vane application. The conclusions based on the numerical simulation results are also presented.

Turinys

ĮVADAS	11
1. BRANDUOLINĖ ENERGETIKA PASAULYJE.....	13
2. SUSLĖGTOJO VANDENS REAKTORIAI.....	20
2.1 Suslėgtojo vandens reaktoriaus struktūra bei veikimo principas.....	20
2.2 Suslėgtojo vandens reaktoriaus aktyvioji zona.....	22
2.3 Suslėgtojo vandens reaktoriaus kuro rinklės struktūra.....	24
3. SUSLĖGTOJO VANDENS REAKTORIAUS KURO RINKLĖS SKAITINIO TYRIMO KRYPTIS	27
4. MODIFIKUOTOS KURO RINKLĖS SKAITINĖS ANALIZĖS PAGRINDAS	31
4.1 Sistemų diskretizavimas	31
4.2 Turbulentinio srauto modeliavimas	33
4.3 Modifikuotos kuro rinklės modelis.....	35
4.4 Kraštinės sąlygos skaitiniam modeliavimui	39
5. SKAITINIO TYRIMO REZULTATAI	41
5.1 Skaitinio modelio aprašymas.....	41
5.2 Skaičiavimo rezultatai	44
5.3 Hidraulinis skaičiuojamojo modelio tyrimas.....	49
5.4 Šiluminis skaičiuojamojo modelio tyrimas	60
5.5 Skaitinio tyrimo rezultatų įtakos vertinimas reaktoriaus ekonomikai	66
6. IŠVADOS	70
7. LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	71

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Korpusinio suslėgtojo vandens reaktoriaus (PWR) korpusas	14
1.2 pav. Branduolinių reaktorių pasiskirstymas pasaulyje pagal veikiančių vienetų kiekį bei pagal instaliuotos galios dalį rinkoje	16
2.1 pav. Suslėgtojo vandens reaktoriaus principinė vieno kontūro schema	21
2.2 pav. Suslėgtojo vandens reaktoriaus aktyviają zoną aušinančio vandens tekėjimo kryptis ..	23
2.3 pav. Keturių sričių LLLP kuro įkrovos šablonas	24
2.4 pav. Trijų sričių OILP kuro įkrovos šablonas.....	25
3.1 pav. Standartinė suslėgtojo vandens reaktoriaus kuro rinklė.....	27
3.2 pav. Maišymosi menčių rėtinė suslėgtojo vandens reaktoriaus kuro rinklėje	28
3.3 pav. Kuro rinklės maišymosi mentelės išdėliotos rėtinės viršuje	30
4.1 pav. 5x5 šiluminių elementų išsidėstymo skaičiuojamasis geometrinis modelis	37
4.2 pav. Antrinio srauto greičio pokytis naudojant periferines maišymosi mentes	37
4.3 pav. Maišymosi menčių išdėstymas skaičiavimo modelyje	38
4.4 pav. Mentelės gabaritiniai matmenys.	38
4.5 pav. Skaičiuojamojo modelio matmenys	39
5.1 pav. Posvyrio (angl. skewness) vaizdinis paaiškinimas	41
5.2 pav. Skaičiuojamojo modelio tinklelis aplink kuro strypus bei maišymosi mentes	42
5.3 pav. Naudojamo tinklelio elementų dydžio pasiskirstymas. Posvyrio rodiklis – 0,23	43
5.4 pav. Skaičiuojamojo modelio aprašomasis atvaizdas	43
5.5 pav. Apskaičiuotų greičio reikšmių atvaizdavimas (maišymosi menčių posvyris – 0°)	44
5.6 pav. Skaitinio tyrimo, esant 0° maišymosi menčių posvyriui, slėgio (kairėje) ir temperatūros (dešinėje) vaizdinis reikšmių atvaizdavimas	45
5.7 pav. Apskaičiuotų greičio reikšmių atvaizdavimas (maišymosi menčių posvyris – 30°)	46
5.8 pav. Skaitinio tyrimo, esant 30° maišymosi menčių posvyriui, slėgio (kairėje) ir temperatūros (dešinėje) vaizdinis reikšmių atvaizdavimas	46
5.9 pav. Antrinio srauto nągrinėjimo plokštuma	47
5.10 pav. Antrinio srauto dydis kintant maišymosi menčių posvyrio kampui	48
5.11 pav. Pasirinkti šiluminių ir hidraulinių parametrų analizės taškai	49
5.12 pav. Pasirinktos šiluminių ir hidraulinių parametrų analizės vietos išilgai visos sistemos ..	49
5.13 pav. a) slėgio sistemos centre priklausomybės bei b) slėgio sistemos centre skirtumo priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas	51
5.14 pav. a) slėgio ant kuro elemento paviršiaus priklausomybės bei b) slėgio ant kuro elemento paviršiaus skirtumo priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas	53

5.15 pav. a) srauto greičio bei b) srauto greičio pokyčio sistemos centre priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas	55
5.16 pav. Vietiniai tankio padidėjimo židiniai prieš menteles	56
5.17 pav. Srauto greičio vektoriai ištekėjime iš skaičiuojamojo modelio	57
5.18 pav. a) srauto greičio bei b) srauto greičio pokyčio prie kuro elemento sienelės priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas	59
5.19 pav. a) temperatūra bei b) temperatūros pokytis sistemos centre	61
5.20 pav. a) temperatūra bei b) temperatūros pokytis prie kuro elemento sienelės.....	64
5.21 pav. Nu panašumo kriterijaus priklausomybė nuo mentelės posvyrio kampo	65
5.22 pav. Šiluminių parametrų įtaka finansinei branduolinės jėgainės pusei.....	67
5.23 pav. Atlikto skaitinio tyrimo finansinės įtakos įvertinimas	69

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Labiausiai nuo branduolinės energetikos priklausančios šalys.....	14
1.2 lentelė. Reaktorių tipų paplitimas pasaulyje bei užimama komercinių reaktorių rinkos dalis	16
1.3 lentelė. Veikiančių atominių reaktorių pasiskirstymas pagal valstybes	18
1.4 lentelė. Elektros energijos gamyboje naudojamo pirminio kuro (energijos šaltinio) pasiskirstymas pasaulyje	19
2.1 lentelė. Westinghouse reaktorių aktyviosios zonos parametrai	23
4.1 lentelė. Apskaičiuotos kraštinės sąlygos skaitiniam modeliavimui.....	40
5.1 lentelė. Slėgio sistemos centre priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo	50
5.2 lentelė. Slėgio sistemos centre skirtumas tarp 0° ir visų kitų nagrinėtų mentelės pasvirimo kampų	50
5.3 lentelė. Slėgio ant kuro elemento sienelės priklausomybės bei slėgio ant kuro elemento sienelės skirtumo priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo	52
5.4 lentelė. Srauto greičio sistemos centre priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo.....	54
5.5 lentelė. Srauto greičio sistemos centre skirtumas tarp 0° ir visų kitų nagrinėtų mentelės pasvirimo kampų.....	54
5.6 lentelė. Srauto greičio prie kuro elemento sienelės priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo	57
5.7 lentelė. Srauto greičio pokyčio prie kuro elemento sienelės priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo	58
5.8 lentelė. Vandens temperatūra sistemos centre.	60
5.9 lentelė. Temperatūros skirtumai sistemos centre, lyginant 0° atvejį su visais likusiais	60
5.10 lentelė. Vandens temperatūra prie kuro elemento paviršiaus	62

5.11 lentelė. Vandens temperatūros pokytis prie kuro elemento sienelės	62
5.12 lentelė. Vidutiniai šiluminiai skaitinio tyrimo rezultatai.	65
5.13 lentelė. Šiluminių skaitinio modeliavimo parametrų ekonominis vertinimas	66
5.14 lentelė. Hidraulinį parametrų ekonominio įvertinimo rodikliai.....	68

IVADAS

Branduolinė energetika – tai technologijų visuma, paremta kontroliuojama branduolių skilimo reakcija. Šios reakcijos metu išsiskiria šiluma, kuri vėliau yra naudojama elektros generacijai ir šilumos gamybai įvairiems poreikiams. Branduolinę energetiką sudaro keli glaudžiai susiję ūkiai – branduolinio kuro kasimas, šio kuro sodrinimas, energijos generavimas elektrinėse bei jau panaudoto kuro saugojimas ir laidojimas.

Branduolinė energetika pasaulyje plėtojama jau daugiau kaip 70 metų. Pirmą kartą branduolių dalijimąsi 1934 m. stebėjo italų fizikas Enrico Fermi, kai eksperimentuose uranas buvo bombarduojamas neutronais. Tačiau šis reiškinys nebuvo visiškai suprastas, kol 1938 m. Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lise Meitner ir Otto Robert Frisch, tyrinėdami produktus, gautus iš urano, nustatė, jog mažas neutronas padalina didelį urano atomą į dvi apytiksliai lygias dalis. Prasidėjo aktyvūs branduolių dalijimosi tyrimai.

1942 m. gruodžio 2 d. vadovaujant Enrico Fermi Čikagoje (JAV) buvo paleistas pirmasis pasaulyje branduolinis reaktorius „Chicago Pile-1“. Šis eksperimentas buvo dalis Manheteno projekto, finansuojamo JAV vyriausybės, kurio tikslas buvo sukurti branduolinį ginklą. Šis pirmasis reaktorius veikė tik apie pusvalandį, neturėjo jokios aušinimo sistemos ir apsaugos nuo sklindančios radiacijos.

Pirmoji eksperimentinė branduolinė jėgainė EBR-I, gaminusi elektrą, buvo paleista 1951 m. gruodžio 20 d. Arco mieste (JAV). Tuo metu ji gamino energijos tik kelioms 200 vatų lemputėms.

Pirmą komercinę jėgainę 1954 m. birželio 27 d. Obninske pastatė Tarybų Sąjunga. Obninsko branduolinės jėgainės elektrinė galia tesiekė apie 5000 kW.

Laikui bėgant branduolinė energija iš eksperimento tapo vienu pagrindinių pasaulio elektros energijos gaminimo metodų. Didėjantis elektros energijos poreikis pramonėje bei namų ūkiuose skatino elektros energijos infrastruktūros plėtrą – intensyviai pradėtos statyti elektrinės, auštos įtampos perdavimo linijos, kiti reikalingi įrenginiai. Žmonių aplinkai tampant vis labiau priklausomai nuo elektros energijos jos tiekimo efektyvumas taip pat tapo vienu svarbiausių uždavinių elektros gamybos bei perdavimo sferose. Pradėti intensyvūs planavimo, skaičiavimo bei bazinės elektros energijos diegimo veiksmai. Visose minėtose srityse branduolinė energija įrodė savo tinkamumą būti svarbia šiandieninių elektros tiekimo bei gamybos sistemų dalimi.

Atsižvelgiant į branduolinės energijos svarbą tapo aktualu tinkamai bei efektyviai išnaudoti branduolių skilimo reakcijų metu išgaunamą energijos kiekį, paversti jį mechanine energija, kuri elektros generatoriuose kuria elektros energiją. Šiuo tikslu projektuojant branduolinius reaktorių didžiulis dėmesys buvo skirtas ne tik saugumui, bet ir efektyvumui gerinti. Kiekvienas reaktoriaus elementas, pradedant aktyviosios zonos dydžio parinkimu, baigiant smulkiomis kuro elementų

dalimis bei jų forma, yra sukurti siekiant išgauti maksimalų galimą energijos kiekį iš skilimo reakcijų aktyviojoje zonoje. Šiame darbe nagrinėjama viena kuro elemento sudėtinių dalių bei šios dalies įtaka reaktoriaus efektyvumui.

Darbo tikslas – nustatyti, koks branduolinio kuro elemento maišymosi mentelių pasvirimo kampas yra efektyviausias gerinant šilumos mainus bei įvertinti šio parametro įtaką reaktoriaus darbo parametrams bei atlikti ekonominį įvertinimą.

Šiame darbe keliami uždaviniai – parengti geometrinį kuro elemento modelį remiantis suslėgto vandens reaktoriaus struktūrinių dalių matmenimis, atlikti geometrinio kuro elemento modelio modifikaciją keičiant maišymosi mentelės pasvirimo kampą ašinio aušinančio vandens srauto atžvilgiu, apskaičiuoti reikiamas kraštines sąlygas, aprašyti vykstančią fiziką skaitiniais metodais paremtoje ANSYS CFX 15.0 programoje bei apskaičiuoti šiluminius ir hidraulinius parametrus nagrinėjamoje sistemoje.

1. BRANDUOLINĖ ENERGETIKA PASAULYJE

Branduolinės energetikos raidoje išryškėjo kelios skirtingos branduolinių reaktorių vystymo kryptys. Tam įtakos turėjo tiek mokslininkų įsitikinimai, tiek siekimas didinti naudingumą bei saugumą, tiek reaktorių vystančiosios šalies geografinė padėtis bei jos turimi išteklių (pvz. kanadietiškas CANDU).

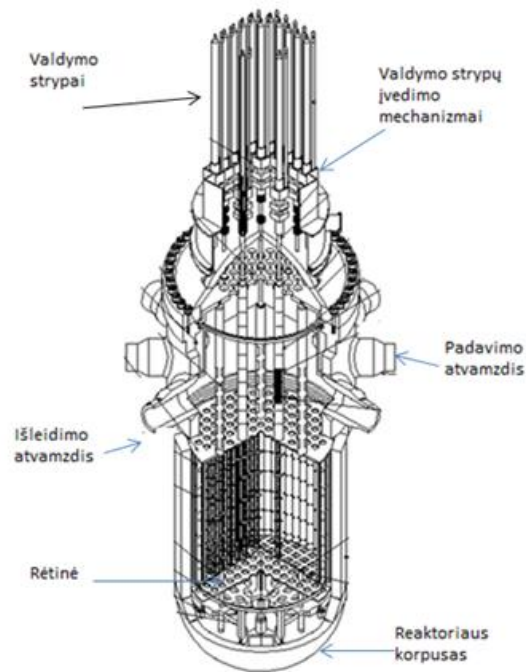
Branduoliniai reaktoriai gali būti skirstomi pagal kelis kriterijus. Pagrindiniai jų:

- Pagal konstrukciją reaktoriai skirstomi į:
 - a) kanalinius;
 - b) korpusinius;
 - c) baseininius.
- Pagal neutronų, sukeliančių branduolines reakcijas, rūšį reaktoriai skirstomi į:
 - a) lėtųjų (šiluminių) neutronų ;
 - b) tarpinių neutronų;
 - c) greitųjų neutronų.
- Pagal aušinimo skysčio rūšį reaktoriai skirstomi į:
 - a) lengvojo vandens;
 - b) sunkiojo vandens;
 - c) dujinius;
 - d) skysto metalo.

Kanaliniai reaktoriai dažniausiai sudaryti iš grafito blokų klojinio, kuriame yra išgręžiami kanalai, skirti branduoliniam kurui (energetiniai/darbiniai kanalai) arba įvairiems instrumentams (technologiniai kanalai skirti matuoti temperatūrai ir kitiems parametrams). Korpusiniai reaktoriai yra sudaryti iš vieno betoninio arba plieninio korpuso, kurio viduje įrengiama aktyvioji zona su šiluminiais elementais (ŠIEL'ai), kuriuose yra branduolinis kuras. Tiek kanalinių reaktorių darbinis kanalus, tiek korpusinių reaktorių ŠIEL'us apiplauna aušinimo skystis, kuris priklausomai nuo konstrukcijos, yra vanduo, dujos arba skystas metalas. Baseininiai reaktoriai dažniausiai skirti atlikti moksliniams tyrimams, jų aktyvioji zona laikoma vandens baseine. Vanduo veikia ir kaip neutronų lėtiklis, ir kaip aušinimo skystis.

Kiekvienas reaktoriaus tipas turi savų privalumų ir trūkumų. Nepaisant to, pasaulyje yra naudojami įvairūs reaktoriai, pagal savo specifikaciją pasirinkti dėl vieno ar kitų priežasčių statybos metu tikė ekonominei, politinei bei energetinei šalies pozicijai.

Šiuo metu pasaulyje yra 447 veikianys civiliniai komerciniai branduoliniai reaktoriai. Dar 66 reaktoriai yra statomi penkiolikoje pasaulio valstybių. Branduolinė energija, skaičiavimais, atliktais 2012 metais, sudarė apie 10,9 % pasaulinių elektros gamybos pajėgumų. Net 13 valstybių šalies viduje pasikliauja branduolinės energijos gamyba, kuri užtikrina daugiau nei ketvirtadalį



1.1 pav. Korpusinio suslėgtojo vandens reaktoriaus (PWR) korpusas

šalies elektros poreikio. Sąrašo viršuje – Prancūzija. Lietuva iki 2009 metų buvo antroje vietoje (pasauliniame sąrašė), iki kol nebuvo uždaryta Ignalinos atominė elektrinė, naudojusi du rusiškus RBMK-1500 tipo kanalinius grafitinius reaktorius (įvairiais skaičiavimais Ignalinos atominė elektrinė Lietuvoje pagamindavo iki 75 % šalies elektros poreikio).

1.1 lentelė. Labiausiai nuo branduolinės energetikos priklausančios šalys

Valstybė	Kontinentas	Reaktorių kiekis šalyje	Branduolinės energijos dalis, %
Prancūzija	Europa	58	76,9
Slovakija	Europa	4	56,8
Vengrija	Europa	4	53,6
Ukraina	Europa	15	49,4
Belgija	Europa	7	47,5
Švedija	Europa	10	51,5
Šveicarija	Europa	5	37,9
Slovėnija	Europa	1	37,2
Čekija	Europa	6	33,8
Suomija	Europa	4	34,6
Bulgarija	Europa	2	31,8
Armėnija	Europa	1	30,7
Pietų Korėja	Azija	24	30,4

Šis rodiklis negali atskleisti tikrojo šalies potencialo branduolinėje energetikoje, kadangi tokios šalys kaip Slovėnija (Westinghouse suslėgtojo vandens reaktorius) ir Armėnija (VVER V-270) eksploatuoja tik po vieną reaktorių, tačiau jo pajėgumo užtenka užtikrinti nemažą šalies elektros gamybos dalį. Atsižvelgiant į tai, kad didžioji dalis šalių, kurios naudojamos branduolinę energiją generuoja didelę dalį visos šalyje pagaminamos elektros energijos yra Europoje, galima teigti, kad šis regionas yra labiausiai priklausomas nuo branduolinės energijos raidos ir perspektyvos ateityje. Jei laikui einant šios jėgainės bus uždarytos (tai savaime suprantama yra neišvengiama), regionas taps pažeidžiamas energetiniu požiūriu – juk Europoje pagrindinis dujų tiekėjas yra Rusija, o šiuo metu vis dar be branduolinio kuro elektros energijos gamybai pagrinde naudojamos gamtinės dujos bei anglis. Čia neįtraukiama atsinaujinanti energetika, kadangi jos gamybos pajėgumas, nors ir užima kelis procentus visos pagaminamos pasaulyje energijos, neužtikrina pastovaus elektros energijos tiekimo į tinklus, bei kol kas yra laikoma brangia alternatyva. Akivaizdu, jog Europa turi itin saugoti savo branduolinius gamybos pajėgumus ir ilgalaikėje perspektyvoje svarstyti apie naujus reaktorius.

Vokietija, kaip šalis, kuri turi 17-a branduolinių reaktorių ir jais aprūpindavo iki 30 % šalies elektros poreikio, po 2011 m. Japonijoje įvykusios Fukušimos jėgainės avarijos, nusprendė priimti visiškos branduolinės energetikos atsisakymo strategiją. Nors šis susitarimas apipintas ilgomis politinėmis istorijomis, realybėje jis yra vykdomas. Šiuo metu veikiantys liko tik devyni reaktoriai, kurių veikla kol kas licencijuota iki 2021 metų. Vokietija išleidžia apie 2,5 mlrd. € per metus subsidijuodama savo anglies kasyklas, kad jos gamintų apie pusę šalies elektros energijos (kai branduolinė energija apėmė 31 % gamybos pajėgumą be jokių subsidijų). Gerokai daugiau kaip pusė šios energijos yra gaunama iš rusvųjų akmens anglių pramonės, kuri gamina apie 1,25 tonų anglies dioksido vienai MWh. 2013 m. vasarį Vokietijos Energetikos ir aplinkos ministras sakė, kad Energiewende politikos išlaidos – reformuojant ir pertvarkant Vokietijos energetikos sektorių – iki 2030-ųjų pabaigos gali pasiekti 1000 mlrd. €. Atsinaujinančios energijos šaltinių elektros tiekimo susubsidijavimas kainuos vien 680 mlrd. € ir šis skaičius dar padidės, jei elektros kainos ateityje mažės. Tai puikiai atspindi, kokios didelės ekonominės pasekmės gali būti juntamos visiškai atsisakius branduolinės energijos.

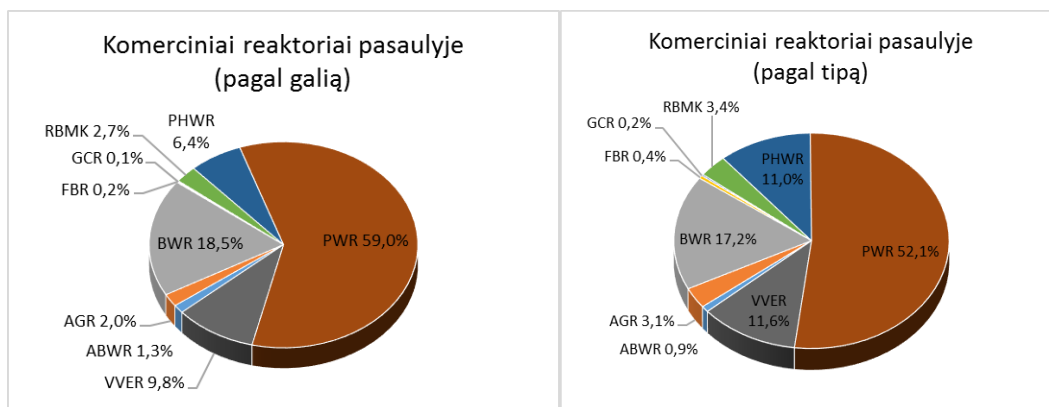
Atsižvelgiant į tai, kad dažniausiai kalbant apie branduolinę energetiką kalbama būtent apie komercinius branduolinius reaktorius, kurie skirti elektros energijos generavimui ir pardavimui į skirstymo tinklus, toliau pateikiama šiek tiek statistikos apie veikiančių komercinių reaktorių paplitimą pasaulyje.

Pagal 1.2 lentelėje bei 1.2 paveiksle pateiktus duomenis akivaizdu, kad pasaulyje labiausiai paplitę suslėgtojo vandens reaktoriai PWR (angl. pressurised water reactor), užimantys daugiau nei pusę visų komercinių reaktorių pasaulyje. Tai gali būti grindžiama pasiteisinsiu dizainu

1.2 lentelė. Reaktorių tipų paplitimas pasaulyje bei užimama komercinių reaktorių rinkos dalis

Reaktoriaus tipas	Bendra instaliuota galia, MW	Veikiančių reaktorių kiekis, vnt.	Pasaulinė dalis pagal galią, %	Pasaulinė dalis pagal tipą, %
ABWR	5 063	4	1,3 %	0,9 %
AGR	7 685	14	2,0 %	3,1 %
BWR	70 979	77	18,5 %	17,2 %
FBR	580	2	0,2 %	0,4 %
GCR	490	1	0,1 %	0,2 %
RBMK	10 219	15	2,7 %	3,4 %
PHWR	24 603	49	6,4 %	11,0 %
PWR	227 100	233	59,0 %	52,1 %
VVER	37 882	52	9,8 %	11,6 %
Iš viso pasaulyje:	384 601	447	100 %	100,0 %

– suslėgtojo vandens reaktoriai pasižymi stabilumu. Jei reaktorius pradeda perkaisti, aplink kuro rinkles esantis vanduo, kuris yra naudojamas ir kaip lėtiklis, pradeda plėstis, vietomis netgi garuoti, taip sumažindamas savo lėtinimo savybes ir sumažindamas šiluminių neutronų kiekį – mažesnis šiluminių neutronų kiekis tiesiogiai veikia reaktoriaus kure esančių urano izotopo U-235 skilimo greitį, sumažina reaktoriaus galią bei temperatūros viršijimą. Šiuose reaktoriuose įrengti du kontūrai atskiria per reaktorių tekantį fluidą nuo kitų komponentų, tokių kaip turbina, kondensatorius ir kiti įrenginiai, taip išvengiant radioaktyvių elementų sklaidos. Suslėgtojo vandens tipų reaktoriai taip pat pasižymi pasyviu reaktoriaus sustabdymu – tai saugos priemonė, kuomet reaktoriaus viduje vykstančių skilimo reakcijų greitis drastiškai sumažinamas naudojant



1.2 pav. Branduolinių reaktorių pasiskirstymas pasaulyje pagal veikiančių vienetų kiekį bei pagal instaliuotos galios dalį rinkoje

neutronus sugeriančios medžiagas (dažniausiai boro, kadmio ir kitų metalų kombinacija). Valdymo strypai virš reaktoriaus kabo naudojant elektromagnetus ir, dingus elektros energijai, dėl gravitacijos sukrenta į reaktorių bei jį sustabdo. Šios esminės saugos priemonės leido suslėgtojo vandens tipo reaktoriams plačiai paplisti pasaulyje bei užsitarnauti populiariausio tipo vardą.

Kiti mažiau populiariūs reaktoriai yra VVER (rus. Водо-водяной энергетический реактор; vandens-vandens energetinis reaktorius, suprojektuotas ir gaminamas Rusijoje, įmonės Rosatom), PHWR (angl. pressurised heavy water reactor) – suslėgtojo sunkiojo vandens reaktorius, Kanadoje suprojektuotas, gaminamas ir ten dažniausiai naudojamas CANDU tipo reaktorius, bei BWR (angl. boiling water reactor) – verdančiojo vandens tipo reaktoriai. Prie pastarųjų galima priskirti ir ABWR (angl. advanced boiling water reactor) – pažangusis verdančiojo vandens reaktorius, kurio fizikinis veikimo principas labai panašus į paprastųjų BWR tipo reaktorių. ABWR reaktorius gali pasigirti specifiniais patobulinamais konstrukcijų, saugos ir kitose srityse, leidžiančiomis šio tipo reaktoriams tapti ekonomiškais bei visuomenės saugos požiūriu priimtinais reaktoriais. ABWR reaktoriai laikomi vienu iš labiausiai tikėtinų reaktorių, beplėšiančių savo skaičių pasaulinėje rinkoje. Šiuo metu pasaulyje nuo 1996 m. jų veikia tik 4 vienetai (visi Japonijoje). Toks pat reaktorius (1350 MWe galios) siūlomas statyti ir Lietuvoje.

Reaktorių pasiskirstymas pagal regionus (žemynus) taip pat ganėtinai aiškus – populiariausi PWR tipo reaktoriai pasiskirstę po visą pasaulį (Š. Amerika, Europa, Azija), panašiai kaip ir BWR tipo reaktoriai, tačiau CANDU tipo reaktoriai labiausiai paplitę savo „namų“ rinkoje – Kanadoje bei Azijoje (Kinija, Indija). VVER reaktoriai plačiausiai naudojami buvusiose Sovietų Sąjungos valstybėse, visų pirma Rusijoje bei Ukrainoje, taip pat ir Čekijoje, Vengrijoje, t. y. Rytų bei Pietryčių Europoje. Dėl šio specifinio pasiskirstymo, kuris veikiamas kaimyninių valstybių tarpusavio santykiais paremtu bendradarbiavimu, galima daryti išvadą, kad populiariausi ir universaliausi tipai, kurie užkariavo visas pasaulio rinkas, yra PWR bei BWR, kartu užimantys beveik 70 % visų pasaulyje esančių reaktorių.

Tarp daugiausiai branduolinių reaktorių turinčių šalių (žr. 1.3 lent.) pirmauja Jungtinės Amerikos Valstijos, kurios buvo branduolinės energijos pradininkės – II-ojo pasaulinio karo metu intensyviai vystyta branduolinių ginklų programa netruko pereiti į komercinių reaktorių, galinčių už prieinamą kainą stabiliai tiekti elektros energiją, rinką. Prie JAV, kaip vienos daugiausiai turinčių reaktorių, prisijungia ir Prancūzija, Japonija, Rusija, Kinija, Pietų Korėja, Indija, Kanada bei Jungtinė Karalystė. Šios devynios valstybės eksploatuoja beveik 80 % visų pasaulio reaktorių, taigi laikomos didžiausią indėlį į šios energetikos krypties vystymąsi bei tolimesnę raidą teikiančiomis valstybėmis. Visose išskyrus Rusiją, Kiniją bei Indiją, vyrauja išskirtinai PWR bei BWR tipų reaktoriai.

1.3 lentelė. Veikiančių atominių reaktorių pasiskirstymas pagal valstybes

Šalis	Reaktorių kiekis, vnt.	Bendra instaliuota galia, MW	Dalis pasauliniu mastu (pagal kiekį), %	Dalis pasauliniu mastu (pagal galią), %
JAV	103	101 841	23,04 %	26,48 %
Prancūzija	58	63 130	12,98 %	16,41 %
Japonija	48	42 388	10,74 %	11,02 %
Rusija	34	24 654	7,61 %	6,41 %
Kinija	27	23 079	6,04 %	6,00 %
Pietų Korėja	24	21 677	5,37 %	5,64 %
Indija	21	5 308	4,70 %	1,38 %
Kanada	19	13 500	4,25 %	3,51 %
Jungtinė Karalystė	16	9 373	3,58 %	2,44 %
Ukraina	15	13 107	3,36 %	3,41 %
Švedija	10	9 651	2,24 %	2,51 %
Vokietija	9	12 050	2,01 %	3,13 %
Belgija	7	5 921	1,57 %	1,54 %
Ispanija	7	7 121	1,57 %	1,85 %
Čekija	6	3 904	1,34 %	1,02 %
Taivanas	6	5 032	1,34 %	1,31 %
Šveicarija	5	3 333	1,12 %	0,87 %
Vengrija	4	1 889	0,89 %	0,49 %
Slovakija	4	1 814	0,89 %	0,47 %
Suomija	4	2 752	0,89 %	0,72 %
Argentina	3	1 627	0,67 %	0,42 %
Pakistanas	3	690	0,67 %	0,18 %
Brazilija	2	1 884	0,45 %	0,49 %
Bulgarija	2	1 926	0,45 %	0,50 %
Meksika	2	1 330	0,45 %	0,35 %
Pietų Afrikos Respublika	2	1 860	0,45 %	0,48 %
Rumunija	2	1 300	0,45 %	0,34 %
Armėnija	1	375	0,22 %	0,10 %
Iranas	1	915	0,22 %	0,24 %
Olandija	1	482	0,22 %	0,13 %
Slovėnija	1	688	0,22 %	0,18 %
Iš viso pasaulyje	447	384 601	100 %	100 %

Pagal 1.4 lentelėje pateiktus duomenis galima spręsti, kad iškastinis kuras, kuris šiuo metu vis dar užima du trečdalius elektros gamybai naudojamų pajėgumų, patrauklus ir paplitęs dėl to, kad jo gamybos savikaina sąlyginai nėra didelė, tačiau laikui einant iškastinis kuras tampa vis sunkiau prieinamas – jo ieškoti bei išgauti reikia vis gilesnėse kasyklose, transportuoti iš toliau, kas galų gale atsiliepia ir šių išteklių kainai. Taip pat, netylant kalboms apie pasaulinį klimato atšilimą, iškastinio kuro deginimas vis dažniau siejamas su neigiamomis to pasekmėmis (tarša dėl

1.4 lentelė. Elektros energijos gamyboje naudojamo pirminio kuro (energijos šaltinio) pasiskirstymas pasaulyje

Rodiklis	Kiekis, TWh	Dalis bendroje apimtyje, %
Iškastinis kuras	14 498	67,25 %
Hidroelektrinės	3 646	16,91 %
Branduolinė energetika	2 345	10,88 %
Vėjo energija	520	2,41 %
Biomasė ir kt. atsinaujinantys šaltiniai	453	2,10 %
Saulės energija	96	0,44 %
Metinis pasaulio elektros poreikis	21 557	100 %

anglies deginimas vis dažniau siejamas su neigiamomis to pasekmėmis (tarša dėl anglies dvideginio CO₂). Taip pat reikia įvertinti tai, kad atsinaujinantys elektros energijos gamybos būdai (saulės, vėjo, biomasės, vandens) dar nėra pajėgūs tapti pilnaverčiu energijos gamybos įrankiu dėl ekonominių bei technologinių priežasčių, bei į tai, kad šie susiduria su stipriai svyruojančiu gamybos pajėgumu (nesant vėjo ir saulės elektros energijos išgaunama nepalyginamai mažiau). Pasaulinėje elektros energijos rinkoje branduolinė energetika sudaro apie 10,9 % visos energijos gamybos apimties, bet gali užtikrinti stabilų, nenutrūkstamą elektros tiekimą už priimtina kainą, tad įvertinus visas aukščiau paminėtas priežastis ši energijos generavimo rūšis turi dideles perspektyvas ateityje, ypač mažėjant iškastinio kuro resursams.

Apibendrinant, verta pastebėti, kad dėl skirtingos kiekvienos valstybės vidinės politikos, ekonominių, geografinių bei geopolitinių aplinkybių elektros energijos išgavimas yra labai diversifikuotas. Nepaisant to, vienas stabiliausių ir ekonomiškai tinkamiausių elektros energijos gamybos būdų lieka branduolinė energetika. Šiame sektoriuje didžiąją dalį elektros energijos gaminant lengvojo vandens reaktoriams (PWR bei BWR tipo), verta detaliau išnagrinėti jų veikimo principus, skirtumus bei esminio jų elemento – branduolinio reaktoriaus korpuso – vidinių elementų, t.y. kuro rinklių, sandarą, panaudojimą bei aptarti tolimesnę jų vystymo kryptį, siekiant išgauti kuo didesnį reaktoriaus stabilumą, galios tankį bei ilgaamžiškumą.

2. SUSLĖGTOJO VANDENS REAKTORIAI

Suslėgtojo vandens reaktorius (PWR) – lengvojo vandens reaktorių tipas, kuris, kaip rodo pats pavadinimas, naudoja suslėgtą vandenį šilumos nuvedimui iš reaktoriaus aktyviosios zonos. Vanduo reaktoriuje laikomas suslėgtas tam, kad aplink kuro rinkles nesusidarytų jokios reikšmingos verdančio vandens zonos. Garas, kuris būtinas turbinai sukti ir elektrai gaminti yra generuojamas garo generatoriuje, kuris atskiria pirmąjį suslėgto vandens kontūrą su antruoju vandens-garo kontūru. Pagrindiniai suslėgtojo vandens reaktorių gamintojai yra Westinghouse (JAV), Areva (Prancūzija) bei Mitsubshi (Japonija). Amerikiečių kompanija siūlo penkias reaktorių versijas, kurios skiriasi savo galingumu – 600 MWe, 900 MWe, 1000 MWe, 1100 MWe ir 1200 MWe. Šis galios skirtumas gaunamas reaktoriuje naudojant skirtingą aušinimo vandens kilpų (dvi, trys arba keturios kilpos) – kiekviena kilpa susideda iš garo generatoriaus, reaktoriaus aušinimo siurblio ir jungiamojo vamzdyno. Kiekviena kilpa yra prijungta prie reaktoriaus korpuso, kuris yra parenkamas tokio dydžio, kad būtų galima sutalpinti reikiamą kiekį kuro rinklių, išskiriančių šilumą (nuo 121 iki 193 vnt. rinklių korpuso aktyviojoje zonoje).

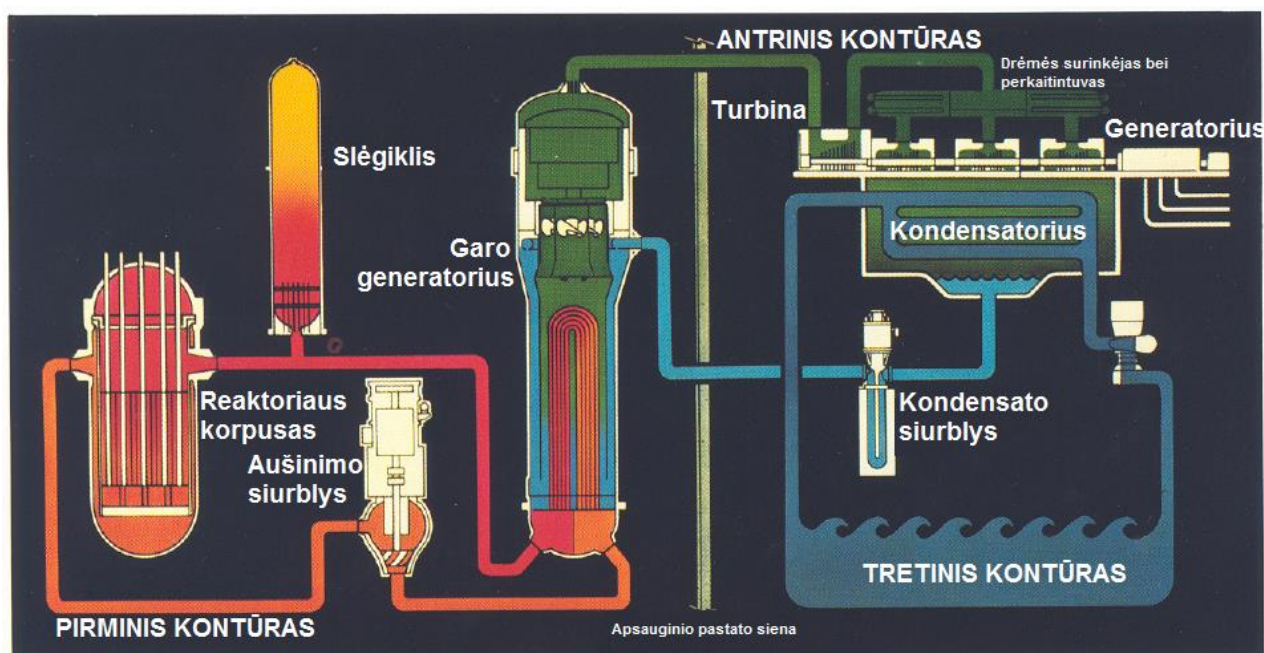
2.1 Suslėgtojo vandens reaktoriaus struktūra bei veikimo principas

Supaprastintą Westingouse 412 suslėgtojo vandens reaktoriaus, gaminančio 1100 MWe, pavaizduota 2.1 paveiksle. Suslėgtojo vandens tipo reaktoriai susideda iš trijų kontūrų :

1. Pirminis - suslėgtojo vandens kontūras, tekantis per aktyviąją zoną bei garo generatoriaus vamzdelius. Šalina šilumą, susidariusią reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstančių urano branduolių skilimo reakcijos metu, bei garo generatoriaus U formos vamzdelių pagalba perduoda savo šilumą antriniam kontūru. Garo generatoriuje atvėšęs vanduo grąžinamas į reaktorių pakartotiniam pašildymui;
2. Antrinis, vandens-garo kontūras, laikomas šiluminės energijos panaudojimo kontūru. Sausas garas šiame kontūre susidaro garo generatoriuje, kur apiplauna U formos vamzdelius, taip perimdamas alį pirmojo kontūro šilumos. Garas, susidaręs garo generatoriuje, tiekiamas į turbiną, kurioje jis plečiasi bei paverčia šiluminę energiją mechanine ir vėliau į elektros energiją. Išsiplėtęs garas tiekiamas į kondensatorių, kuriame jis ataušinamas ir sukondensuojamas. Kondensatas vėl grąžinamas į garo generatorių.
3. Tretinis kontūras, dažniausiai atviro tipo, kondensacijos metu pašalindamas likusią šilumą iš garo, kuris yra po turbinos. Šiluma kondensatoriaus pagalba nuvedama į aušinimo tvenkinį (ežerą, upę ar kitus vandens telkinius) arba į aušinimo bokštą.

Garo generatoriaus naudojimas pirminio ir antrinio korpuso atskyrimui didžiaja dalimi sulaiko radioaktyviuosius elementus pirminiame kontūre. Kadangi dažniausiai pirminis kontūras

suslėgtojo vandens tipo jėgainėse yra įrengiamas apsauginio pastato viduje, radioaktyvumas neplinta už šio pastato ribų normalios eksploatacijos arba avarijos atveju. Tai leidžia išvengti itin bangaus turbinos aptarnavimo, kurio kaštus didintų, jei turbinoje tiekiamas garas būtų radioaktyvus. Tokiu atveju ir pačios turbinos darbiniai elementai tampa radioaktyvūs.



2.1 pav. Suslėgtojo vandens reaktoriaus principinė vieno kontūro schema

Suslėgtojo vandens reaktorių gamintojai savo jėgaines yra linkę atskirti į dvi dalis – branduolinis baras bei turbinos baras. Kiekvienas šių barų susideda iš skysčio (šilumnešio), elektros ir automatikos įrenginių, valdymo sistemos bei viso reikalingo mechanizmų sąrašo. Kiekvienas baras yra atskirame pastate, tačiau jie sujungiami vamzdynais, telekomunikaciniais ryšiais ir kitomis priemonėmis.

Branduolinis baras – esminė branduolinės energetinės jėgainės dalis, todėl bus nagrinėjama plačiau. Branduolinis baras įrengiamas apsauginio pastato viduje, kuriame telpa visas pirminis kontūras (arba keli tokie kontūrai), didžioji dalis elektros, automatikos ir valdymo sistemos elementų, taip pat visi papildomi ir saugiam eksploatavimui reikalingos pagalbinių skysčių sistemos, reikiamos kuro perkrovimo įrangos, atliekų apdorojimo, saugojimo bei ventiliacijos sistemos.

Branduolinio baro esminis elementas – reaktoriaus korpusas su aktyviaja zona bei aušinimo sistema (pirminis kontūras). Reaktoriaus korpusas pagamintas iš storasienio plieno liejinio, taip išvengiant galimų suvirinimo siūlių įtrūkimų. Korpuse įrengtos kuro rinklių laikymo, valdymo strypų valdymo bei kitos reikiamos atraminės bei kreipiančiosios konstrukcijos. Cilindrinis korpusas viršuje turi flanšinį nuimamą korpuso dangtį, kad būtų galima atlikti aptarnavimo darbus,

perkrauti kurą ir kitiems darbams. Vandens įtekėjimo ir ištekėjimo atvamzdžiai įrengiami gerokai aukščiau nei baigiasi kuro elementai, taip užtikrinant nuolatinį jų aušinimą.

Westinghouse gaminami suslėgtojo vandens tipo reaktoriai naudoja vertikalius vienos pakopos vandens siurblius. Šie siurbliai specialiai pagaminti su sunkiais darbo ratais bei smagračiais, kurie išlaiko siurblio sukimąsi ir aušinančio vandens tekėjimą siurblio varikliui staiga sustojus. Įvairių apsauginių sistemų pagalba užtikrinamas aušinimo agento tekėjimas per aktyviąją zoną visu metu, kuomet reaktorius dirba. Siurbliai prijungti prie avarinių elektros energijos šaltinių tuo atveju, jei dingsta įtampa iš pirminio šaltinio. Siurblių galia svyruoja tarp 4 474 kW ÷ 7 457 kW. Siurbliai reikalingi tik reaktoriui esant kritinėje būsenoje, t.y. naudojant branduolines skilimo reakcijas gaminti šilumą. Jei reaktorius sustabdytas (aktyviojoje zonoje išsiskiria tik likutinė šiluma), šilumos nuvedimas gali būti užtikrintas natūralia cirkuliacija (konvekcija).

Garų generatoriai, kaip taisyklė, įrengiami U formos vamzdelių, vertikalūs. Viršutinė dalis dažniausiai būna platesnė tam, kad susidaręs garas, einantis per drėgmės separatorius turėtų paankamai paviršiaus ploto ir galėtų šį procesą atlikti nepriekaištingai. Garo kokybė labai aktualu, kadangi gare esant lašeliams turbinos mentelės labai greitai suirtų ir turbina nebegalėtų būti eksploatuojama. Pašildytas vanduo įteka garo generatoriaus viršuje, susimaišo su nuo drėgmės separatorių nuvestu vandeniu ir teka palei sienelę iki apačios, kur keičia savo tekėjimo kryptį ir pradeda kilti aukštyn, taip apiplaudamas U formos vamzdelius. Vamzdynas, kuris tiesiogiai kontaktuoja su radioaktyviu šilumnešiu, bei kitos vidinės reaktoriaus dalys, išskyrus garo generatoriaus vamzdelius bei kuro rinkles, yra pagaminti iš nerūdijančio plieno. Kuro rinklės įprastai gaminamos iš Zircaloy lydinio, garo generatoriaus vamzdeliai – iš Inconel.

Slėgikliai, įrengti pirmojo kontūro karštojoje dalyje, skirti užtikrinti aušinimo sistemos darbinį slėgį normalios eksploatacijos metu, taip pat riboja slėgio pokyčius pereinamuoju laikotarpiu, kuomet reaktorius yra palengva įvedamas į darbinį režimą. Jis taip pat apsaugo sistemą nuo viršslėgio ar jo trūkumo nerėžiminėse situacijose. Slėgis slėgikliuose yra palaikomas elektrinių šildytuvų ir purkštukų dėka. Jei slėgis sistemoje krenta, dalis slėgiklyje esančio vandens išgaruoja taip padidindamas sistemos slėgį. Jei reikalinga slėgį sistemoje sumažinti, į slėgiklį purškiamas vėsesnis vanduo, kuris sukondensuoja slėgiklyje esantį kartą taip sumažindamas slėgį.

Reaktoriaus aušinimo siurbliai skirti užtikrinti vandens cirkuliaciją per reaktoriaus aktyviąją zoną, garo generatorių ir visą pirminį kontūrą.

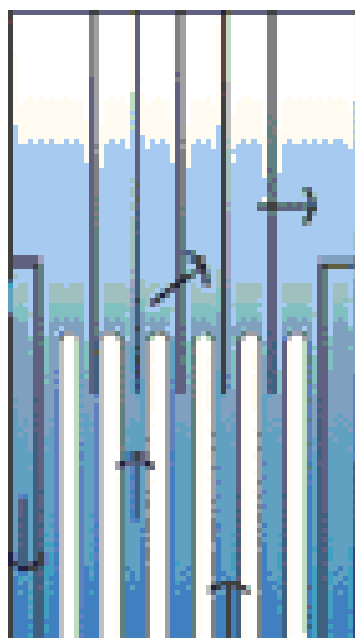
2.2 Suslėgtojo vandens reaktoriaus aktyvioji zona

Branduolinis reaktorius skirtas gaminti šiluminę energiją bei energijos transformavimo metodais paversti ją elektros energija. Šiluma generuojama reaktoriaus aktyviojoje zonoje, kurioje sudėtos Zircaloy lydinio korpusuose patalpinti kuro elementai, pagaminti iš urano oksido UO₂.

Aktyviojoje zonoje taip pat yra reaktyvumo reguliavimo dalys, kartu su galios bei slėgio matavimo įranga. Aktyvioji zona yra reaktoriaus korpuso apatinėje dalyje, kur užtikrinamas nuolatinis jos užpildymas vandeniu. JAV kompanijos Westinghouse deklaruojami reaktoriaus aktyviosios zonos bei visos sistemos parametrai pateikiami 2.1 lentelėje .

2.1 lentelė. Westinghouse reaktorių aktyviosios zonos parametrai

Parametras	Reikšmė		
	Dviejų kilpų jėgainė	Trijų kilpų jėgainė	Keturių kilpų jėgainė
Šiluminė galia, MWš	1882	2785	3411
Vidutinė gaminama elektros galia, MW	600	900	1150
Šiluma, išskiriama kuro rinklėse, %	97,4	97,4	97,4
Darbinis sistemos slėgis, bar	155	155	155
Vandens temperatūra į reaktorių, °C	287,7	291,7	292,7
Vandens temperatūros pokytis per reaktorių, °C	36,8	34,9	33,4
Vandens temperatūra ištekančią iš reaktoriaus, °C	324,5	326,6	326,1
Branduolinio reaktoriaus aktyviosios zonos diametras, m	2,56	3,04	3,38
Aktyviosios zonos aukštis (kuro aukštis), m	3,66	3,66	3,66
Kuro rinklės elementų skaičius	16 × 16	17 × 17	17 × 17
Aktyviojoje zonoje esantis kuro kiekis, t	49,702	66,411	81,639
Kuro rinklių skaičius reaktoriuje	121	157	193



2.2 pav. Suslėgto vandens reaktoriaus aktyviają zoną aušinančio vandens tekėjimo kryptis

Suslėgto vandens tipo reaktoriuose naudojami valdymo strypai pakabinami virš reaktoriaus aktyviosios zonos, ir yra laikomos elektromagnetų pagalba. Pozicionavimo mechanizmo dėka šie strypai reikalui esant įleidžiami į aktyviają zoną, kur sugeria neutronus bei lėtina branduolinę reakciją. Korpuso viduje esančią aktyviają zoną aušinantis vanduo į reaktorių tiekiamas per padavimo ir išleidimo atvamzdžius. Jų skaičius priklauso nuo to, kiek aušinimo kilpų yra įrengta. Į aktyviają zoną įtekėjęs aušinimo skystis palei sienelės leidžiasi žemyn, ir vėliau kylą į viršų, taip apiplaudamas kuro strypus kuriuose vyksta branduolinės reakcijos. Suslėgto vandens reaktoriaus bendrą pjūvį bei tekėjimo kryptį galima pamatyti 2.2 paveiksle. Reaktoriaus aktyvioji zona, horizontaliaame pjūvyje, sudaryta iš skirtingų sričių. Reaktoriaus eksploatavimo pradžioje didžiausią urano

įsodrinimo laipsnį turinčios kuro rinklės yra išdėstomos reaktoriaus išorinėje zonoje. Rinklės, turinčios mažiau sodrinto urano sumaišomos centrinėje zonoje, išdėstant jas taip, kad būtų pasiekiamas kuo tolygesnis galios išsiskyrimas reaktoriaus darbo metu.

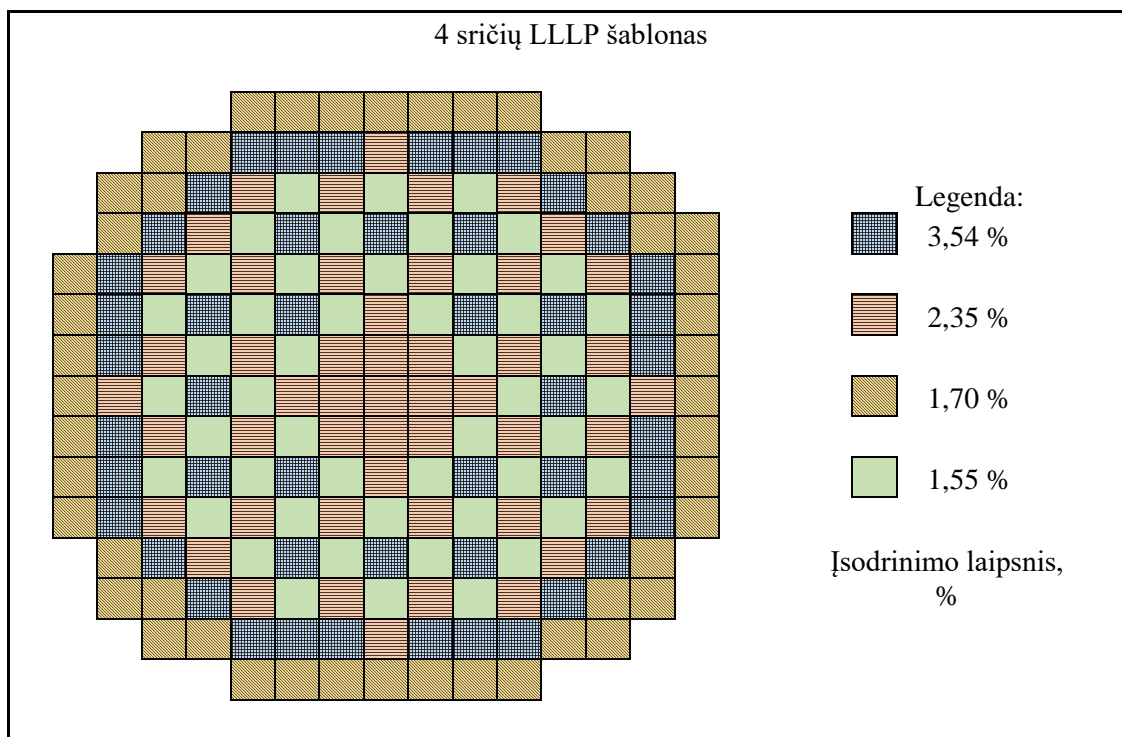
2.3 Suslėgtojo vandens reaktoriaus kuro rinklės struktūra

Atėjus laikui pirmą kartą įkrauti arba pakeisti reaktoriaus kuro įkrovą, reikalinga išardyti virš reaktoriaus korpuso esančius valdymo strypus bei nukelti apsauginį dangtį. Aktyviojoje zonoje kuras išdėstomas taip, kad būtų išpildyti labai svarbūs parametrai:

1. kuo tolygesnis galios išsiskyrimas vertikalia ašimi;
2. kuo tolygesnis galios išsiskyrimas horizontalia ašimi;
3. kuo didesnis kuro išdegimas, prieš nurašant kuro rinklę ir ją atiduodant į atliekų saugojimo stotis;
4. kuo didesnis reaktoriaus galios tankis;
5. kuo mažesnis reikalingas kuro įsodrinimas;
6. kuo mažesnis neutronų nutekėjimas iš aktyviosios zonos.

Naujiems suslėgtojo vandens reaktoriams pirmą kartą į aktyviają zoną sukraunamas kuras turi du pagrindinius šablonus:

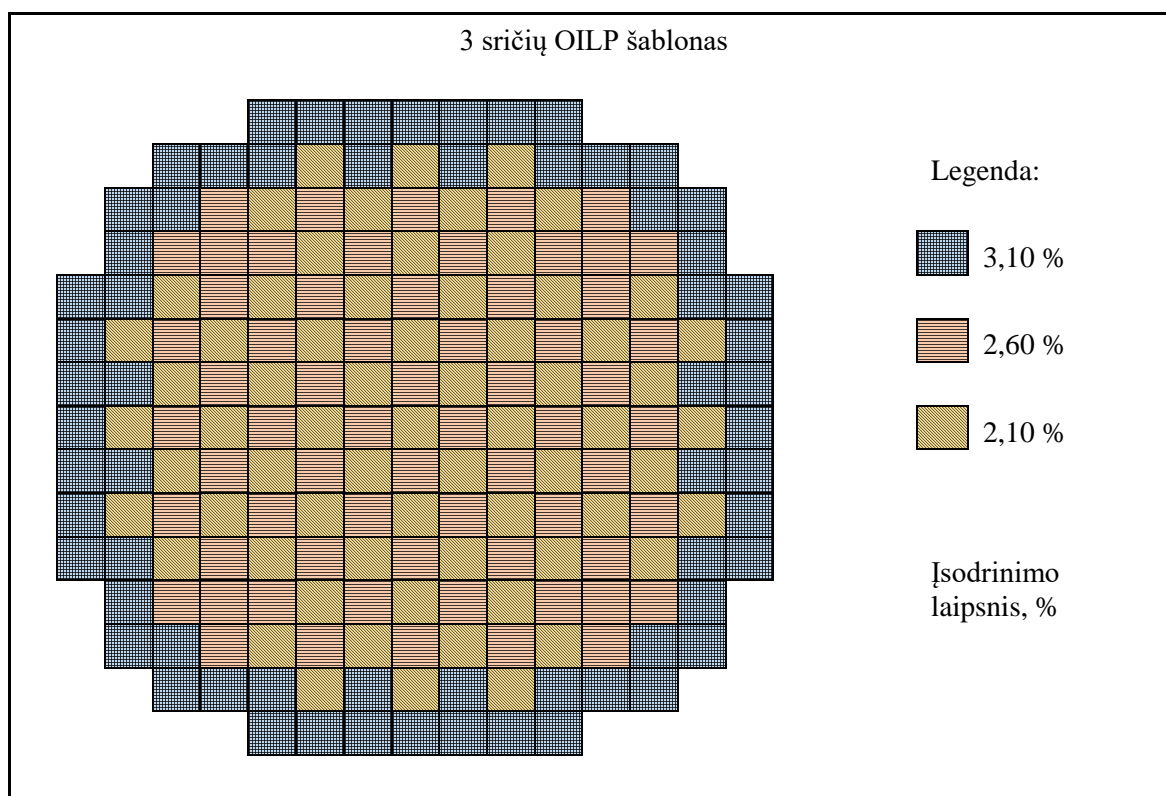
- a) žemo neutronų nuotėkio įkrovos šablonas (angl. low leakage loading pattern, LLLP, 2.3 paveikslas);
- b) išorė – vidus įkrovos šablonas (out-in loading pattern, OILP, 2.4 paveikslas).



2.3 pav. Keturių sričių LLLP kuro įkrovos šablonas

Kiekvienas iš 2.3 paveiksle pavaizduotų langelių – tai kuro rinklė. Kuro rinklė – tai keičiamas, aušinamas, paruoštas transportavimui kuro strypų rinkinys. Suslėgtojo vandens tipo reaktoriuose sutinkamos kuro rinklės su 16×16 arba 17×17 kanalų. Absoliuti dauguma kanalų naudojama kuro strypams, tačiau dalis taip pat naudojama ir matavimo įrangai bei valdymo strypams.

Kiekvieną kuro strypą sudaro urano dioksido tabletės, sudėtos į iš Zircaloy-4 lydinio pagamintus vamzdelius. Abu vamzdelio galai yra užvirinami bei užsandarinami tam, kad suformuotų sandarų kuro strypą. Kuro tabletes sudarantis urano dioksidas gaunamas įsodrinimo įmonėse, kurios užtikrina reikiamą UO_2 sudėties santykį. Tabletės gaunamos iš urano dioksido miltelių, juos presuojant bei šlakuojant, taip išgaunant tinkamą tankį. Tokios būsenos kuras yra inertiškas reaktoriaus temperatūrai ir slėgiui. Net ir pažeidus apsauginį kuro strypo apvaskalą, kuro tabletės nesuyra, nepaskleidžia radioaktyvių medžiagų į vandenį. Tablečių galai būna šiek tiek įdubę, kad jos darbo metu galėtų plėstis išilgai strypo ašies.



2.4 pav. Trijų sričių OILP kuro įkrovos šablonas

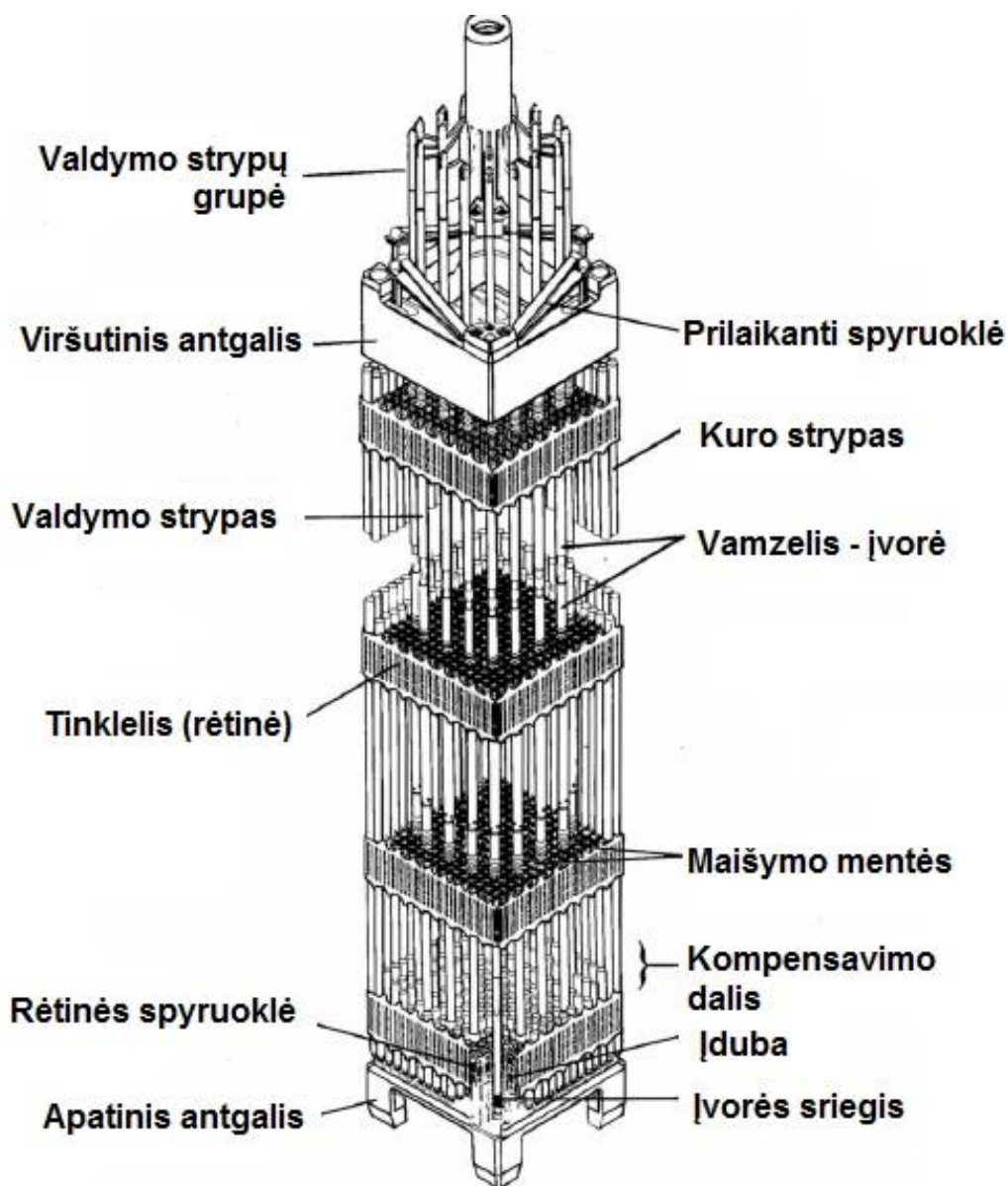
Kuro rinklės sandarą sudaro minėti kuro strypai, specialūs kanalai valdymo strypams su kreipiančiosiomis įvorėmis, kurios įtvirtinamos viršutiniame bei apatiniame kuro rinklių antgaliuose.

Apatinis antgalis ne tik atlieka atraminio struktūrinio elemento vaidmenį, bet taip pat ir paskirsto iš apačios tekančio šilumnešio srautą. Viršutinis antgalis, išlaikydamas kuro rinklės

standumą, sukuria laisvą erdvę pro rinklę praėjusiam vandeniui maišytis bei sudaryti tolygų tekėjimą į viršų link reaktoriaus korpuse esančio karšto vandens išleidimo atvamzdžio.

Kiekvieną kuro ar valdymo strypą įtvirtina kuro rinklėje esantys spyruokliniai gnybtai. Jie išdėstomi visu rinklės ilgiu specialiais intervalais išilginėje ašyje. Skersinėje ašyje spyruokliniai gnybtai sudaro metalinį tinklėlį (tarpinę rėtinę), pro kurio kiekvieną iš akučių persiveria kuro strypas, kad užtikrintų patikimą strypų įtvirtinimą bei apsaugą nuo galimų smūgių transportavimo, įkrovimo/iškrovimo ar saugojimo metu. Kiekvieną kuro strypą tarpinėje rėtinėje laiko keturios standžios bei dvi spyruoklinės atramos – spyruokliniai gnybtai. Šis atraminis karkasas kuro rinklėje užtikrina tolygų atstumo išlaikymą tarp kuro strypų bei sumažina šonines kuro strypų vibracijas. Dėl to, kad kuro strypai išilginėje ašyje nėra standžiai įtvirtinami, jiems suteikiama laisvė nevaržomiems plėstis dėl eksploatacijos metu atsiradusių šiluminio bei radiacinio plėtimosi įrašų.

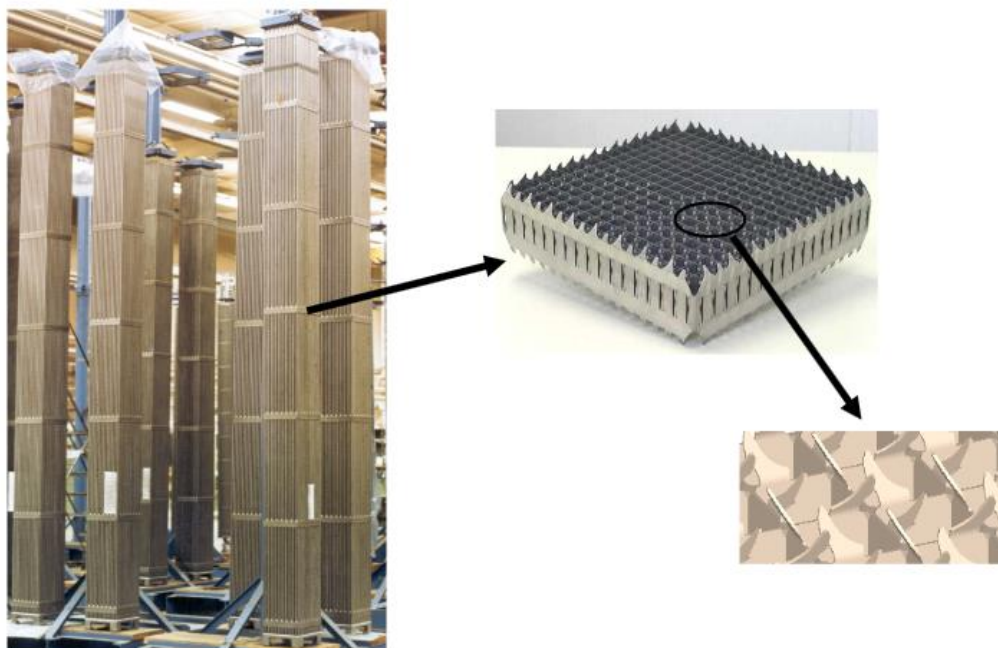
3. SUSLĖGTOJO VANDENS REAKTORIAUS KURO RINKLĖS SKAITINIO TYRIMO KRYPTIS



3.1 pav. Standartinė suslėgtojo vandens reaktoriaus kuro rinklė

Rinklėse naudojami du rėtinių tipai – vienas tipas turi maišymo mentes, kurios naudojamos padidinti reaktoriuose esančių kuro strypus apiplaunančio vandens šilumos nuvedimo savybes. Jos veikia srauto nukreipimo būdu nuo kuro strypo sienelės, kur temperatūra yra didžiausia, į erdvę tarp keturių kuro strypų, kur vanduo yra šiek tiek vėsesnis bei galintis su savimi paimti daugiau šilumos. Maišymo mentės – labai svarbus kuro rinklės elementas, leidžiantis inžinieriams, projektuojantiems suslėgtojo vandens reaktorių, padidinti energijos išsiskyrimą iš vieno kuro strypo, t.y. padidinti energijos tankį bei sumažinti reaktoriaus išorinius gabaritus bei pagalbines įrangas.

Maišymosi mentės pavaizduotos 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Maišymosi menčių rėtinė suslėgtojo vandens reaktoriaus kuro rinklėje

Nepriklausomai nuo gamintojo, suslėgtojo lengvojo vandens reaktorių kuro rinklės labai panašios. Tam tikri neesminiai skirtumai tarp gamintojų yra kuro strypų surinkimo būdas, slėgio viduje strypo palaikymas ir kt. Kiekvienas gamintojas siekia savo gaminamą produktą supaprastinti, sumažinti, atpiginti ir kitaip išsitemkti ekonomikos valdomoje branduolinių reaktorių rinkoje. Tiek jėgainių gamintojų, tiek nepriklausomų mokslininkų pasaulyje atlikti tyrimai parodė, kad kuro rinklėje įvedant maišymosi menčių tobulinimo procesą, galima gauti teigiamų rezultatų srauto tekėjimo optimizavime.

Modifikuojant kuro rinklę svarbu atsižvelgti į tai, kad neutronų kinetikos ir reaktoriaus dinamikos skaičiavimai atliekami ganėtinai tiksliai ir jau galioja kelis dešimtmečius, tačiau dabar, su šiuolaikinėmis technologijomis galima tiksliai atlikti modeliavimo užduotis bei įvertinti ir termohidraulinius reaktoriaus parametrus – srauto tekėjimo ypatumus, greičių pasiskirstymą aktyviojoje zonoje, temperatūros gradientų bei kitų svarbių bei potencialiai neišnaudotų tobulinimo sričių. Kaip minėta anksčiau, viena iš šių sričių – maišymosi mentės kuro rinklės rėtinėse.

Lengvojo vandens reaktoriuose (tiek PWR tiek BWR tipo) vienas svarbiausių kuro rinklės struktūros komponentų yra rėtinė, kuri laiko šiluminius elementus vertikalčiai ir iš šonų. Pagrindinės rėtinės funkcijos yra:

- suteikti horizontalią atramą šiluminiams elementams;

- išlaikyti tarp kuro strypų reikiamus atstumus (tarpus) per atsitiktines ir nustatytas apkrovimo bei eksploatacijos sąlygas;
- skatinti aušinimą bei šilumos atidavimą nuo šiluminio elemento paviršiaus šilumnešiui;
- tiesiai išlaikyti kreipiamuosius vamzdelius taip, kad nebūtų sutrikdytas valdymo strypų įvedimas nei esant įprastinėms sąlygoms, nei avarijos atveju.

Rėtinė taip pat turi didelę įtaką termohidrauliniams procesams suslėgto vandens reaktoriaus aktyviojoje zonoje. Nuo jos išvaizdos/formos labai priklauso du priešingi aktyviojoje zonoje ir kuro rinklės įtakojami vykstantys procesai: slėgio perkrytis tarp vandens įtekėjimo ir ištekėjimo į/iš kuro rinklės atvamzdžių (t.y. slėgio kritimas aktyviojoje zonoje) ir vietinis šilumos nuvedimas nuo šiluminio elemento. Šiuos procesus lemia rėtinės maišymosi mentelės: jų matmenys, forma, orientacija su fluido tekėjimo kryptimi (pasvirimo kampas), skaičius/kiekis ir kt.

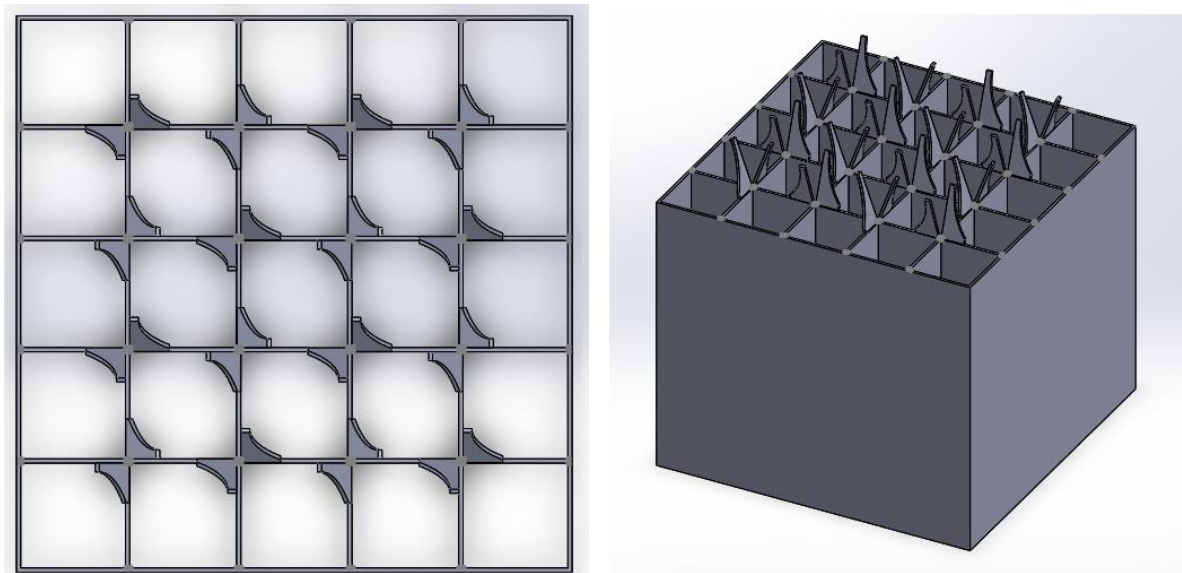
Maišymosi mentelių paskirtis – sukurti išilgai šiluminį elementą aptekančiam suslėgto vandens srautui kliūtis ir tokiu būdu dar labiau turbulizuoti šio fluido tekėjimą kuro elemente. Sutikta kliūtis įtakoja sūkurių susidarymą, bei intensyvesnį fluido srovelių (sluoksnelių) tarpusavio maišymąsi ir tokiu būdu suintensyvina šilumos nuvedimą nuo aptekamo paviršiaus. Priklausomai nuo mentelių išdėstymo, jos gali sukurti kryžminį arba sūkurinį fluido srautą tarp pratekamųjų kanalų arba pačiuose juose. Taip pat šios kliūtys susiaurina fluido tekėjimo skerspjūvį ir tokiu būdu išauga jo greitis, o tai įtakoja didesnius slėgio nuostolius.

Tarp minėtų procesų kuro rinklėje galioja ryšys: kuo intensyvesnis vietinis šilumos nuvedimas nuo šiluminio elemento, tuo didesni slėgio nuostoliai rinklėje. Dėl šios priežasties rėtinės maišymosi mentelių kiekis, forma, pasvirimo kampas ir kt. parametrai turi būti kruopščiai parinkti, jog užtikrintų kuo optimalesnį šilumos nuvedimą su kuo mažesniais slėgio nuostoliais.

Kadangi dauguma reaktorių pasaulyje dirba jau daugiau nei 25 metus ir per tą laiką nuolat atidžiai stebimi bei tobulinami šiuo metu yra sukauptos didelis žinių kiekis apie reaktorių veiklos ypatumus bei nuokrypius nuo teorinių bei praktikoje pasitaikiusių režimų. Kuro rinklių struktūra taip pat tobulėjo, ir šiai dienai kuro rinklių rėtinės yra užsitikrinusios savo technologinį pranašumą lyginant su praeityje naudotomis. Atliktų bandymų metu bei sukauptų žinių pagalba nustatyta, kad optimaliausia vienam kuro elementui įrengti dvi priešinguose rėtinės akutės kampuose esančias maišymosi mentes, kaip ir pavaizduota 3.3 paveiksle. Šio darbo tikslas atlikti kuro rinklės maišymosi menčių posvyrio kampo į srauto optimizavimo bandymą modeliuojant sistemą ANSYS CFX 15.0 aplinkoje. Rezultatų palyginimui atliekamas ir kontrolinis bandymas nenaudojant jokio kuro maišymosi menčių posvyrio srauto kryptčiai, t.y. kai mentės neatlieka jokios funkcijos.

Optimizuojant maišymosi mentės posvyrio kampą atsižvelgiama į du pagrindinius parametrus kuro rinklės darbo metu – šilumos atidavimo koeficientą nuo šildomojo paviršiaus šilumnešiu (vandeniui) išreikštą Nuselto (Nu) panašumo kriterijumi bei slėgio perkrytį per sukurtą vietinę kliūtį.

Žemiau pateikiamas kuro rinklės maišymosi menčių pavyzdys:



3.3 pav. Kuro rinklės maišymosi mentelės išdėliotos rėtinės viršuje

4. MODIFIKUOTOS KURO RINKLĖS SKAITINĖS ANALIZĖS PAGRINDAS

Pasirinktas variantas – modifikuoti kuro rinklę pritaikant skirtingas maišymosi menčių formas, siekiant išsiaiškinti kuri iš pasiūlytų modifikacijų geriausiai atitiks optimizuoto šilumos nuvedimo iš reaktoriaus uždavinį. Tikrinami parametrai – srauto greitis tarp kuro strypų, kuro strypo išorinės sienelės temperatūros pokytis, slėgio pasipriešinimas tekant srautui.

Skaičiavimams galima naudoti vieną iš keleto dabar itin populiarių skaičiavimo sistemų – ANSYS CFX, CD-Adapco Star-CD, Aerosoft GASP ir kitais, besiremiančiais CFD (*angl.* computational fluid dynamics, *liet.* skaičiuojamosios fluidų dinamikos, toliau šiame darbe žymima SFD) pagrindais.

SFD trumpai galima apibrėžti kaip siekį pakeisti tolydžią skaičiavimų sistemą diskrečiomis sistemomis naudojant skaičiavimų tinklą. Tolydžioje sistemoje kintamasis apibrėžiamas kiekviename taške, kurių yra be galo daug. Pavyzdžiui slėgio p priklausomybė tolydžioje vieno matmens sistemoje gali būti apibrėžiama:

$$p=p(x), \text{ kai } 0 < x < 1 \quad (4.1)$$

Diskrečioje sistemoje, kiekvienas srauto kintamasis yra apibrėžiamas tik tinklelio taškuose. Taigi, diskrečioje sistemoje slėgis p būtų apibrėžiamas:

$$p_i=p(x_i), \text{ kai } i=1, 2, \dots, N \quad (4.2)$$

Taigi, SFD skaičiavimai remiasi reikalingų apskaičiuoti kintamųjų reikšmių radimu tik tinklelio taškuose. Parametrai kitose sistemos vietose randami interpoliuojant rezultatus tarp dviejų gretimų tinklelio taškų.

4.1 Sistemų diskretizavimas

Paprasčiausia ir lengviausia nagrinėti vieno matmens sistemą ir jos pritaikymą SFD skaičiavimams.

$$\frac{du}{dx} + u^m = 0, \quad 0 \leq x \leq 1; \quad u(0) = 1 \quad (4.3)$$

Lygtis (3) laikoma tiesine, kuomet indeksas m yra lygus 1. Jei $m = 2$, lygtis būtų laikoma netiesine ir jai būtų reikalingi specifiniai SFD nelinejinių lygčių apdorojimo metodai.

Tarkime turime vienmatę sistemą, kurioje kintamasis x kinta nuo 0 iki 1 žingsniu $\Delta x=1/3$. (t.y. sistemoje bus 4 taškai - 0; $\frac{1}{3}$; $\frac{2}{3}$; 1).

Kadangi aprašančioji lygtis (4.3) nusako kintamojo u apskaičiavimą bet kuriame tinklelio taške, galima perrašyti:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i + u_i = 0 \quad (4.4)$$

Čia indeksas i nurodo kuriame taške tinklelyje skaičiuojamas parametras. Siekiant išreikšti $(du/dx)_i$; kintamojo u atžvilgiu, lygtis (4.4) išskleidžiama Teiloro eilute:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i = \frac{u_i}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (4.5)$$

Klaida $(du/dx)_i$ išraiškoje dėl nepaisomų Teiloro eilutės sąlygų vadinama sutrumpinimo klaida.

Nepaisydami aukštesnių Teiloro eilutės išskleidimo narių, bei naudodami (4.4) ir (4.5) lygtis, gauname:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + u_i = 0 \quad (4.6)$$

Verta pastebėti, kad iš diferencialinės gavome algebrinę lygtį. Toks diskretinės sistemos išvedimas naudojant Teiloro eilutę yra vadinamas baigtinių skirtumų metodu. Dauguma komercinių SFD programų naudoja baigtinių tūrių arba baigtinių elementų metodą priklausomai nuo to kokias sistemas programa pritaikyta skaičiuoti. CFX programa skaičiuoja baigtinių tūrių metodu, o Ansys – baigtinių elementų. Ir nepaisant to, kad metodai skirtingi, nagrinėjant SFD veikimo principą esminių skirtumų nėra.

Sistemose, kurios naudoja dviejų matmenų sistemą, tinklelis susideda dažniausiai iš trikampių ar keturkampių, o 3D sistemose tinklelio formos gali būti ketursienės, šešiasienės arba prizmės formos. Vieno tinklelio (kokios formos jis bebūtų) nario užimamas plotas vadinamas *cele*, o celių susikirtimo taškai – *mazgu*.

Baigtinių tūrių metodas remiasi integralių tvermės lygčių pritaikymu celės aprašomam tūriui, siekiant gauti diskretines celės lygtis. SFD principas šiuo atveju remiasi srautų masės tvermės lygtimi, kuri prilyginama nuliui. Tai užtikrina, kad visi įtekantys gryniesi srautai yra lygūs nuliui, t.y. celės masė yra tvari. Dažnai kiekvienos celės informacija laikoma ir skaičiuojama jos centre, o celės šoniniai apibrėžiantieji paviršiai ir kintamieji juose randami interpoliuojant duomenis iš dviejų gretimų celių centrų. Panašiu principu galima skaičiuoti ir energijos ar judesio kiekio tvermės dėsniais.

Pertvarkius (4.6) lygtį, gauname:

$$-u_{i-1} + (1 + \Delta x)u_i = 0 \quad (4.7)$$

Pritaikius šią lygybę anksčiau nagrinėtai vienmatei sistemai, gaunamos lygtys skirtingiems tinklelio taškams:

$$-u_1 + (1 + \Delta x)u_2 = 0 \quad (4.8)$$

$$-u_2 + (1 + \Delta x)u_3 = 0 \quad (4.9)$$

$$-u_3 + (1 + \Delta x)u_4 = 0 \quad (4.10)$$

Kairiajai sistemos ribai diskrečioji lygtis negali būti taikoma, kadangi narys u_{i-1} nėra apibrėžtas. Tokiu atveju priimama, kad $u_l = l$.

Lygybės 4.8-4.10 bei aukščiau priimta u_l reikšmė sudaro nuoseklią algebrinę sistemą, kurią patogiausia užrašyti matricos pavidalu:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 + \Delta x & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 + \Delta x & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 + \Delta x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Praktiniu SFD pritaikymo atveju diskrečioje sistemoje skaitinis modelis gali turėti tūkstančius nežinomųjų, ir kadangi skaičiuojant reikalinga sudauginti matricas, sprendimas ir skaičiavimai gali labai ilgai užtrukti, nepriklausomai nuo skaičiavimo sistemos pajėgumo. Gana nemaža dalis pastangų įnešama į matricų daugybos optimizavimą, siekiant sumažinti procesoriaus apkrovą bei reikalingos atminties kiekį. Matricos, kurias dauginame, didžioji dalis sudaryta iš nulinių reikšmių dėl to, kad SFD naudoja duomenis iš gretimų celių arba mazgų. Siekiant išvengti nereikalingo kompiuterio apkrovimo, SFD skaičiavimuose saugo tik ne nulines reikšmes duomenis, taip sumažinant operatyvinės atminties poreikį. Siekiant sudauginti matricas naudojama ir iteracinis daugybos metodas, ir kuo daugiau atliekama iteracijų, tuo tikslesnis sprendinys gaunamas.

Dėl Teiloro eilutės išskleidimo gaunama sutrumpinimo klaida nurodo, kokia paklaida bus gaunamas SFD užduotas ir apskaičiuotas sprendinys. Siekiant sumažinti sutrumpinimo klaidą naudojamas tinklelio taškų kiekio didinimas. Tai leidžia SFD kodu apskaičiuotoms reikšmėms priartėti prie realių reikšmių. Kuomet priartėjama pakankamu atstumu ir paklaida tenkina vartotoją, tuomet laikoma kad sprendinys rastas ir jis vadinamas konverguotu sprendiniu. Labai svarbu kiekviename SFD uždavinyje įsitikinti ir žinoti, kad tinklelio dydis ir detalumas atitinka būtinas sąlygas ir poreikį.

Sprendžiant nelineines lygybes ((4.3) lygybės paaiškinimas) taikomas iteracinis spėjimo principas. Vietoje kvadratu ar aukštesniu laipsniu pakelto kintamojo naudojama linijinė, pirmojo laipsnio reikšmė, kuri vėliau iteruojama siekiant pasiekti tikrąją antrojo laipsnio kintamojo reikšmę. Tai dar viena iš teigiamų iteravimo savybių sprendžiant SFD uždavinius.

4.2 Turbulentinio srauto modeliavimas

Srautų dinamikoje sutinkami dviejų tipų srautai – laminarinis ir turbulentinis. Laminarinis tekėjimas nusako tik skirtingo greičio sluoksnių tekėjimą vienas kito paviršiumi tiesine srauto kryptimi nesukuriant kitos krypties srovių. Šis tekėjimo režimas nusistovi tuo atveju, jei skysčio

klampumas yra pakankamas išlaikyti sluoksnius ir neleisti skersiniams srautams išplisti. Palyginimui turbulentinis srautas nusakomas didelės amplitudės nedėsnųjų greičio ir slėgio pokyčių laike ir erdvėje. Šie pokyčiai atsiranda kuomet trintis tarp skirtingo greičio sluoksnių suyra ir skyla į smulkias sroves, kurios savo ruožtu dėl padidėjusių vidinių greičių ir trinties mažina srauto energiją, greitį bei slėgį.

Lygybės, aprašančios abiejų tekėjimo režimų būsenas yra visiškai vienodos, tačiau akivaizdu, kad sprendimas skiriasi. Tekėjimo lygybių sprendimo būdai supaprastintai gali būti išskaidyti į tris klases.

Pirmasis skaičiavimų būdas - tiesioginė skaitinė simuliacija DNS (*angl.* direct numerical simulation) stengiasi maksimaliai išnaudoti šiandieninių kompiuterių skaičiuojamąją galią ir tiesiogiai integruoja Navje-Stokso lygtis. Taip išsprendžiamos laikinos tūrinės fluktuacijos ir išvengiama modeliavimo būtinybės. DNS sprendimo būdas yra panašus kaip laminarinio tekėjimo atveju, tačiau dėl to, jog papildomai reikia įvertinti tūrinės ir slėgines fluktuacijas šis kodas nėra plačiai naudojamas, kadangi reikalauja labai daug kompiuterio skaičiuojamosios galios ir ypač atminties. Didžiausia iki šiol DNS studija buvo atlikta 2003 m. 4096³ tinklelio vienetų sistemoje. Vienas kintamasis skaičiavimuose užėmė 500 GB vietos.

Antrasis būdas - daugumoje SFD programinių paketų aptinkamas Reinoldso vidutinės Navje-Stokso lygtis (RANS, *angl.* Reynolds averaged Navier Stokes). RANS metodas aprašo vidutinės greičio ir slėgio reikšmes. Šis metodas reikalauja modeliavimo tam, kad būtų galima *uždaryti* lygtis ir sukurti modeliai į skaičiavimų rezultatus įneša tam tikrą paklaidą. RANS klasės skaičiavimų rūšis k - ε , skirta įvertinti sūkurinę trintį ir jos nuostolius per du papildomus parametrus, lyginant su laminarinio tekėjimo lygtimis:

$$k \equiv \frac{1}{2} \left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right) \quad (4.12)$$

$$\varepsilon \equiv \nu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4.13)$$

čia k – turbulentinė kinetinė energija, ε – sūkurių išsisklaidymo sparta.

Šio tipo skaičiavimo būdai būdinga paklaida, kuomet skaičiuojant sraute susidaro neigiami slėgio gradientai.

Trečias būdas – Reinoldso įtempimų perkėlimo metodas (RST, *angl.* Reynolds stress transfer). Tai aukštesnės tikslumo klasės sprendimo būdas, nenaudojantis sūkurinės trinties modelį, kur Reinoldso įtempimai apskaičiuojami tiesiogiai.

Modifikuojant kuro rinklę bei atliekant šilumnešio tekėjimo tarp kuro strypų tyrimą reikia pasirinkti kraštines sąlygas, apibrėžti tekėjimo režimą, parinkti tinkamą SFD modeliavimo būdą

bei kitus parametrus. Tinkamas modeliavimo tikslumas pasiekiamas tik tiksliai atlikus visas šias užduotis.

Šiame darbe simuliacijai bus naudojamas sūkurių klampumo k - ϵ modelis, kuris kaip aprašyta susieja turbulentinę kinetinę srauto energiją (k) bei sūkurių išsisklaidymo spartą (ϵ). [9] Nustatyta, kad šis modelis demonstruoja tinkamą atitiktį su atliktais praktiniais bandymais šio skaitinio modeliavimo parametrų ribose, taip pat modelis pasižymi geromis konvergavimo savybėmis. Atsižvelgiant į tai, kas paminėta, bei į turimą skaičiuojamąją techniką, neleidžiančią išnaudoti DNS sprendimo modelio galimybių, modelis k - ϵ skaitiniam modeliavimui pats tinkamiausias.

4.3 Modifikuotos kuro rinklės modelis

Šiame darbe nagrinėjamas supaprastintas Westinghouse 4 kilpų jėgainės reaktoriaus kuro rinklės modelis. Standartinę kuro rinklę šio tipo reaktoriuose sudaro 17x17 išdėstymo 3.660 m ilgio šiluminių elementų rinkinys. Reaktoriaus aktyviojoje zonoje yra naudojamos 193 kuro rinklės. Neskaiciuojant rėtinėse esančių specialų kanalų kuro valdymo strypams, matavimų kanalų ir kitų ne šilumai generuoti skirtų ertmių, aktyviąją zoną sudaro 50,952 kuro strypai/šiluminiai elementai.

Siekiant pagerinti žinias apie pasroviui sraute įrengtas kliūtis ir tokiu būdu pagerinti branduolinio kuro rinklių rėtinių dizainą, per pastaruosius metus buvo atlikta daug teorinių tyrimų ir eksperimentų. Eksperimentų srityje buvo plačiai naudojami du metodai: LDV (angl. Laser Doppler Velocimetry, lazerinė Doplerio poslinkiu paremta greičio matavimo metodika) ir PIV (angl. Particle Image Velocimetry, vaizdinis dalelių greičio nustatymo būdas). Šių įrenginių pagalba galima išmatuoti vietines greičio reikšmes tarp pratekamųjų kanalų aplink šiluminį elementą. Nepaisant to, jog minėtomis technologijomis šioje tyrimų srityje pastaruoju metu pasiekta neblogų rezultatų, eksperimentiniai tyrimai ir toliau išlieka brangūs ir reikalaujantys santykinai ilgo laiko juos atlikti. Kita vertus, teorinių vertinimų, pvz., SFD – skaičiuojamosios skysčių dinamikos analizės rezultatai yra gaunami per palyginami trumpą laiką, ypač kai yra sprendžiamos RANS - Reinoldso vidutinės Navje-Stokso lygtys (angl. Reynolds averaged Navier Stokes).

Yra žinoma, kad kai kurių skaitmeninių problemų, tokių kaip skaičiuojamojo tinklelio akučių tobulinimo, turbulentinio modelio, tinklelio apdorojimo ir atitinkamai apibrėžtų ribinių sąlygų daroma įtaka SFD modeliavimo rezultatams yra santykinai didelė. Šie klausimai ir kylančios problemos yra apibrėžti kiekvieno konkretaus fizinio modelio ir yra ribojami priklausomai nuo turimų skaičiavimo pajėgumų modeliuojant. Pilnos kuro rinklės modeliavimas ne visada yra įmanomas dėl šių skaičiavimo apribojimų, todėl tiriamas elementas yra suskaidomas į atskiras dalis ir fluideo parametrų tyrimams ir optimizavimui yra naudojami atskirų elementų dalių

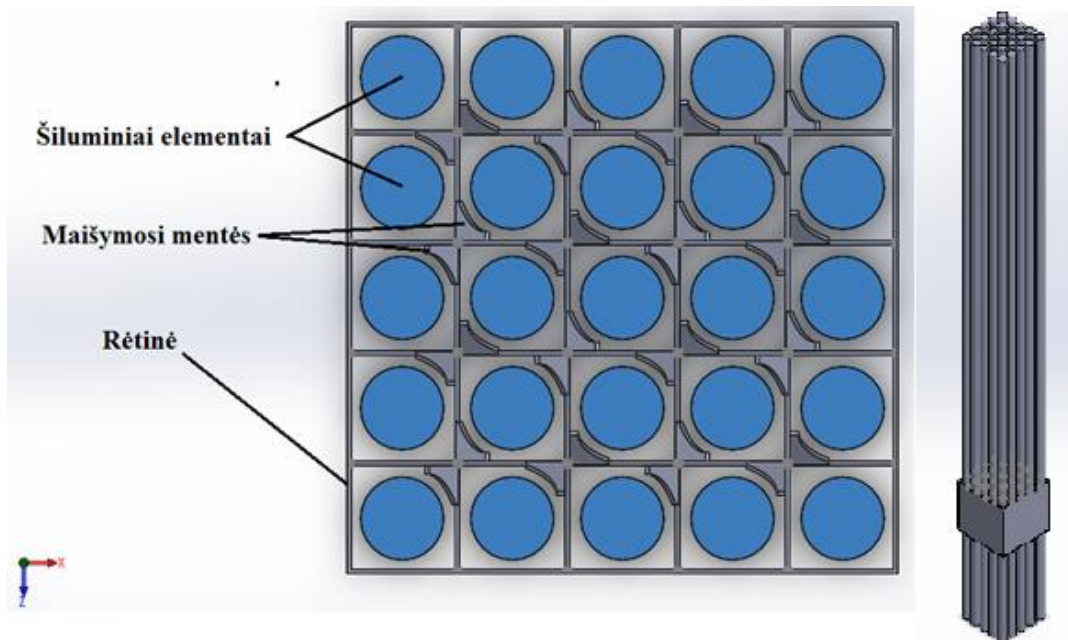
modeliavimo rezultatai. Deja šie supaprastinimai ne visada duoda patikimus rezultatus. Tačiau kaip jau rodo atlikti darbai šioje srityje, pirminių supaprastinimų dėka gauti rezultatai gali būti naudojami priartėjimu optimizuoti tiriamojo objekto parametrus.

Sudėtingi ir galingi superkompiuteriai puikiai tinka SFD uždaviniams spręsti bei rezultatų analizei, tačiau neturint tokių pajėgumų galima įvesti tam tikrus supaprastinimus, kurie arba neturi įtakos galutiniam rezultatui, arba minėta įtaka rezultatams yra labai maža ir gali būti nevertinama. Norint palyginti ar apspręsti vieno ar kito sprendinio tinkamumą atliekant modeliavimą priimti supaprastinimai vienodai įtakoja tiek standartinį, tiek ir modifikuotą sprendimą. Tai galioja ir šiame darbe atliekamam kuro rinklės rėtinės modifikacijai.

Kaip ir minėta, pilną reaktorių sudaro 193 rinklės su 17x17 išdėstytais šiluminiais elementais. Siekiant išsiaiškinti tokios smulkios detalės posvyrio kampo įtaką termohidrauliniams aktyviosios zonos parametrams visai nebūtina modeliuoti pilną reaktoriaus išdėstymą. Kadangi maišymosi mentės nesukuria didelių turbulentinių sūkurių vienos kuro rinklės maišymosi menčių įtaką kitai rinklei gali būti nevertinama.

Pagal jau atliktus tyrimus naudojantis anksčiau išvardintomis metodikomis nustatyta, kad greičių profilių pasiskirstymas naudojant standartines kuro rinklių maišymosi menčių konfigūracijas yra vietinis ir neapima didesnio perimetro nei keletas greta esamų šiluminių elementų. Atsižvelgiant į tai, kad šiame darbe nėra siekiama sumodeliuoti ir suprojektuoti visiškai naujos kuro rinklės sandaros, galimai įtakojančios visą reaktoriaus aktyviosios zonos kinetiką bei kitas jėgainės dalis, primamas skaičiuojamojo modelio supaprastinimas naudojant šiluminių elementų išsidėstymą 5x5. Skaičiuojamojo modelio atvaizdavimas parodytas 4.1 paveiksle.

Galima pastebėti, kad periferinėse skaičiuojamojo modelio zonose nėra išdėstytos maišymosi mentės. Tai grindžiama jau atliktais eksperimentais. Jei skaičiuojamojo modelio periferijoje taip pat yra išdėstomos kuro rinklės rėtinės maišymosi mentės, tokiu atveju modeliuojant matomas neatitinkantys realybės antriniai srautai – srautas nėra tinkamai sumaišomas, nuteka į greta esančias rėtinės akutes bei atsimuša į šoninę skaičiuojamojo modelio ribą. Todėl siekiant tinkamo ir realiam tekėjimui ertmėje tarp šiluminių elementų (kanale) artimo

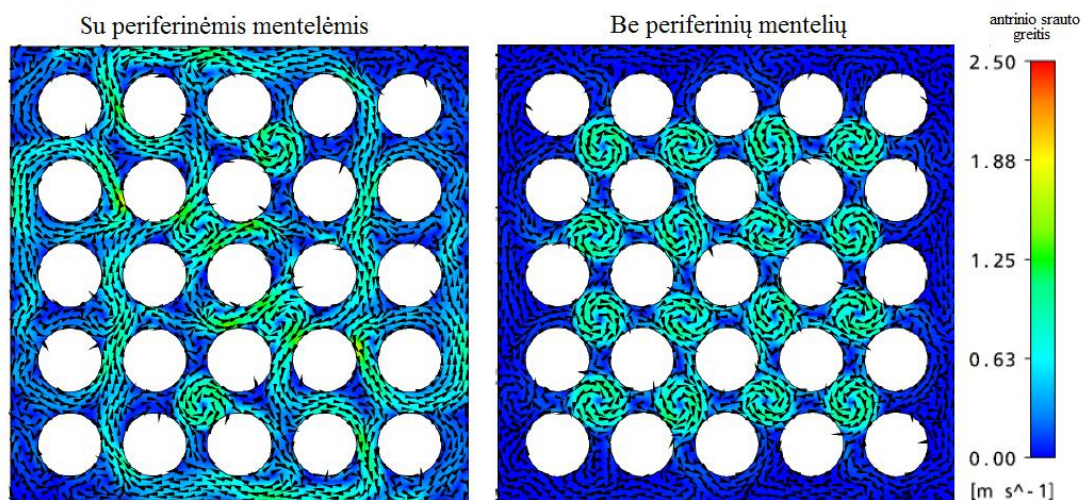


4.1 pav. 5x5 šiluminių elementų išsidėstymo skaičiuojamasis geometrinis modelis

modeliavimo periferinės mentelės nėra naudojamos. Šio modelio supaprastinimas vizualiai atvaizduojamas 4.2 paveiksle.

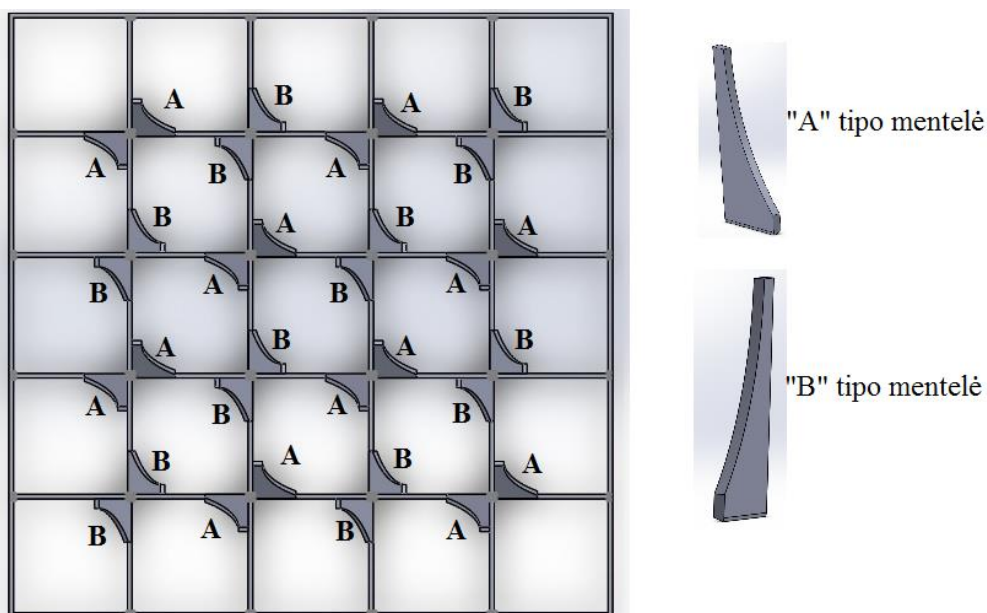
Rinklėje naudojamos rėtinės taip pat turi ir kitų elementų – šiluminių elementų atramos bei spyruokliniai laikikliai bei kitos. Atsižvelgiant į tai, kad šiame darbe atliekamas modeliavimas bei rezultatų palyginimas be maišymosi menčių atliekami vienodomis sąlygomis, nuspręsta šių elementų neįvesti į skaičiuojamąjį modelį. Tai taip pat atliekama siekiant maksimaliai optimizuoti modelį bei išnaudoti turimus skaičiavimo pajėgumus.

Skaičiavimams laikoma, kad kuro įsodrinimo laipsnis yra 3,54 % (pagal LLLP įkrovos metodą naujai paleidžiamam reaktoriui). Tokiu atveju gaunamas didžiausias šilumos srautas ir geriausios sąlygos tirti mentelių pasvirimo kampą į srautą.



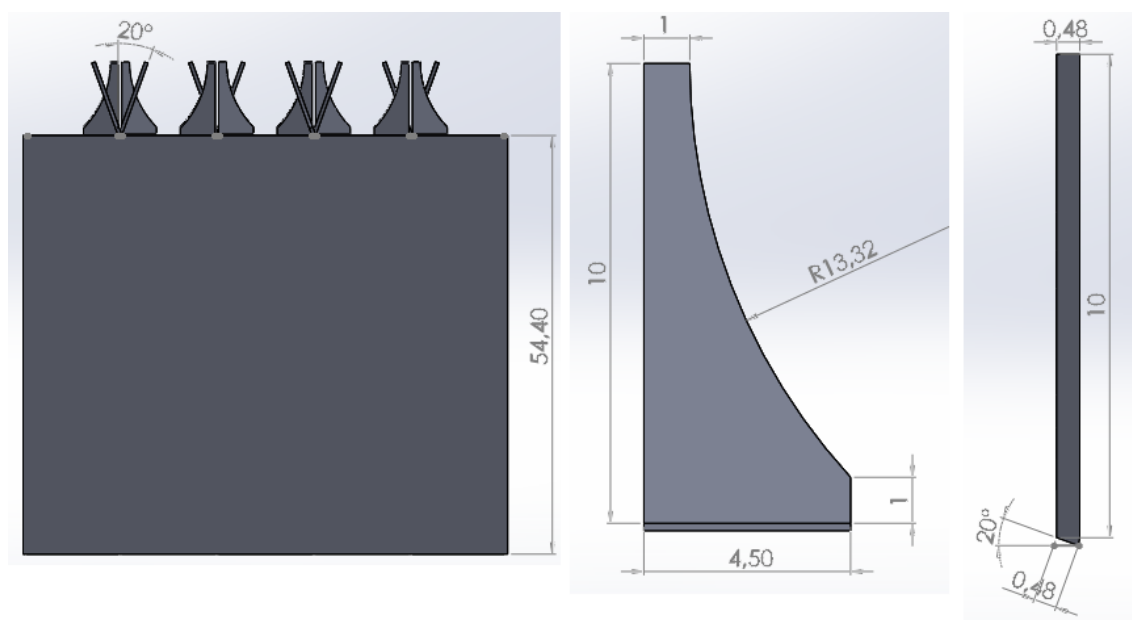
4.2 pav. Antrinio srauto greičio pokytis naudojant periferines maišymosi mentes [6]

Kaip aprašyta anksčiau maišymosi mentės yra išdėstomos pagal standartinį Westinghouse reaktoriuose naudojamą jų išdėstymą. Naudojamos dvi skirtingos mentelės atvaizduotos pagal veidrodinį principą:



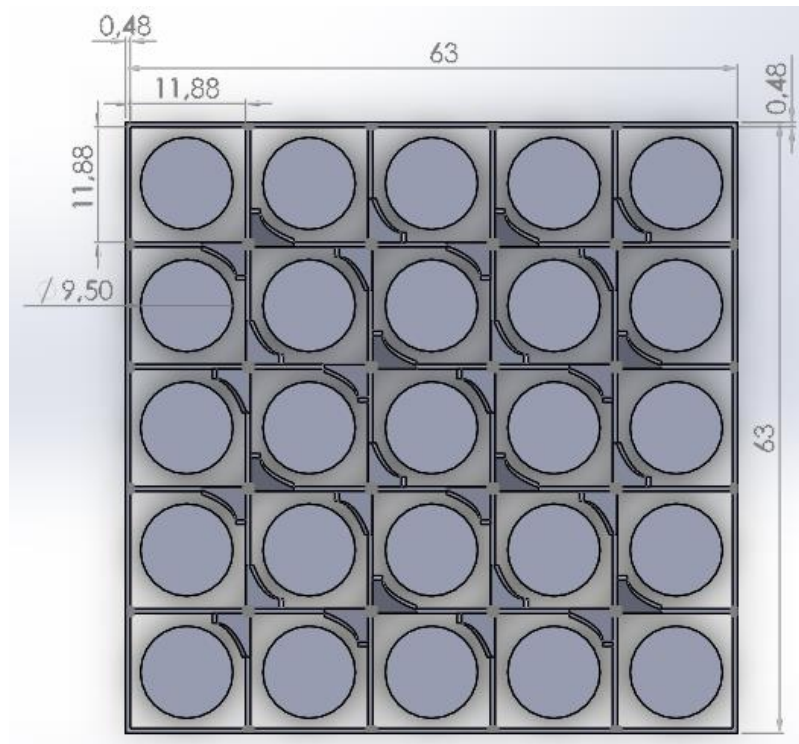
4.3 pav. Maišymosi menčių išdėstymas skaičiavimo modelyje

Pagal Westinghouse kuro rinklės duomenis nubraižytų ir išdėliotų maišymosi menčių bei rėmelio (rėtinės) matmenys pateikti 4.4 paveiksle.



4.4 pav. Mentelės gabaritiniai matmenys.

Analogiškai pagal Westinghouse keturių kilpų reaktoriaus kuro rinklių standartinę struktūrą parenkamos maišymosi mentelių bei kuro rėtinės matmenys, kuriais remiamasi atliekant bandymą. Kuro strypas priimamas kaip vienalytis, 9,5mm skersmens cilindras. Duomenys pateikti 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Skaičiuojamojo modelio matmenys.

4.4 Kraštinės sąlygos skaitiniam modeliavimui

Modeliuojamas šilumnešio srautas per reaktoriaus aktyviają zoną reaktoriui Westinghouse 412 su keturiomis kilpomis. Darbiniai parametrai išvardinti 2.1 lentelėje.

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_{k11} - t_{k12}); \quad (4.14)$$

čia: Q – reaktoriaus šiluminis galingumas kW, G_1 – vandens debitas pirmame kontūre kg/s, c_{p1} – reaktoriaus šilumnešio savitoji šiluma (esant 292,7 °C temperatūrai bei 155 bar slėgiui) kJ/(kg·K).

Įstačius reikšmes gaunama:

$$3411000 = G_1 \cdot 4,14 \quad (33,4).$$

Pertvarkius:

$$G_1 = \frac{3411000}{4,1433,4} = 24.668,00 \text{ (kg/s)}.$$

Reaktoriaus aktyviosios zonos srauto tekėjimo plotas S yra lygus:

$$S = \pi R^2 = 3,14159 \cdot 1,69^2 = 8,97 \text{ (m}^2\text{)}. \quad (4.15)$$

Norint apskaičiuoti masinį debitą per nagrinėjamą sistemą, reikia apskaičiuoti sistemos plotą:

$$s = 0,063 \cdot 0,063 = 0,004 \text{ (m}^2\text{)}. \quad (4.16)$$

Laikoma, kad srautas dėl vienodų kuro rinklių išdėstymo reaktoriaus aktyviojoje zonoje

pasiskirsto tolygiai ir masinis debitas reaktoriaus skerspjūvyje yra tolygus. Tada proporcingai randamas masinis debitas g per nagrinėjamą sistemą:

$$g = \frac{0,004 \cdot 24668}{8,97} = 10,97 \text{ (kg/s)}.$$

Masinis debitas g paverčiamas srauto greičiu v , kuris bus laikomas kaip kraštinė sąlyga modeliuojant sistemą ANSYS CFX 15.0 sistemoje:

$$v = \frac{g}{\rho \cdot A} \text{ (m/s);} \quad (4.17)$$

čia: ρ – suslėgto vandens tankis (esant 292,7 °C temperatūrai bei 155 bar slėgiui) kg/m³;

A – pratekėjimo paviršiaus plotas nagrinėjamai sistemai m².

$$v = \frac{10,97}{1005,24 \cdot 25 \cdot (0,1188^2 - 0,095^2)} = 5,511 \text{ (m/s)}.$$

Kad modeliuojant būtų gaunamas rezultatas, taip pat reikalinga užduoti ir šilumos srautą į šiluminių elementų paviršių. Jis apskaičiuojamas:

$$q = \frac{Q}{S_{sild}} \text{ (kW/m}^2\text{)}. \quad (4.18)$$

čia: S_{sild} – šildomo paviršiaus plotas m².

Šildomas paviršius – tai paviršius ant kurio išsiskiria šiluma. Supaprastintai galima laikyti, kad tai yra visų šilumą išskiriančių šiluminių elementų bendras suminis paviršiaus plotas, tokiu atveju šilumos srautas elemento sienelei būtų:

$$q = \frac{Q}{n \cdot 2\pi r h} \text{ (kW/m}^2\text{);} \quad (4.19)$$

čia: n – šiluminių elementų skaičius aktyviojoje zonoje vnt., r – šiluminio elemento spindulys m , h – šiluminių elementų ilgis m . Gauname:

$$q = \frac{Q}{n \cdot 2\pi r h} = \frac{3411000}{50952 \cdot 2 \cdot 3,14159 \cdot 0,00475 \cdot 3,66} = 612,867 \text{ (kW/m}^2\text{)}.$$

Į 4.1 lentelę surašomos visos ribinės sąlygos, kurios reikalingos tinkamai nustatyti kraštines sąlygas skaitiniam modeliavimui.

4.1 lentelė. Apskaičiuotos kraštinės sąlygos skaitiniam modeliavimui

<i>Eil. Nr.</i>	<i>Parametras</i>	<i>Matavimo vienetai</i>	<i>Vertė</i>
1.	Vandens temperatūra įtekėjime	°K	565,850
2.	Slėgis įtekėjime	barg	155,000
3.	Srauto greitis per sistemą	m/s	5,511
4.	Šilumos srautas šiluminio elemento sienelėje	kW/m ²	612,867
5.	Vandens tankis įtekėjime	kg/m ³	1.005,244

5. SKAITINIO TYRIMO REZULTATAI

5.1 Skaitinio modelio aprašymas

Esminis šio darbo tikslas – keičiant maišymosi menčių posvyrio kampą į srauto tekėjimo kryptį nustatyti efektyviausią posvyrio kampą. Efektyvumas nustatomas pagal tai, kiek papildomai šilumos nuvedama nuo šiluminių elementų (kuro strypų) lyginant su modeliu, kuriame nėra naudojamos maišymosi mentės.

Maišymosi menčių sukuriamas antrinis srautas pagerina šilumos atidavimą nuo šiluminių elementų paviršiaus aušinančiam vandeniui. Šilumos atidavimą galima aprašyti Nuselto panašumo kriterijumi Nu :

$$Nu_{vid} = \frac{\bar{\alpha} D_h}{k} \quad (5.1)$$

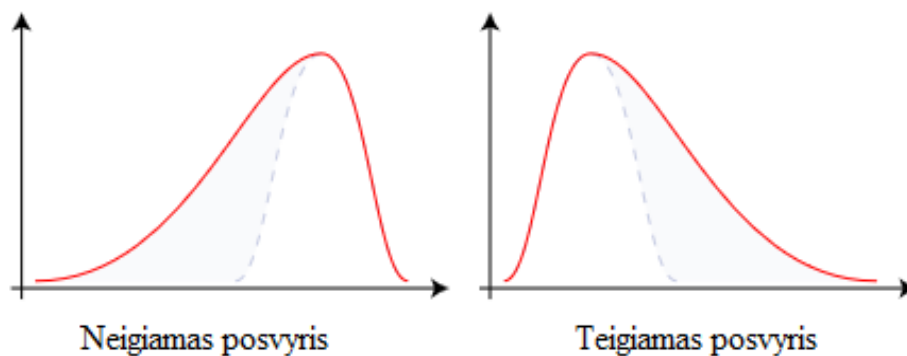
čia: D_h – hidraulinis tekėjimo kanalo diametras, \bar{k} - vidutinis vandens šilumos laidumas, $\bar{\alpha}$ - vidutinis šilumos perdavimo koeficientas.

Supaprastintai šilumos atidavimo koeficientą galima aprašyti (5.2) lygybe:

$$\bar{\alpha} = \frac{q}{(\bar{T}_{SIEL} - \bar{T}_{vandens})}; \text{ W/m}^2\text{K} \quad (5.2)$$

Būtent temperatūros pokytis, kuris ir yra varomoji jėga šilumos mainuose, yra šio darbo skaitinio modeliavimo pagrindas. Modeliuojant besimaišantį srautą siekiama sumažinti aušalo (vandens) temperatūros skirtumą tarp paviršiaus ir vidinės kanalo ertmės, taip pagerinant šilumos nuvedimą nuo šiluminių elementų bei efektyvinant reaktoriaus darbą.

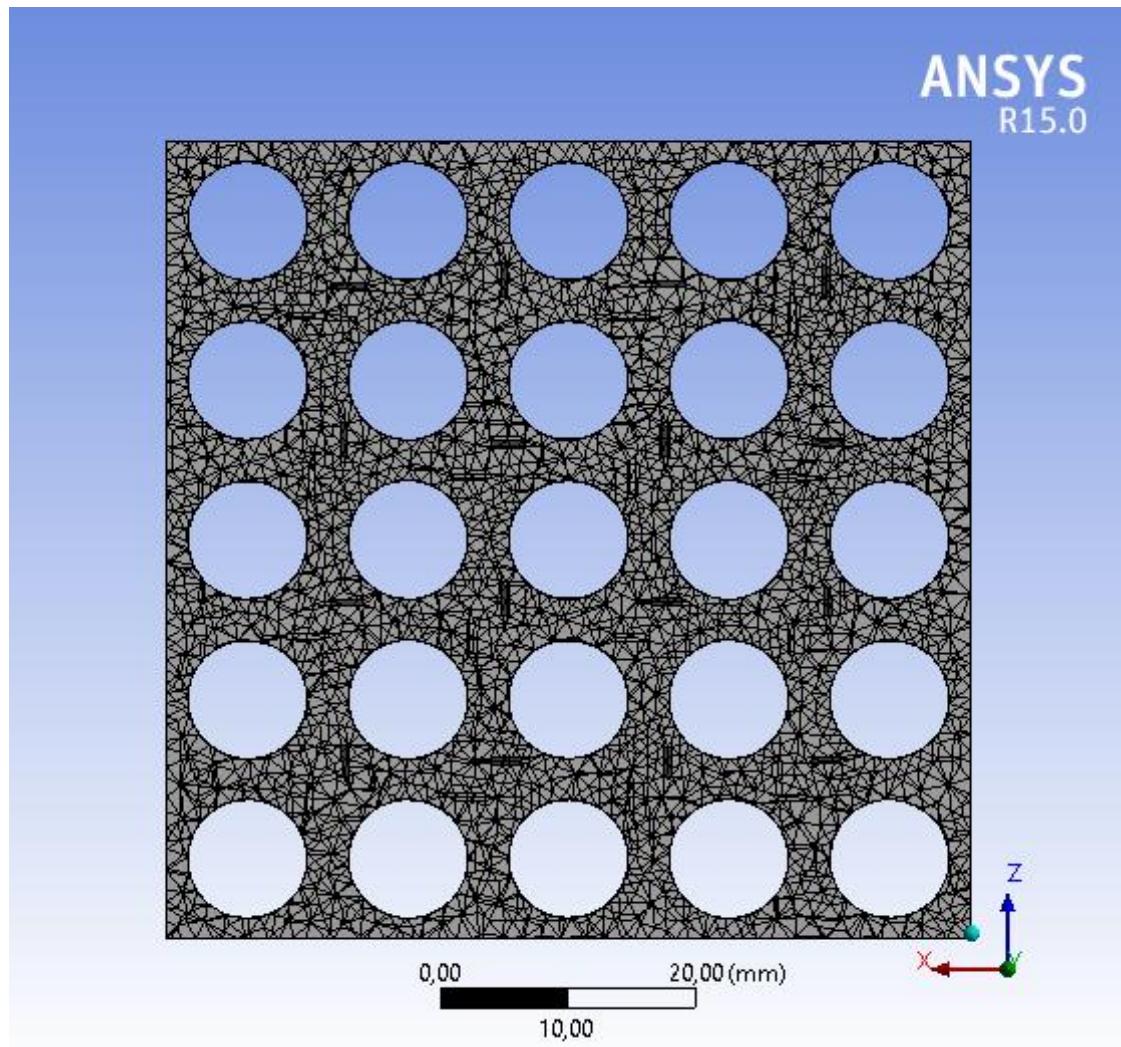
Skaitinis modelis pradedamas sudarinėti geometriniam modelyje generuojant skaičiuojamąjį tinklą. Tinklelio generavimui pasirenkami svarbos centro nustatymai *fine* (liet. smulkus) bei glotninimo nustatymas *high* (liet. aukštas) – taip siekiama sumažinti atstumą tarp gretimų skaičiavimo taškų (tinklelio susikirtimo taškų, arba, atsižvelgiant į tai kad modeliuojama 3D erdvėje – piramidžių viršūnių). Tinklelio įvertinimui naudojamas *posvyrio* (angl. *skewness*) parametras.



5.1 pav. Posvyrio (angl. skewness) vaizdinis paaiškinimas

Šis parametras statistinėje matematikoje parodo, kiek yra nukrypstama nuo normalinio skirstinio. Posvyrio parametro paaiškinimas pateikiamas 5.1 paveiksle. Kuo posvyris didesnis (į teigiamą pusę), tuo tinklelio akučių dydis mažesnis, tuo tikslesnis skaičiuojamasis modelis bei galutiniai skaičiavimo rezultatai.

Žemiau 5.2 paveiksle pateikiamas sugeneruotas tinklelis ANSYS Meshing posistemėje. Tinklelio posvyrio rodiklis pateikiamas 5.3 paveiksle.

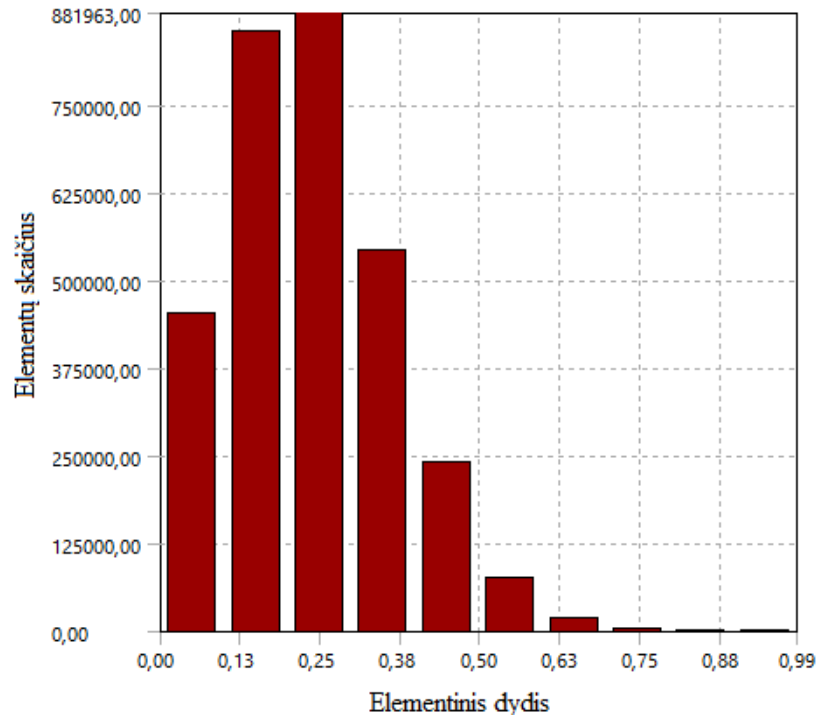


5.2 pav. Skaičiuojamojo modelio tinklelis aplink kuro strypus bei maišymosi mentes

Skaičiuojamojoje fluidų dinamikoje posvyrio rodiklis naudojamas kaip vienas svarbiausių tinklelio įvertinimo įrankių. Daugumoje atvejų vidutinis posvyrio rodiklis tinkleliui neturėtų viršyti 0,25 (posvyrio parametras yra santykinis bedimensinis dydis ir apibrėžiamas ribose $0 \leq x \leq 1$).

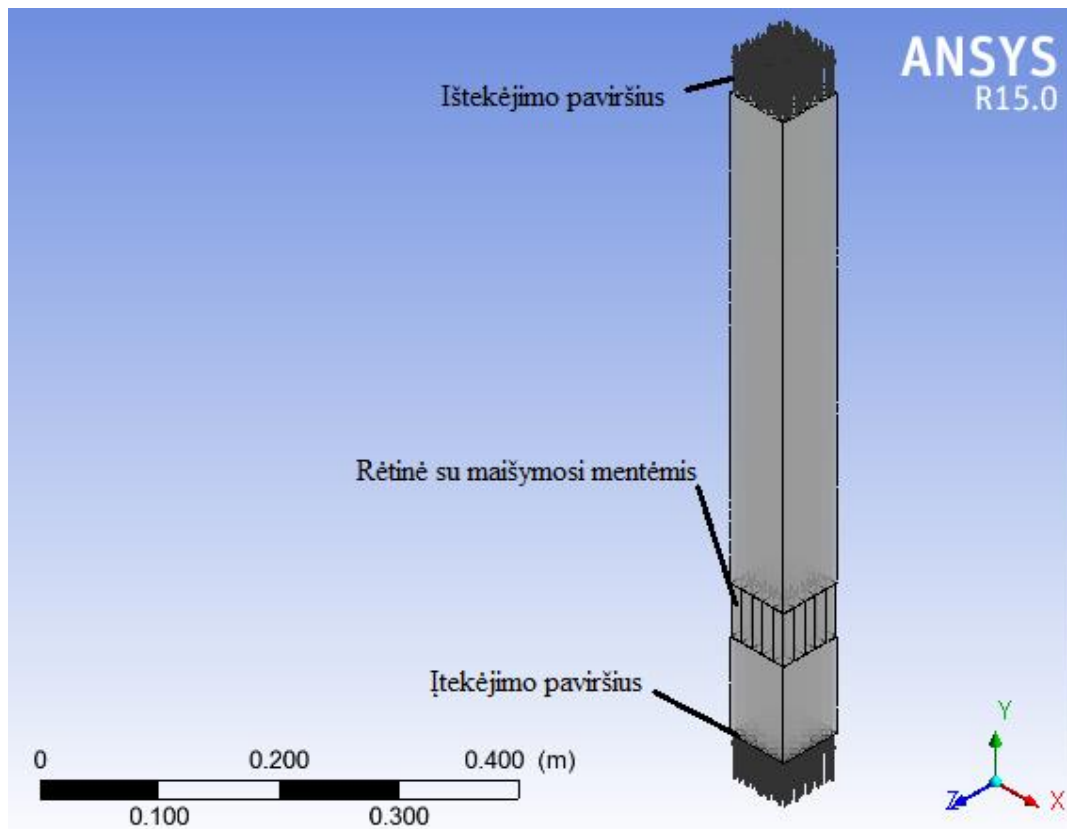
Sugeneruoto tinklelio vidutinis posvyrio rodiklis yra 0,23, taigi pasiektas tikslumas, leidžiantis atlikti tolimesnius skaitinio modeliavimo žingsnius.

Gavus tinkamos kokybės tinklelį aprašomi įvadiniai skaičiavimo duomenys, remiantis 4.4 skyriuje apskaičiuotomis reikšmėmis. Atsižvelgiant į skaičiuojamojo aparato parametrus (Intel i5 M-460 procesorius, 8 GB operatyviosios atminties) nustatomas iteracijų skaičiavimo ribinis



5.3 pav. Naudojamo tinklelio elementų dydžio pasiskirstymas. Posvyrio rodiklis – 0,23

tikslumas – 10^{-4} RMS (angl. root mean square, aritmetinė vidurkio šaknis). Didinant skaičiavimo tikslumą galima neapibrėžtai prailginti skaičiavimo trukmę, kas itin svarbu turint ribotus skaičiavimo išteklius. Atsižvelgiant į tai, kad šie skaičiavimai yra s kirti kelių skirtingų srauto



5.4 pav. Skaičiuojamojo modelio aprašomasis atvaizdas

tekėjimo per branduolinio kuro rinklę atvejų palyginimui, nurodytas tikslumas tenkina uždavinį. Nustatoma tekanti terpė – vanduo. Pažymimi ir aprašomi šiluminį srautą vandeniui teikiantys paviršiai – šiluminiai elementai. Laikoma, kad šilumos mainai su aplinka nevyksta (adiabatinis vandens šildymas modelio viduje), aptekami paviršiai švelnūs, o srautas teka tik modelio viduje. Skaičiuojamojo modelio aprašomasis atvaizdas pateikiamas 5.4 paveiksle.

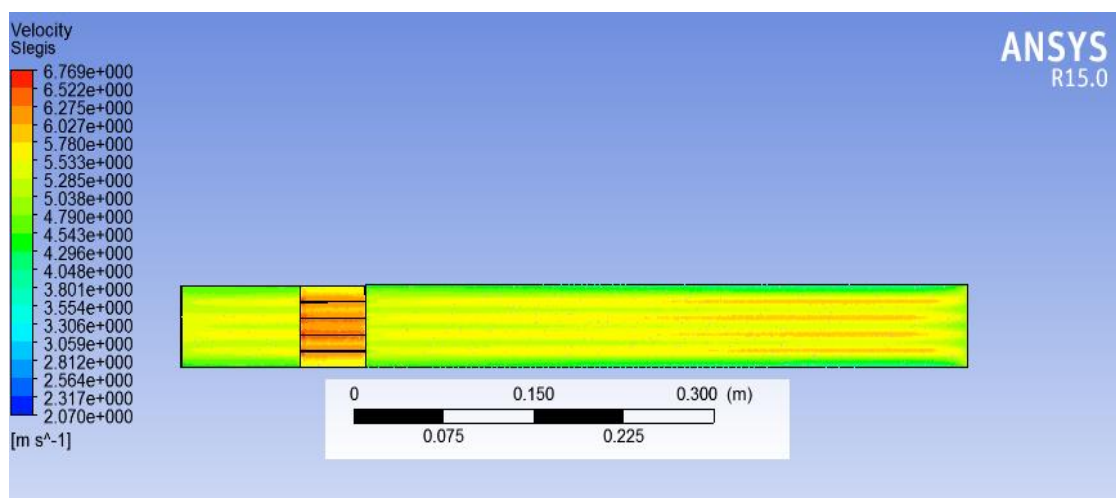
Suformavus užduotį ANSYS CFX 15.0 skaičiuojamajam programiniam paketui atliekamas skaitinis tyrimas prie šių maišymosi menčių posvyrio į srautą kampų: 0°, 17°, 20°, 23°, 27°, 30°. Gauti rezultatai palyginami bei įvertinamos kiekvienos kuro rinklės modifikacijos efektyvumas pagal šiame skyriuje aprašytą efektyvumo vertinimo metodiką.

5.2 Skaičiavimo rezultatai

Gauti rezultatai apdorojami vaizdine bei skaičiuojamąja metodika.

Pirmasis skaičiavimas atliekamas nenaudojant maišymosi menčių (jų posvyrio kampas į srautą lygus 0°). Minėtajam skaitiniam tyrimui atvaizduoti naudojami pagrindiniai šiluminiai bei hidrauliniai parametrai – temperatūra, slėgis, srauto greitis. Naudojamos tiek vietinės, tiek vidutinės šių kintamųjų reikšmės.

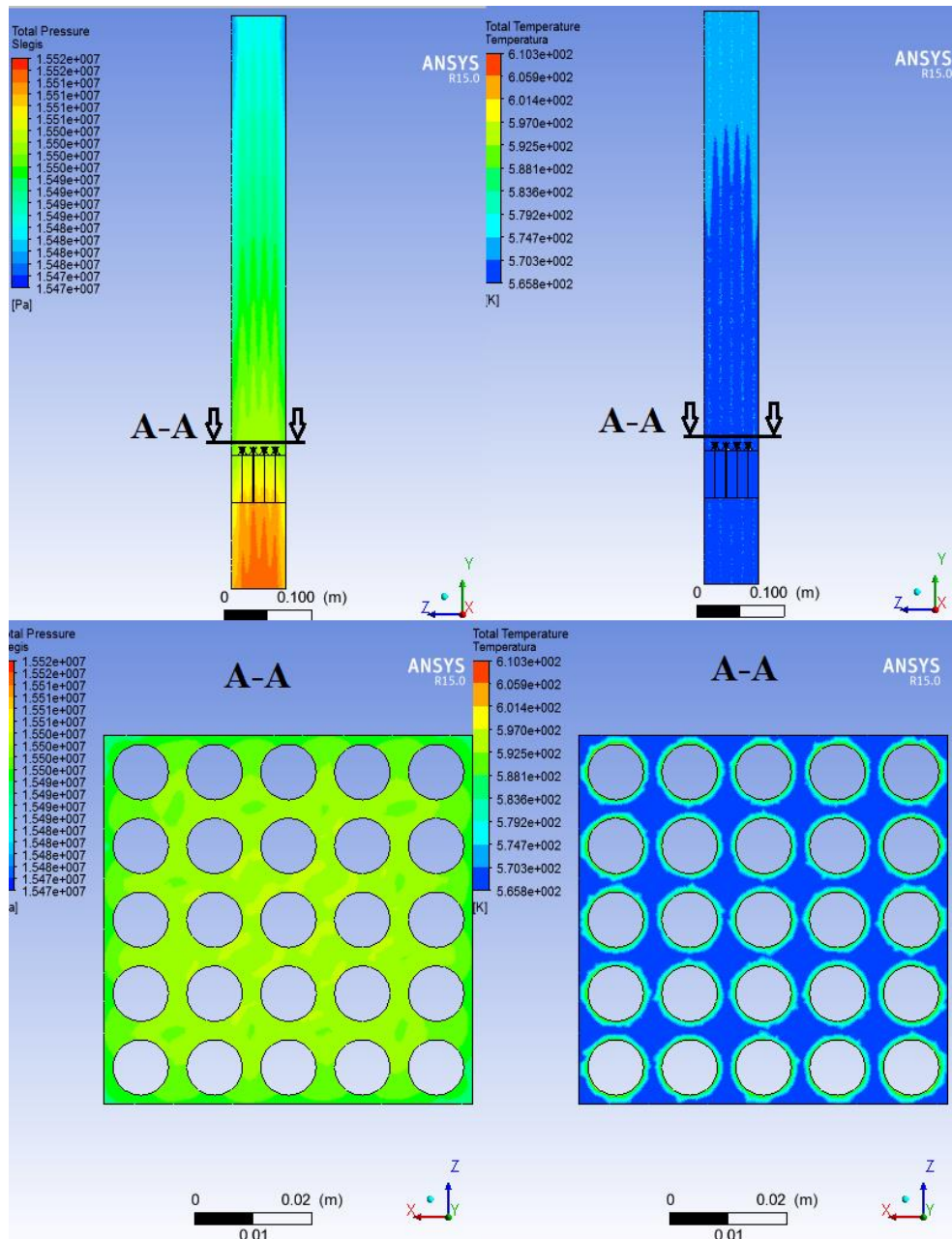
Žemiau pateikiamas vaizdinis slėgio bei temperatūros pokyčio rezultatas nenaudojant maišymosi menčių.



5.5 pav. Apskaičiuotų greičio reikšmių vaizdinis atvaizdavimas (maišymosi menčių posvyris – 0°)

Iš 5.5 ir 5.6 paveiksluose pateiktų gautų modeliavimo rezultatų matyti, kad slėgio reikšmė srautui tekant per geometrinį rinklės modelį krenta, t.y. patiriami realūs slėgio nuostoliai. Iš vaizdinės informacijos galima matyti, kad slėgio nuostoliai per visą nagrinėjamą modelį yra apie 1,5 bar.

Temperatūros grafinis atvaizdavimas rodo apie srauto, tekančio per sistemą, temperatūros didėjimą – šiluma nuo šiluminių elementų perduodama aušinančiam vandeniui.



5.6 pav. Skaitinio tyrimo, esant 0° maišymosi menčių posvyriui, slėgio (kairėje) ir temperatūros (dešinėje) vaizdinis reikšmių atvaizdavimas

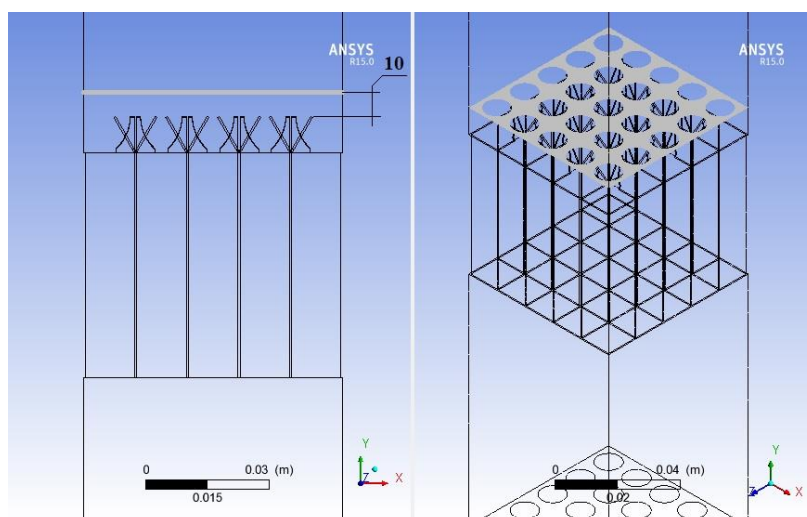
Greičio atvaizdavimas 5.5 paveiksle leidžia pamatyti, kaip rėtinėje, susiaurėjus pratekamam plotui, vandens greitis staiga padidėja, ir vėl nukrenta iki įprastinės reikšmės. Srautui po vietinės kliūtis (rėtinės) grįžus į normalų kryptingą tekėjimą srauto greitis tarp šiluminių elementų padidėja. Tai galima paaiškinti stabilaus pasienio sluoksnio susidarymu prie šiluminių elementų, ir dėl to kanalo centre auga masinis debitas bei srauto greitis.

Rezultatų vaizdiniam palyginimui pateikiami ir vaizdiniai rezultatai, gauti atlikus skaitinį tyrimą esant 30° (maksimaliam) maišymosi menčių posvyriui į srautą. Greičio kitimas

Atidžiau išnagrinėjus vaizdinius rezultatus, galima matyti, kad slėgio ir temperatūros reikšmės labai mažai skiriasi nuo tyrimo, kuriame šiluminiai parametrai apskaičiuoti maišymosi mentelėms neatliekant jokios funkcijos, t.y. posvyrio kampui į srautą esant 0° .

Greičio reikšmės pastebimai skiriasi – esant 30° menčių posvyriui ašinis greitis pastebimai tolygesnis. Kaip ir 0° menčių posvyrio atveju greitis padidėja susiaurėjus pratekamo kanalo skerspjūviui rėtinėje, tačiau už rėtinės nebesusidaro toks ryškus pasienio sluoksnis ir srauto greitis tampa tolygesnis visame kanalo skerspjūvyje. Tai rodo, kad maišymosi mentės padeda ardyti srauto tolygumą, t.y. papildomai turbulizuoja srautą bei ardo pasienio sluoksnį.

Kadangi maišymosi mentės nukreiptos į srautą kampu, jos dalinai suardo ašinį tekėjimą bei sukelia vietinius sūkurius, kurių kryptis yra skirtingoje plokštumoje nei ašinis greitis. Šie sūkuriai yra lygiagretūs įtekėjimo/ištekėjimo paviršiams ir ašiniame sraute sukurti sūkuriai vandenį perneša ne tik ašine, tačiau ir kitomis kryptimis. Toks srauto tekėjimas, kuomet jo kryptis nesutampa su pagrindiniu ašiniu srautu yra vadinamas antriniu srautu. Šio srauto analizei parenkama plokštuma, 10 mm nutolusi nuo maišymosi menčių viršūnių, t.y. toje vietoje, kur srautas, aptekėjęs mentes, yra labiausiai turbulizuotas ir antrinis srautas – didžiausias.



5.9 Antrinio srauto nagrinėjimo plokštuma

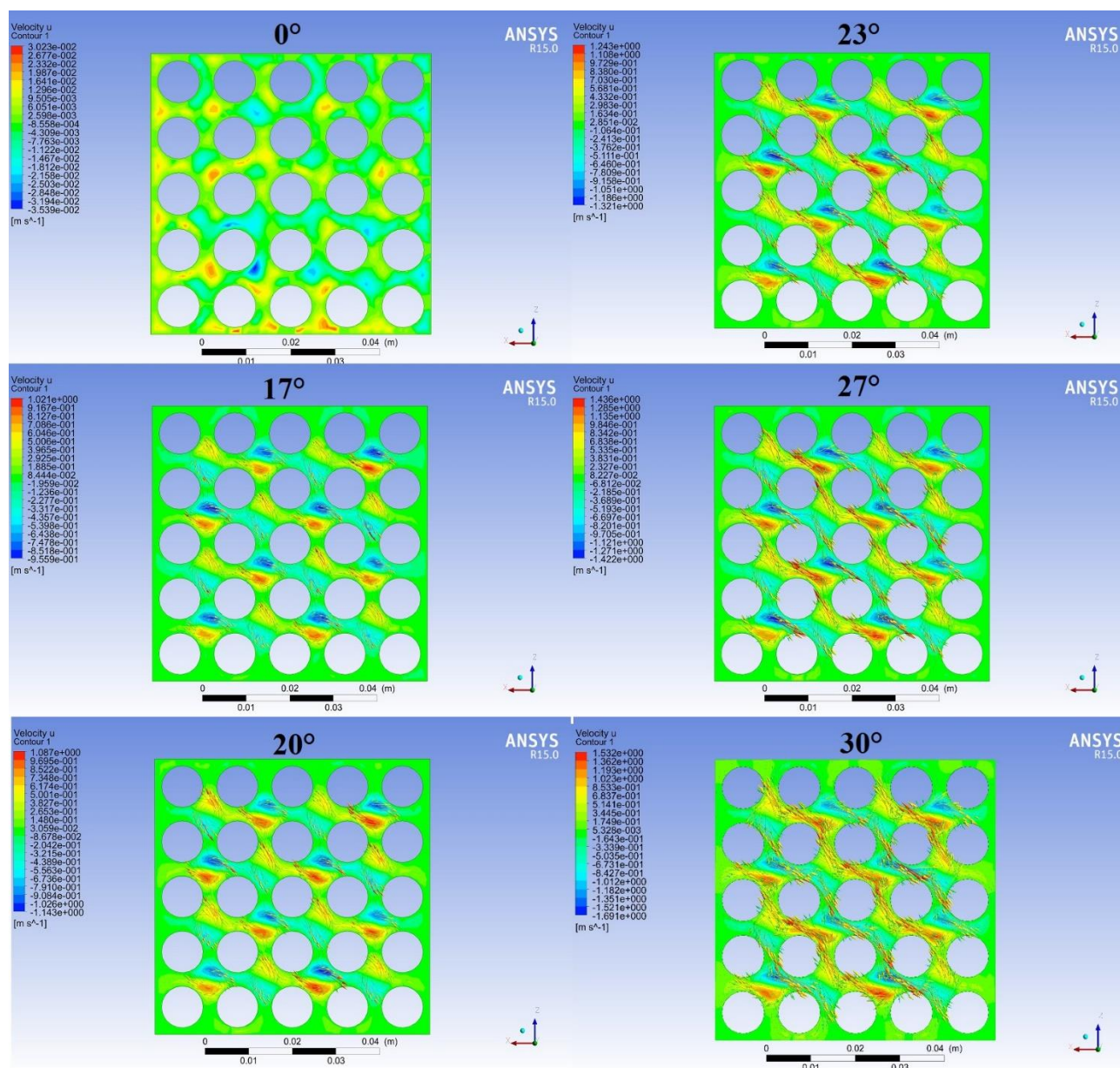
Atlikus visus skaitinius tyrimus visiems pasirinktiems menčių posvyrio į srautą variantams, minėtoje analizės plokštumoje atvaizduojami antrinio srauto kontūrai bei greičio vektoriai, lygiagretūs šiai plokštumai, t.y. antrinio srauto greičio vektoriai.

Susistemintas rezultatas pateikiamas 5.9 paveiksle.

Kaip matyti iš pateikto vaizdinio rezultato, didėjant mentės posvyrio kampui pastebimai didėja ir antrinis srautas. 0° menčių posvyrio atveju antrinis srautas yra itin nedidelis (žr. reikšmes legendoje) ir chaotiškai išsibarstęs. Šis srautas sudaromas ašiniam vandens srautui ištekant iš rėtinės. Kadangi rėtinė, nepriklausomai ar su ar be maišymosi mentelių, yra vietinė kliūtis srautui (susiaurėjimas), kurią aptekant susidaro papildoma turbulencija, pasireiškianti antrinio srauto

didėjimu. Branduoliniuose reaktoriuose, veikiančiuose be maišymosi menčių, nagrinėjamos plokštumos vietoje šilumos atidavimas nuo šiluminių elementų aušinančiam vandeniui būtų patenkinamas, tačiau kaip rodo ašinio greičio skaitinis modeliavimas, nenaudojant maišymosi menčių srauto greitis tarp šiluminių elementų netrukus ima augti, kai pradeda formuotis reikšmingas pasienio sluoksnis. Taip neužtikrinamas efektyvus šilumos panaudojimas, bei kyla kitos grėsmės (branduolinio kuro perkaitimo ir pan.). Akivaizdu, kad šiuo nagrinėjamu atveju antrinis srautas pagerina ašinio srauto pasiskirstymą išilgai kuro strypų.

Šioje vietoje grįžtama prie uždavinio – atlikti analizę, kuris iš nagrinėjamų mentelės posvyrio kampų užtikrins efektyviausią šilumos nuvedimą nuo šiluminių elementų. Nustatytas antrinio srauto pokytis liudija apie vykstančius srauto pokyčius keičiantis mentelės posvyrio kampui, tačiau vaizdinė analizė neleidžia atlikti jokio praktiško palyginimo iš anksčiau pateiktų temperatūros bei slėgio kontūrų.

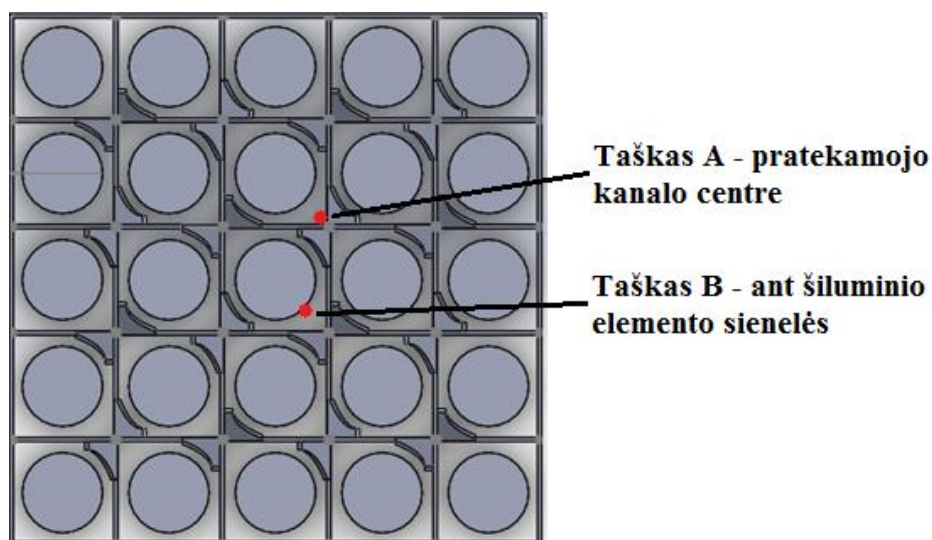


5.10 pav. Antrinio srauto dydis kintant maišymosi menčių posvyrio kampui

5.3 Hidraulinis skaičiuojamojo modelio tyrimas

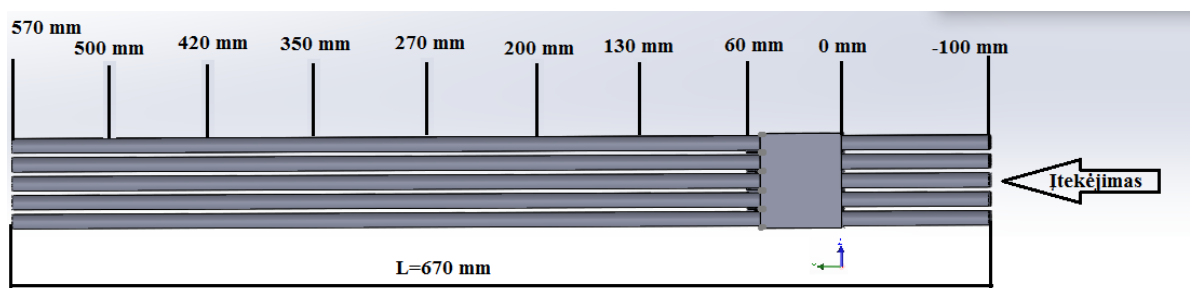
Atlikus skaitinį modeliavimą visais mentės posvyrio atvejais gautų rezultatų analizei parenkama skaitinė analizė, t.y. konkrečių slėgio, temperatūros bei greičio reikšmių palyginimas skirtingais mentelės pasvirimo modeliavimo atvejais.

Rezultatai lyginami dvejomis grupėmis – analizuojant minėtų šiluminių ir hidraulinių parametrų reikšmes ant šiluminio elemento sienelės išilgai visos nagrinėjamos sistemos, bei pratekamojo kanalo centre, tarp šiluminių elementų, kur nėra tiesioginio sąlyčio su aplinkiniais kūnais, ir srauto elgsena yra šiek tiek kitokia (pavyzdžiui antrinis srautas didžiausias būtent kanalų centruose). Konkretūs analizuojami taškai pavaizduoti 5.11 paveiksle.



5.11 Pasirinkti šiluminių ir hidraulinių parametrų analizės taškai

Pasirinktose analizės vietose iš skaitinio modeliavimo rezultatų gaunamos temperatūros reikšmės yra pateikiamos žemiau 5.1 lentelėje. Lentelėse žymuo X rodo atstumą nuo rėtinės pradžios, t.y. sistemos pradžia laikoma rėtinės apatinė dalis. Detaliau sistemos skaidymas ilgio vienetais pavaizduotas 5.12 paveiksle.



5.12 Pasirinktos šiluminių ir hidraulinių parametrų analizės vietos išilgai visos sistemos

5.1 lentelė. Slėgio sistemos centre priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo

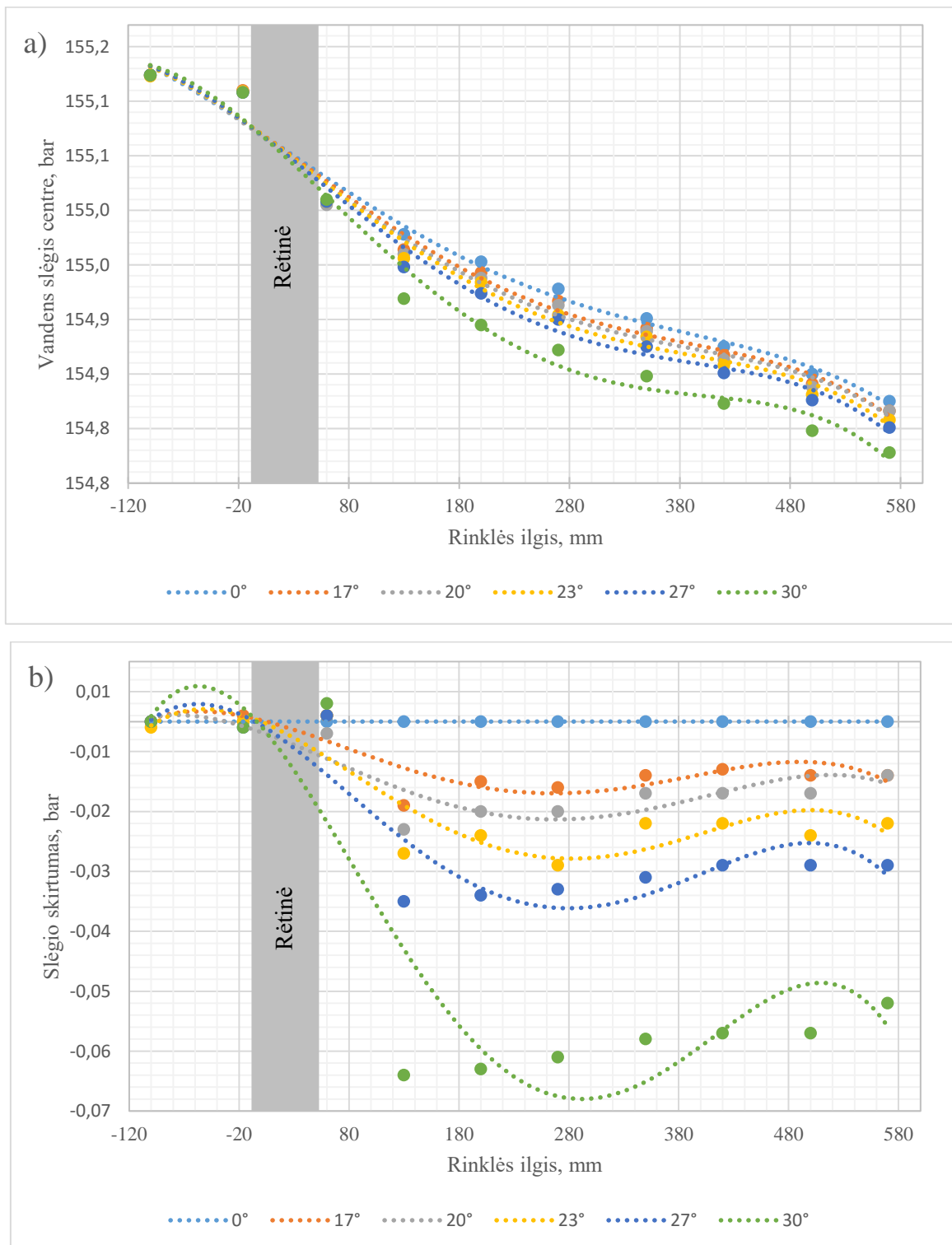
Slėgis centre, bar						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	154,855	154,846	154,846	154,838	154,831	154,808
500	154,880	154,871	154,868	154,861	154,856	154,828
420	154,905	154,897	154,893	154,888	154,881	154,853
350	154,931	154,922	154,919	154,914	154,905	154,878
270	154,958	154,947	154,943	154,934	154,930	154,902
200	154,983	154,973	154,968	154,964	154,954	154,925
130	155,008	154,994	154,990	154,986	154,978	154,949
60	155,037	155,038	155,035	155,038	155,038	155,040
-20	155,139	155,140	155,139	155,139	155,138	155,138
-100	155,154	155,154	155,154	155,153	155,154	155,154

Atsižvelgiant į tai, kad šio modeliavimo tikslas yra nustatyti optimaliausią maišymosi menčių posvyrio kampą, kiekvienu mentelės pasvirimo kampo atveju gautos slėgio reikšmės yra lyginamos su skaitinio modeliavimo rezultatais nenaudojant maišymosi menčių, t.y. kai pasvirimo kampas yra lygus 0°. Žemiau pateikiamos slėgio skirtumo reikšmės:

5.2 lentelė. Slėgio sistemos centre skirtumas tarp 0° ir visų kitų nagrinėtų mentelės pasvirimo kampų

Slėgio skirtumas centre, bar						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	0,000	-0,009	-0,009	-0,017	-0,024	-0,047
500	0,000	-0,009	-0,012	-0,019	-0,024	-0,052
420	0,000	-0,008	-0,012	-0,017	-0,024	-0,052
350	0,000	-0,009	-0,012	-0,017	-0,026	-0,053
270	0,000	-0,011	-0,015	-0,024	-0,028	-0,056
200	0,000	-0,010	-0,015	-0,019	-0,029	-0,058
130	0,000	-0,014	-0,018	-0,022	-0,030	-0,059
60	0,000	0,001	-0,002	0,001	0,001	0,003
-16	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,001	-0,001
-100	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000
Σ	0,000	-0,068	-0,095	-0,135	-0,185	-0,375

Lyginant šiuos rezultatus kiekvieno mentelės pasvirimo kampo atveju išvedamas suminis nuokrypis, kuris parodo bendrą slėgio nukrypimą visos sistemos ilgyje. Akivaizdu, kad didėjant maišymosi mentelių posvyrio kampui didėja ir slėgio nuostoliai, t.y. slėgio nuokrypis neigiamas bei yra didžiausias ties 30° posvyrio kampu. 5.1 ir 5.2 lentelių duomenys atvaizduojami grafiškai 5.13 paveiksle.



5.13 pav. a) slėgio sistemos centre priklausomybės bei b) slėgio sistemos centre skirtumo priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas

Iš pateiktų grafikų galima pamatyti, kad srauto slėgis labiausiai sumažėja 30° mentelės pasvirimo atveju, visais kitais atvejais slėgio reikšmės bei jų pokytis, lyginant su 0° geometrinio modelio skaičiavimo rezultatais liudija, kad didėjant mentelės posvyrio kampui didėja slėgio nuostoliai sistemoje.

5.3 lentelė. Slėgio ant kuro elemento sienelės priklausomybės bei slėgio ant kuro elemento sienelės skirtumo priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo

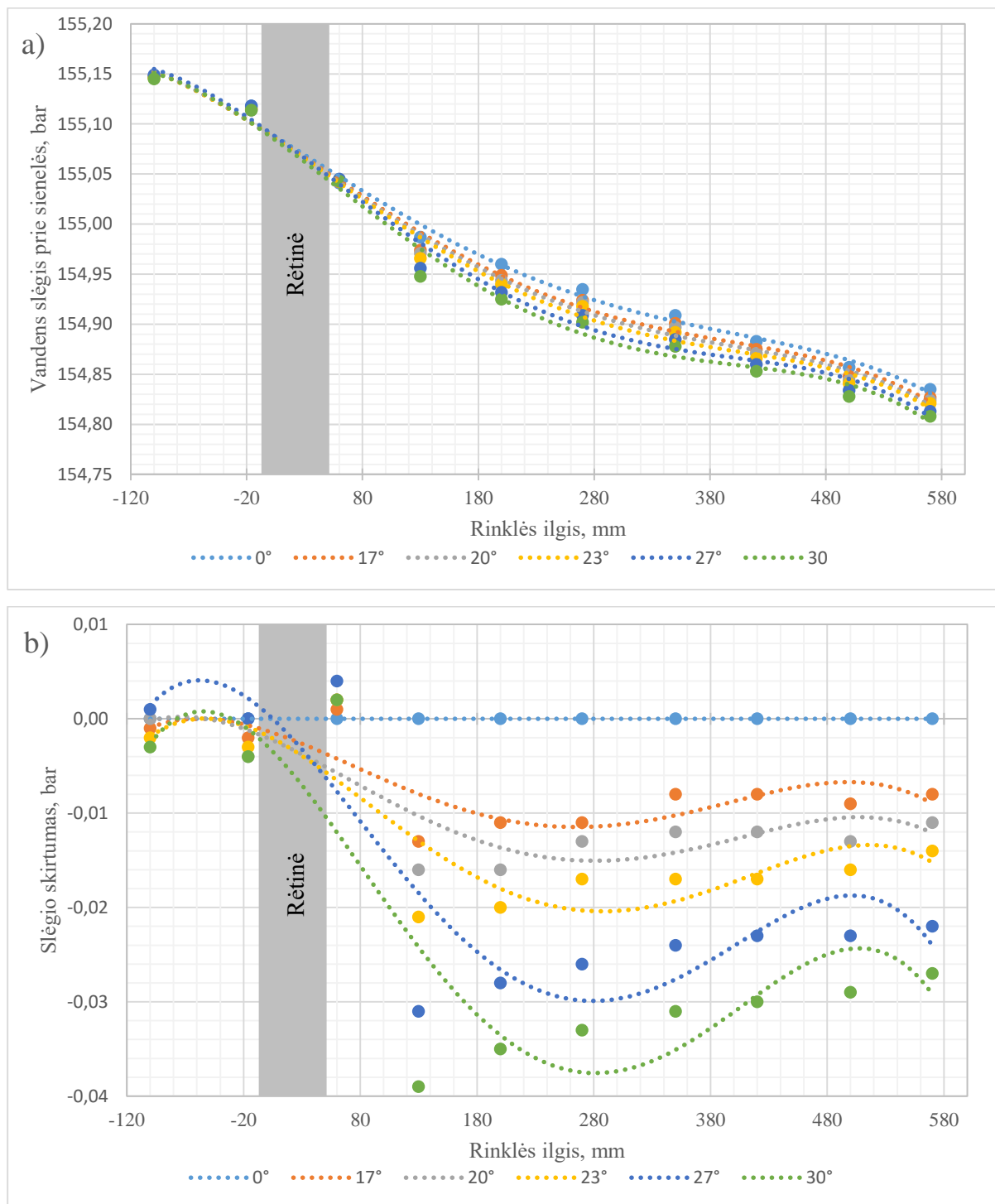
Slėgis ant kuro elemento sienelės, bar						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	154,835	154,827	154,824	154,821	154,813	154,808
500	154,857	154,848	154,844	154,841	154,834	154,828
420	154,883	154,875	154,871	154,866	154,860	154,853
350	154,909	154,901	154,897	154,892	154,885	154,878
270	154,935	154,924	154,922	154,918	154,909	154,902
200	154,960	154,949	154,944	154,940	154,932	154,925
130	154,987	154,974	154,971	154,966	154,956	154,948
60	155,041	155,042	155,043	155,043	155,045	155,043
-16	155,118	155,116	155,114	155,115	155,118	155,114
-100	155,148	155,147	155,148	155,146	155,149	155,145
Slėgio skirtumas ant kuro elemento sienelės, bar						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	0,000	-0,008	-0,011	-0,014	-0,022	-0,027
500	0,000	-0,009	-0,013	-0,016	-0,023	-0,029
420	0,000	-0,008	-0,012	-0,017	-0,023	-0,030
350	0,000	-0,008	-0,012	-0,017	-0,024	-0,031
270	0,000	-0,011	-0,013	-0,017	-0,026	-0,033
200	0,000	-0,011	-0,016	-0,020	-0,028	-0,035
130	0,000	-0,013	-0,016	-0,021	-0,031	-0,039
60	0,000	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002
-16	0,000	-0,002	-0,004	-0,003	0,000	-0,004
-100	0,000	-0,001	0,000	-0,002	0,001	-0,003
Σ	0,000	-0,070	-0,095	-0,125	-0,172	-0,229

Verta pažymėti, kad priklausomybė nėra tiesinė, kadangi 30° mentės posvyrio atveju slėgio skirtumas (slėgio nuostoliai) yra beveik dvigubai didesni nei 27° mentės posvyrio atveju. Taip pat

verta paminėti, kad slėgio reikšmės visais atvejais yra praktiškai vienodos ir ženkliai išsiskirti viena nuo kitos pradeda tik srautui aptekėjus maišymosi mentes, tai įrodo, kad būtent jos sukuria srauto pasipriešinimą, turbulizuoja srautą ir gerina šilumos atidavimą aušinančiam vandeniui, tačiau tuo pačiu ir didina slėgio nuostolius sistemoje.

Analogiškai rezultatai pateikiami ir slėgio, apskaičiuoto ant kuro strypo sienelės, atveju.

Šios reikšmės grafiškai atvaizduojamos 5.14 paveiksle.



5.14 pav. a) slėgio ant kuro elemento paviršiaus priklausomybės bei b) slėgio ant kuro elemento paviršiaus skirtumo priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad prie šiluminio elemento sienelės slėgio reikšmės labai nedaug skiriasi nuo sistemos centre išmatuotų slėgio reikšmių (kadangi vanduo beveik nespūdus niutoninis skystis, šį panašumą buvo galima nuspėti). Lyginant sistemos centre užfiksuotas slėgio reikšmes su kuro strypo paviršiuje apskaičiuotomis galima pastebėti tendenciją, kad didėjant mentelės posvyrio kampui slėgio kritimas per maišymosi mentes didėja tolydžiau, t.y. didėjant mentelės pasvirimo kampui proporcingai didėja ir slėgio nuostoliai. 30° mentelės posvyrio kampas sukelia didžiausią pasipriešinimą srautui tarp visų nagrinėtų atvejų.

Kadangi šiame skyriuje jau buvo aptarta iš grafinių rezultatų pastebėta greičio reikšmių kaita tarp 0° ir 30° mentelių posvyrio į ašinio srauto kryptį atvejų, šis hidraulinis parametras tiriamas tokiu pat būdu kaip ir slėgis.

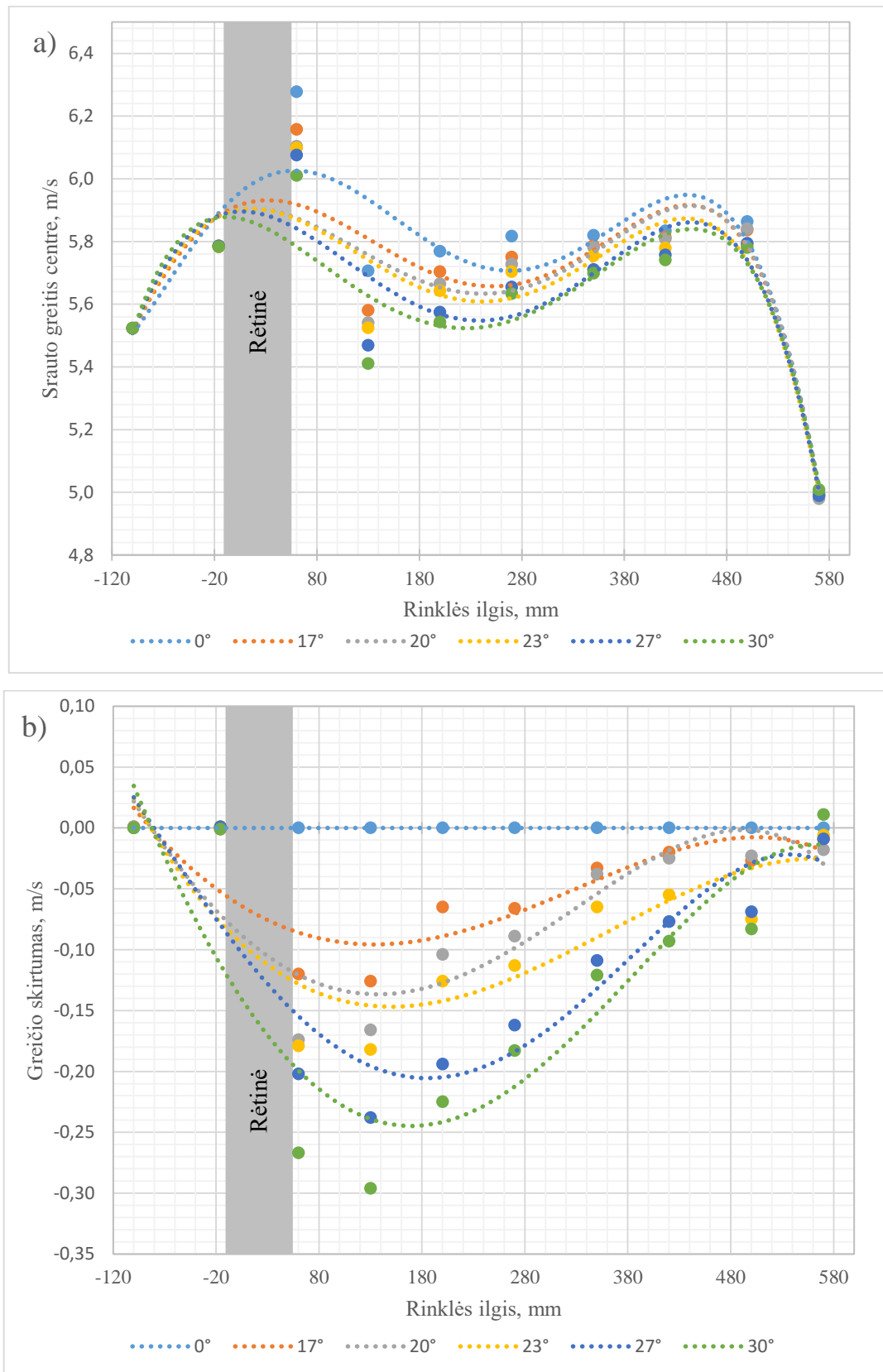
5.4 lentelė. Srauto greičio sistemos centre priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo

Srauto greitis sistemos centre, m/s						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	4,998	4,989	4,980	4,992	4,989	5,009
500	5,864	5,837	5,841	5,789	5,795	5,781
420	5,834	5,814	5,809	5,779	5,757	5,741
350	5,820	5,787	5,782	5,755	5,711	5,699
270	5,817	5,751	5,728	5,704	5,655	5,634
200	5,769	5,704	5,665	5,643	5,575	5,544
130	5,707	5,581	5,541	5,525	5,469	5,411
60	6,278	6,158	6,104	6,099	6,076	6,011
-16	5,785	5,784	5,785	5,786	5,786	5,784
-100	5,523	5,524	5,524	5,523	5,523	5,523

5.5 lentelė. Srauto greičio sistemos centre skirtumas tarp 0° ir visų kitų nagrinėtų mentelės pasvirimo kampų

Srauto greičio pokytis sistemos centre, m/s						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	0,000	-0,009	-0,018	-0,006	-0,009	0,011
500	0,000	-0,027	-0,023	-0,075	-0,069	-0,083
420	0,000	-0,020	-0,025	-0,055	-0,077	-0,093
350	0,000	-0,033	-0,038	-0,065	-0,109	-0,121
270	0,000	-0,066	-0,089	-0,113	-0,162	-0,183
200	0,000	-0,065	-0,104	-0,126	-0,194	-0,225
130	0,000	-0,126	-0,166	-0,182	-0,238	-0,296
60	0,000	-0,120	-0,174	-0,179	-0,202	-0,267
-16	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,001	-0,001
-100	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
Σ	0,000	-0,466	-0,636	-0,800	-1,059	-1,258

Šių parametų reikšmės atvaizduojamos 5.15 paveiksle.

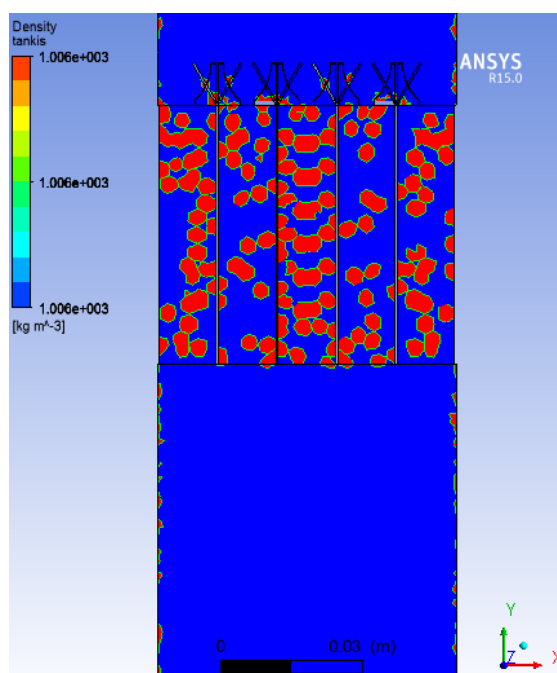


5.15 pav. a) srauto greičio bei b) srauto greičio pokyčio sistemos centre priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas

Pateikti rezultatai aprašo kelis hidraulinio vandens srauto tekėjimo kuro rinklėje ypatumus. Pirmasis, kurį galima matyti ir grafiniuose modeliavimo rezultatuose, yra srauto greičio didėjimas vandeniui įtekėjus į rėtinę, t.y. susiaurėjus pratekamojo kanalo skerspjūviui. Nepaisant to, kad srauto greitis pradiniame taške visais mentelės pasvirimo atvejais yra vienodas, jo reikšmės kuro kanalo centre pradeda skirtis nepasiekus maišymosi menčių, o iškart po įtekėjimo į rėtinę. Tai iš esmės galima paaiškinti spūdumu, t.y. srautui susiduriant su maišymosi mentelėmis srauto greitis sulėtėja, sudaromas savotiškas kamštis su didesnio tankio zonomis – tankiui padidėjus sumažėja srauto užimamas tūris bei srauto greitis. Vietinį tankio padidėjimą galima pavaizduoti grafiškai. Ši informacija pateikiama 5.16 paveiksle. Srauto greičiui kanalo skerspjūvio susiaurėjimo vietoje srautas papildomai turbulizuojamas, tai sukuria ir antrinio srauto sūkurius (tai galima matyti 5.10 paveiksle, žr. 0° atvejį). Sūkuriai sukuriama chaotiški, neturintys pastovumo, tačiau srauto greitis šiek tiek sumažėja, kadangi mikroskopiniu lygmeniu molekulės nelekia ašine kryptimi, o sukurdamos antrinį srautą kelioms akimirksmams keliauja skersai srauto krypties.

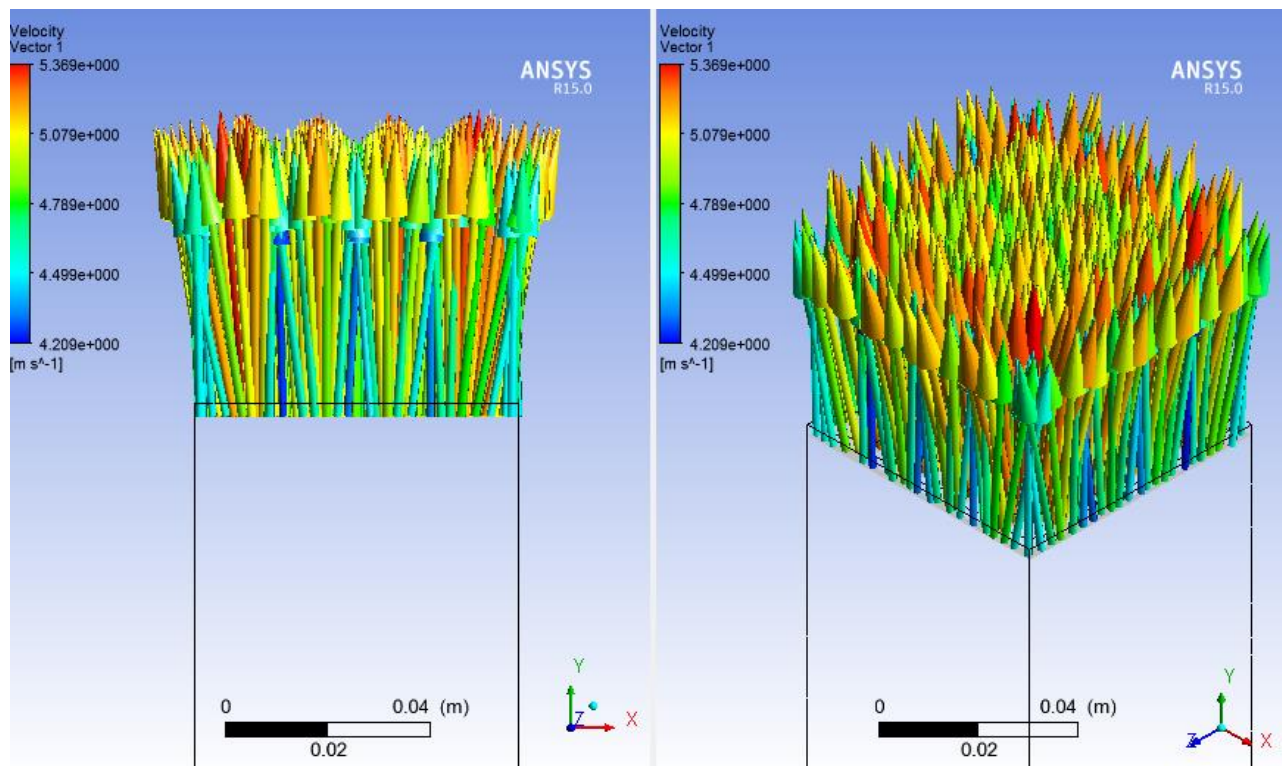
Didžiausias srauto pokytis skaitinio modeliavimo atveju fiksuojamas pirmoje atkarpoje po maišymosi menčių, t.y. didžiausio antrinio srauto zonoje. Šis greičio sumažėjimas, kaip aprašyta aukščiau, atsiranda dėl vietinio srauto krypties pokyčio bei antrinio srauto susidarymo. Maišymosi menčių sukeltiems sūkuriams nuslopus pastebimas srauto greičio atsistatymas į tolygią, nuo kuro mentelių nebeprisilaikančią tėkmę. Tai rodo apie mentelių poveikio zonos pabaigą. Iš pateiktų grafikų matyti, kad efektyvusis mentelių poveikio ruožas tęsiasi apie 440 milimetrų.

Paskutiniame skaitinio modelio taške srauto greitis dramatiškai krenta dėl skaičiavimuose panaudoto fizikinių proceso aprašymo – aplinkos slėgis aprašomas kaip atmosferinis (1 atm), ir tik pačios sistemos viduje srautas yra 155 bar slėgio. Kadangi ištekėjime iš sistemos staiga krenta



5.16 pav. Vietiniai tankio padidėjimo židiniai prieš menteles

slėgis, kuris šiuo atveju yra srauto varomoji jėga, srauto greitis krenta. Tai galima pamatyti 5.17 paveiksle – srauto vektoriai išėjime iš sistemos nukrypsta į šonus dėl atsiradusios laisvos erdvės.



5.17 pav. Srauto greičio vektoriai ištekėjime iš skaičiuojamojo modelio

Rezultatų palyginimui srauto greitis taip pat atvaizduojamas ir prie sienelės. Duomenys iš atlikto skaitinio modeliavimo pateikiami žemiau.

5.6 lentelė. Srauto greičio prie kuro elemento sienelės priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo

Srauto greitis prie kuro elemento sienelės, m/s						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	4,808	4,809	4,803	4,804	4,812	4,814
500	5,468	5,467	5,460	5,452	5,447	5,442
420	5,443	5,431	5,417	5,394	5,384	5,361
350	5,427	5,409	5,387	5,365	5,337	5,314
270	5,407	5,337	5,328	5,314	5,263	5,223
200	5,361	5,279	5,242	5,215	5,159	5,119
130	5,328	5,205	5,195	5,140	5,047	4,986
60	6,332	6,224	6,210	6,188	6,167	6,117
-16	5,412	5,413	5,410	5,414	5,412	5,411
-100	5,407	5,406	5,407	5,408	5,408	5,408

5.7 lentelė. Srauto greičio pokyčio prie kuro elemento sienelės priklausomybė nuo mentelės pasvirimo kampo

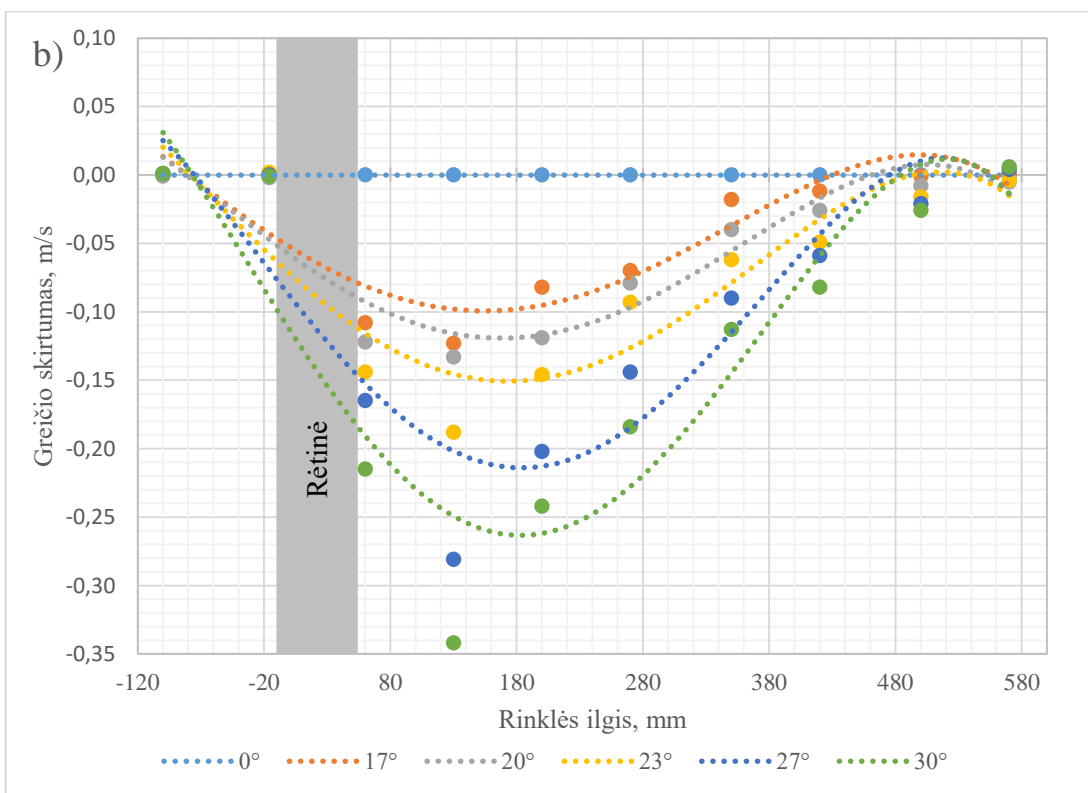
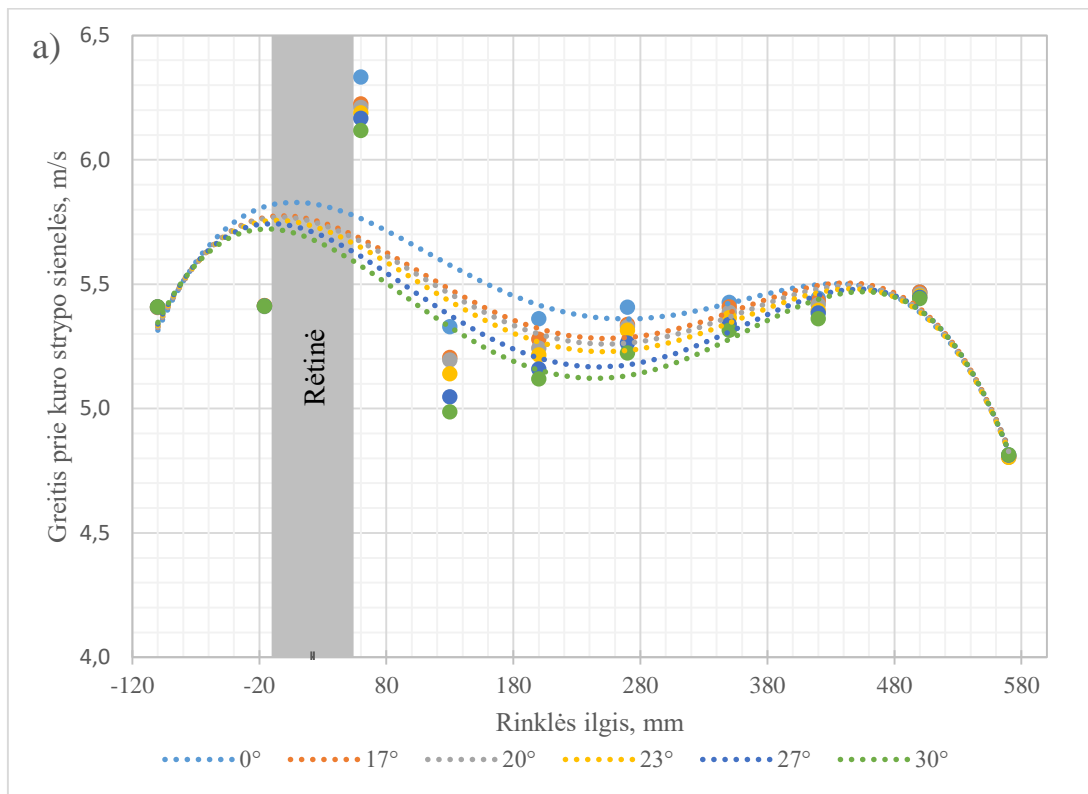
Srauto greičio pokytis prie kuro elemento sienelės, m/s						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	0,000	0,001	-0,005	-0,004	0,004	0,006
500	0,000	-0,001	-0,008	-0,016	-0,021	-0,026
420	0,000	-0,012	-0,026	-0,049	-0,059	-0,082
350	0,000	-0,018	-0,040	-0,062	-0,090	-0,113
270	0,000	-0,070	-0,079	-0,093	-0,144	-0,184
200	0,000	-0,082	-0,119	-0,146	-0,202	-0,242
130	0,000	-0,123	-0,133	-0,188	-0,281	-0,342
60	0,000	-0,108	-0,122	-0,144	-0,165	-0,215
-16	0,000	0,001	-0,002	0,002	0,000	-0,001
-100	0,000	0,000	-0,001	0,001	0,001	0,001
Σ	0,000	-0,412	-0,535	-0,699	-0,957	-1,198

Rezultatų grafinis atvaizdavimas pateiktas 5.18 paveiksle.

Iš pavaizduotų srauto greičio pokyčio reikšmių matoma, kad srauto greitis, kaip ir pratekamojo kanalo centre, mažėja vandens srautui įtekėjus į rėtinę. Didžiausias srauto greičio skirtumas lyginant skirtingų mentelių posvyrio kampų simuliaciją, kaip ir pratekamojo kanalo centre, yra sukuriamas naudojant 30° posvyrio kampą. Visi kiti srauto greičio parametrai bei ypatybės labai artimos sistemos centre stebėtiems srauto greičio režimams. Vienintelis pastebimas skirtumas – tai greičio reikšmės. Kaip ir galima tikėtis, srauto greitis prie kuro elemento sienelės yra mažesnis nei sistemos centre dėl pasienio sluoksnio reiškinį.

Srauto greitis prie sienelės, kaip ir anksčiau aprašytu atveju sistemos centre, normalizuojasi ir vertėmis susilygina su bet kurio kito mentelės posvyrio rezultatais (įskaitant ir 0° posvyrio kampą) – tai rodo apie maišymosi menčių įtakos srauto greičiui sumažėjimą. Efektyvusis srauto ruožas, kuriame maišymosi mentės dar sukuria antrinius sūkurius, yra apie 440 milimetrų.

Atlikus hidraulinių duomenų analizę, matyti, kad maišymosi mentės srautui sukuria vietinį slėgio pasipriešinimą bei ašinio greičio nuokrypius. Tai liudija apie srauto tekėjimo režimo pasikeitimą didėjant mentelės posvyriui į srauto kryptį. Toliau bus atliekama šiluminė skaičiuojamojo modelio analizė – kokią įtaką minėti hidrauliniai parametrai ir jų pokyčiai atlieka pagrindiniam šiame darbe vertinamam temperatūros parametru.



5.18 pav. a) srauto greičio bei b) srauto greičio pokyčio prie kuro elemento sienelės priklausomybės nuo mentelės pasvirimo kampo grafinis atvaizdavimas

5.4 Šiluminis skaičiuojamojo modelio tyrimas

Kaip ir hidraulinių parametų tyrimo atveju, vizualiai nustatyti apie realius temperatūros pokyčius iš 5.6 ir 5.8 paveikslų neįmanoma, todėl naudojamas skaitinis temperatūros parametro analizavimas. Temperatūros reikšmės pratekamojo kanalo centre pateikiamos žemiau.

5.8 lentelė. Vandens temperatūra sistemos centre.

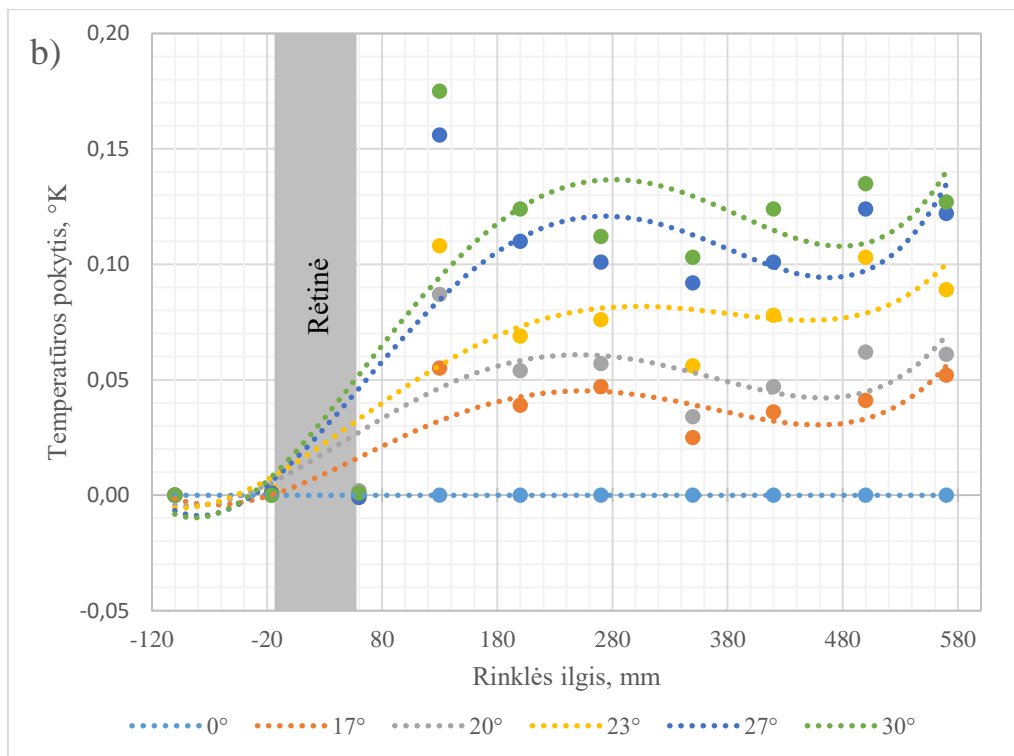
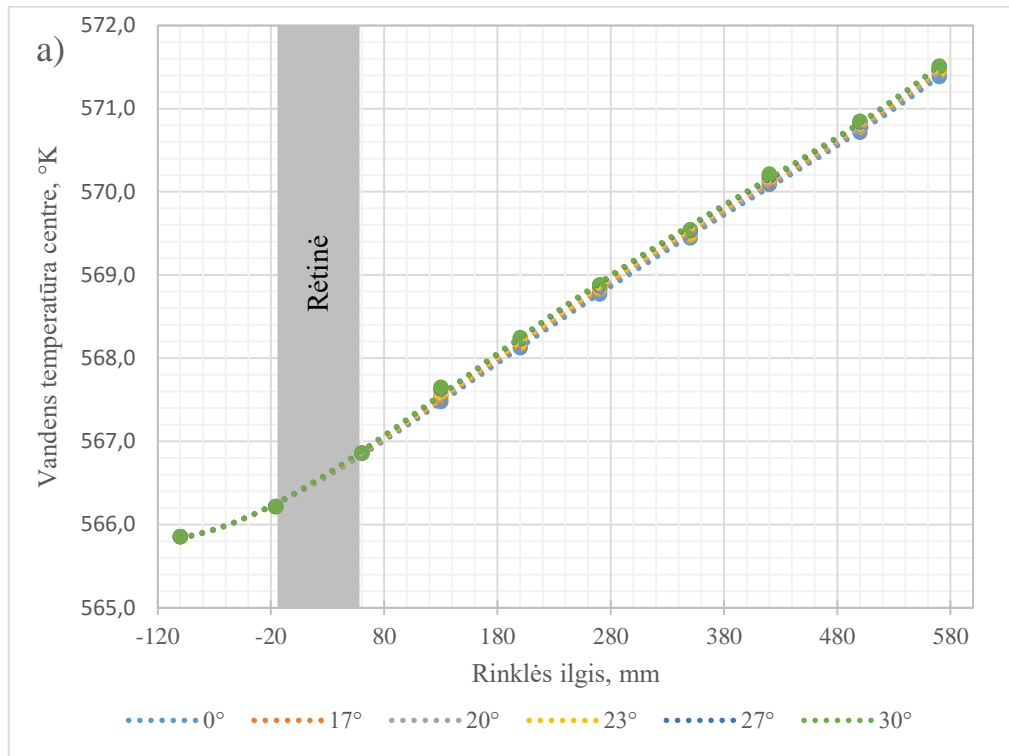
Temperatūra sistemos centre, °K						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	571,384	571,436	571,445	571,473	571,506	571,511
500	570,714	570,755	570,776	570,817	570,838	570,849
420	570,088	570,124	570,135	570,166	570,189	570,212
350	569,442	569,467	569,476	569,498	569,534	569,545
270	568,771	568,818	568,828	568,847	568,872	568,883
200	568,122	568,161	568,176	568,191	568,232	568,246
130	567,476	567,531	567,563	567,584	567,632	567,651
60	566,858	566,857	566,860	566,858	566,857	566,859
-16	566,214	566,215	566,215	566,216	566,215	566,214
-100	565,853	565,853	565,853	565,853	565,853	565,853

Atsižvelgiant į tai, kad temperatūros reikšmės labai nedaug skiriasi viena nuo kitos, naudojama temperatūros skirtumo palyginimo metodika, kuomet lyginamos 0° mentelės pasvirimo atveju apskaičiuotos reikšmės su visų kitų atvejų rezultatais individualiai.

5.9 lentelė. Temperatūros skirtumai sistemos centre, lyginant 0° atvejį su visais likusiais

Temperatūros skirtumas sistemos centre, °K						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	0,000	0,052	0,061	0,089	0,122	0,127
500	0,000	0,041	0,062	0,103	0,124	0,135
420	0,000	0,036	0,047	0,078	0,101	0,124
350	0,000	0,025	0,034	0,056	0,092	0,103
270	0,000	0,047	0,057	0,076	0,101	0,112
200	0,000	0,039	0,054	0,069	0,110	0,124
130	0,000	0,055	0,087	0,108	0,156	0,175
60	0,000	-0,001	0,002	0,000	-0,001	0,001
-16	0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	0,000
-100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ	0,000	0,295	0,405	0,581	0,806	0,901

Apskaičiuoti parametrai palyginami grafiniu būdu.



5.19 pav. a) temperatūra bei b) temperatūros pokytis sistemos centre

Pateikti skaitinio modeliavimo rezultatai rodo, kad maišymosi menčių sukuriama antrinis srautas bei sukuriama maišymaši gerinantys sūkuriai turi teigiamos įtakos temperatūriniam branduolinio reaktoriaus parametrams – temperatūra srauto centre didėja priklausomai nuo mentelės posvyrio į srauto kryptį kampui. Sukuriama temperatūros skirtumas didėja proporcingai mentelės posvyrio didėjimo kampui.

Srauto temperatūra nuo pat įtekėjimo į sistemą iki ištekėjimo iš rėtinės visais mentelės modeliavimo atvejais išlieka nepakitęs, t.y. pastovus. Kaip rodo rezultatai srauto temperatūra pradeda keistis tik srautui ištekėjus iš rėtinės bei pradėjus formuotis stabiliems maišymosi menčių sukuriams sūkuriam (antriniam srautui). Didžiausias temperatūros skirtumas tarp skirtingų mentelės posvyrio kampų simuliacijų pastebimas toje vietoje, kurioje hidraulinių parametų tyrimo dalyje pastebėtas didžiausias srauto greičio sumažėjimas - greičio sumažėjimo ruožai atitinka didžiausio efektyvumo šilumos atidavime proceso vietą skaičiuojamojo modelio ašinio ilgio atžvilgiu, t.y. aktyviausioje antrinio srauto dalyje. Tai patvirtina prielaidą, iškeltą srauto greičio verčių nagrinėjimo metu – ašinis srauto greitis krenta dėl antrinio srauto susidarymo, kuris šiuo atveju didina šilumos atidavimą nuo kuro elemento paviršiaus aušinančiam vandeniui.

Įdomumo dėlei bei visavertei gautų skaičiavimo rezultatų analizei tikslinga ištirti ir maišymosi mentelių sukuriamą efektą srauto temperatūrai prie pat šildančiųjų kuro strypų paviršiaus. Rezultatai pateikiami žemiau.

5.10 lentelė. Vandens temperatūra prie kuro elemento paviršiaus

Vandens temperatūra ant kuro elemento sienelės, °K						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	571,861	571,900	571,918	571,927	571,931	571,946
500	571,248	571,302	571,312	571,331	571,350	571,377
420	570,620	570,629	570,645	570,683	570,699	570,725
350	569,962	569,975	569,996	570,009	570,037	570,071
270	569,320	569,343	569,352	569,367	569,400	569,430
200	568,683	568,716	568,737	568,754	568,765	568,784
130	568,003	568,034	568,054	568,069	568,078	568,104
60	567,302	567,300	567,303	567,303	567,304	567,303
-16	566,647	566,645	566,646	566,648	566,648	566,649
-100	565,881	565,880	565,880	565,881	565,881	565,883

Analogiškai ankstesnėms hidraulinių parametų analizėms nagrinėjamas temperatūros skirtumas tarp skirtingų mentelės posvyrio kampų.

5.11 lentelė. Vandens temperatūros pokytis prie kuro elemento sienelės

Temperatūros skirtumas ant kuro elemento sienelės, °K						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
570	0,000	0,039	0,057	0,066	0,070	0,085
500	0,000	0,054	0,064	0,083	0,102	0,129
420	0,000	0,009	0,025	0,063	0,079	0,105

Temperatūros skirtumas ant kuro elemento sienelės, °K						
Ašinis atstumas X, mm	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
350	0,000	0,013	0,034	0,047	0,075	0,109
270	0,000	0,023	0,032	0,047	0,080	0,110
200	0,000	0,033	0,054	0,071	0,082	0,101
130	0,000	0,031	0,051	0,066	0,075	0,101
60	0,000	-0,002	0,001	0,001	0,002	0,001
-16	0,000	-0,002	-0,001	0,001	0,001	0,002
-100	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,002
Σ	0,000	0,197	0,316	0,445	0,566	0,745

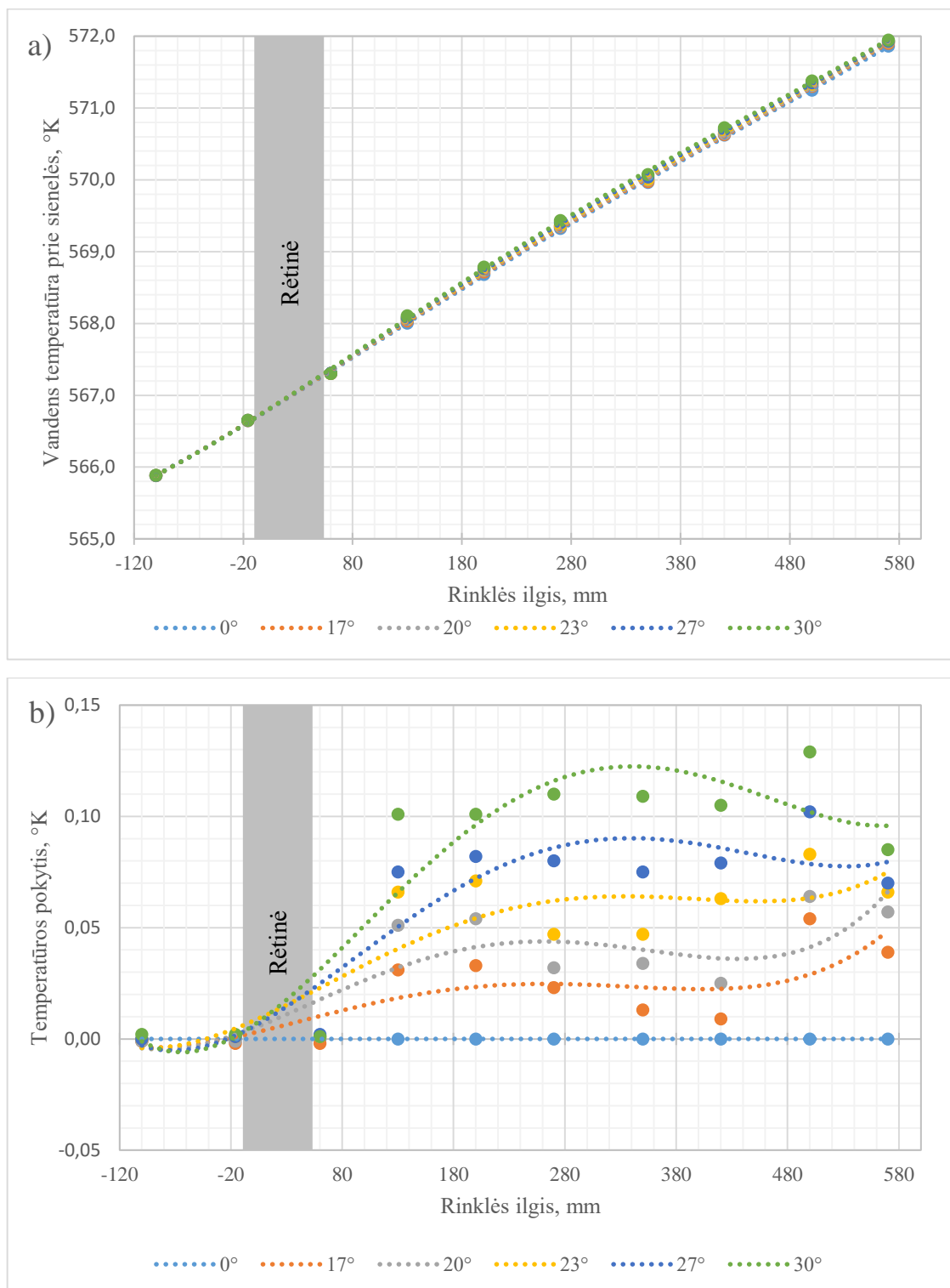
Temperatūros reikšmės prie šiluminio elemento sienelės bei jos skirtumas lyginant skirtingus mentelės posvyrius iliustruojamas grafiškai 5.20 paveiksle.

Atlikus šiluminę branduolinio reaktoriaus kuro elemento analizę skaitiniais metodais matoma, kad srauto temperatūra tiek sistemos pratekamojo kanalo viduryje, tiek prie šiluminio elemento sienelės kyla didėjant maišymosi mentelės posvyrio kampui bei tokiu būdu dirbtinai sukuriant didesnės turbulencijos zonas, kurios įgalina padidinti šilumos nuvedimą nuo šiluminių elementų paviršiaus.

Maišymosi mentelės yra nesudėtingas elementas, kurį įdiegti aktyviojoje zonoje esančiose kuro rinklėse galima be didesnių mechaninių ar finansinių problemų. Jų įdiegimas turi teigiamą įtaką reaktoriaus darbui - padidėjusi srauto temperatūra rodo, kad užtikrinamas geresnis branduolinio kuro strypų aušinimas (nuvedama daugiau šilumos), užtikrinamas tolygesnis temperatūrinis aušinančio vandens laukas, taip leidžiant užtikrinti stabilesnį greitųjų neutronų lėtinimą aktyviojoje zonoje. Padidėjusi temperatūra taip pat įgalina išgauti šiek tiek daugiau galios iš tokių patį aktyviosios zonos turį turinčio reaktoriaus. Lygiai taip pat modeliuojant naujo tipo reaktorių galima pasirinkti sumažinti aktyviają zoną bei bendrą reaktoriaus gabaritą nesumažinant reaktoriaus galios.

Maišymosi mentėms sukuriant antrinį srautą, tekantį skersai ašinio srauto krypties, didinamas srauto judėjimas tarp pratekamojo kanalo centro ir aušinančio vandens šalia kuro strypo sienelės. Susimaišius srautui didinamas šilumos atidavimo koeficientas, kadangi mažėja temperatūros skirtumas tarp kuro strypo apvalkalo bei jį aušinančio fluído. Sienelės aušinimą galima aprašyti Nuselto panašumo kriterijumi, kuris nusako visų šilumos mainų santykį su šiluma, perduota laidumu. Kad Nu kriterijus padidėtų, reikalinga arba padidinti šilumos atidavimą arba sumažinti šilumos laidumą ((5.1) formulė). Kadangi nagrinėjamoje sistemoje šilumos laidumas praktiškai nekinta, padidėjusi vandens temperatūra rodo apie šilumos mainų tarp šiluminio elemento sienelės bei aušinančio vandens suaktyvėjimą.

Proceso patikrinimui atliekamas Nu kriterijaus pagal (5.1) formulę apskaičiavimas vidutinėms skaitinio tyrimo metu apskaičiuotoms temperatūros reikšmėms. Kuro strypo apvaskalo sienelės temperatūra priimama 600 °K.



5.20 a) temperatūra bei b) temperatūros pokytis prie kuro elemento sienelės

$$Nu_{vid} = \frac{\bar{\alpha} D_h}{\bar{k}} = \frac{q}{\left(\frac{\bar{T}_{SIEL} - \bar{T}_{vandens}}{\bar{k}} \right) \cdot D_h} \quad (5.3)$$

Hidraulinis diametras D_h apskaičiuojamas pagal (5.4) formulę:

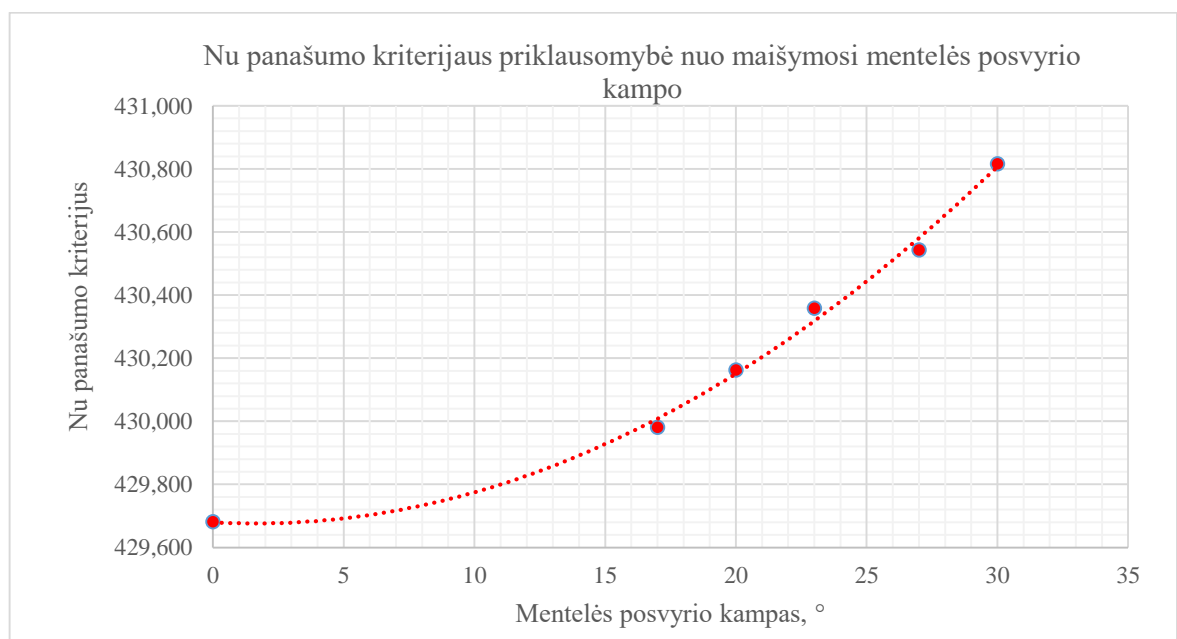
$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4 \cdot (S_{ak} - S_{str})}{P_{ak} - P_{str}}; \text{ m} \quad (5.4)$$

čia S_{ak} – vienos akutės rėtinėje skerspjūvio plotas, m^2 ; S_{str} – kuro strypo skerspjūvio plotas, m^2 ; P_{ak} – vienos akutės drėkinamo paviršiaus perimetras, m; P_{str} – kuro strypo išorinis drėkinamo paviršiaus perimetras, m.

Nu kriterijaus apskaičiuotos reikšmės pateikiamos 5.12 lentelėje.

5.12 lentelė. Vidutiniai šiluminiai skaitinio tyrimo rezultatai.

Vidutiniai srauto parametrai	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
Kuro strypo sienelės temperatūra, °K	600	600	600	600	600	600
Vidutinė aušinančio vandens temperatūra, °K	568,953	568,972	568,984	568,997	569,009	569,027
Temperatūros skirtumas, °K	31,047	31,028	31,016	31,003	30,991	30,973
Hidraulinis diametras, m	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Šiluminis srautas, W/m^2	612,867	612,867	612,867	612,867	612,867	612,867
Vandens šiluminis laidumas, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570	0,570
Nu kriterijus	429,682	429,981	430,163	430,359	430,544	430,817



5.21 pav. Nu kriterijaus priklausomybė nuo mentelės posvyrio kampo

Iš pateiktų duomenų matoma, kad Nu kriterijus padidėjo. Tai liudija apie padidėjusį šilumos atidavimo koeficientą bei intensyvesnius šilumos mainus.

5.5 Skaitinio tyrimo rezultatų įtakos vertinimas reaktoriaus ekonomikai

Šiluminių bei hidraulinių parametrų analizė parodė, kad didėjantis maišymosi mentelės posvyrio kampas leidžia padidinti šiluminį reaktoriaus efektyvumą, tačiau taip pat ir sukuria papildomą srauto pasipriešinimą bei padidina slėgio nuostolius.

Šiluminis maišymosi mentelių posvyrio kampo padidinimo efektas aprašytas ir įrodytas aukščiau. Siekiant palyginti kokį reaktoriaus galios prieaugį galima generuoti atliekamas ekonominis naudos skaičiavimas.

Šiluminiam efektyvumui įvertinti paprastumo dėlei priimamos tokios prielaidos:

1. Atliekant tyrimą naudotas 0,67 m ilgio geometrinis modelis. Apskaičiuotas temperatūros prieaugis per sistemą vidutiniškai yra apie 6 °K. Realus Westinghouse reaktoriaus kuro rinklės aukštis - 3,66 m. Laikoma, kad įdiegus maišymosi menteles temperatūros prieaugis per reaktorių bus proporcingas padidėjusiam ilgiui, t.y. $\frac{3,66}{0,67} \approx 5,5$ karto didesnis.
2. Vandens debitas per aktyviają zoną išlieka nepasikeitęs;
3. Elektros energijos generavimo efektyvumas – 30%;
4. 1 MWh elektros energijos kainuoja 218 € (pagal 2015 metų Eurostat duomenis vidutinė elektros kaina Europos Sąjungoje);
5. Branduolinė jėgainė per metus dirba 7500 valandų.

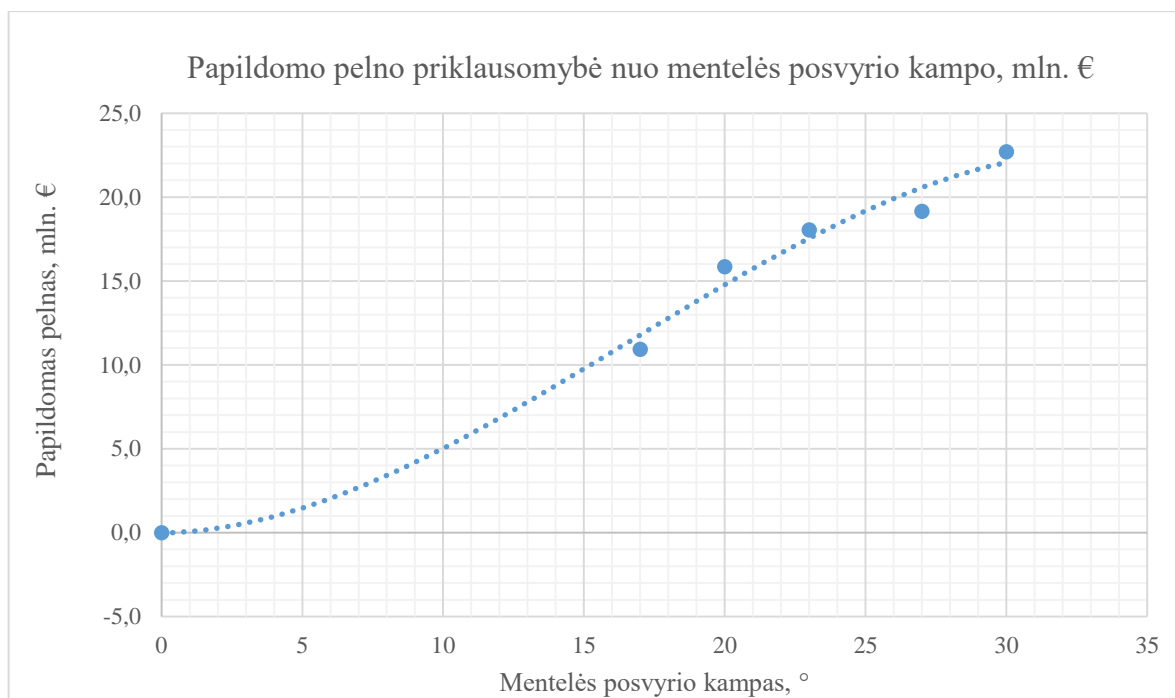
Apskaičiuojami reaktoriaus aktyviosios zonos šiluminiai parametrai, apskaičiuojamas generuojamos elektros energijos pagaminimas bei potenciali pridėtinė finansinė maišymosi mentelių vertė. Pagal (4.14) formulę apskaičiuojami reaktoriaus šiluminiai parametrai. Rezultatai pateikiami 5.13 lentelėje.

5.13 lentelė. Šiluminių skaitinio modeliavimo parametrų ekonominis vertinimas

Šiluminiai bei ekonominiai rodikliai	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
Vidutinis T prieaugis, °K	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1
Temperatūros prieaugio daugiklis	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Teorinis aušinimo vandens temperatūros prieaugis per reaktoriaus aktyviają zoną, °K	32,7	32,9	33,0	33,0	33,0	33,1
Vandens srautas per aktyviają zoną, kg/s	24 668,0	24 668,0	24 668,0	24 668,0	24 668,0	24 668,0

Šiluminiai bei ekonominiai rodikliai	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
Reaktoriaus šilumnešio savitoji šiluma, kJ/(kg·K)	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Elektrinis jėgainės efektyvumas, %	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Apskaičiuotas teorinis reaktoriaus galingumas, MW	3 334,5	3 356,8	3 366,8	3 371,3	3 373,5	3 380,8
Apskaičiuotas teorinis elektrinis jėgainės galingumas, MW	1 000,3	1 007,0	1 010,0	1 011,4	1 012,1	1 014,2
Metinis darbo laikas, val	7 500,0	7 500,0	7 500,0	7 500,0	7 500,0	7 500,0
Pagamintos elektros energijos kiekis, mln. MWh	7, 502	7,552	7,575	7,585	7,590	7,606
Elektros energijos kaina, €/MWh	218,0	218,0	218,0	218,0	218,0	218,0
Generuojamas elektros energijos gamybos pelnas, mln. €	1 635,6	1 646,5	1 651,4	1 653,6	1 654,7	1 658,3

Apskaičiuotos vertės rodo apie elektros gamybos prieaugį per metus. Lyginant 0° mentelės posvyrio kampo rezultata su visais kitais skaitinio modeliavimo atvejais, nubraižomas 5.22 paveikslas.



5.22 pav. Šiluminių parametru įtaka finansinei branduolinės jėgainės pusei

Skaitinis modeliavimas šiame darbe atskleidė teigiamą šiluminių kuro elementų skaitinio tyrimo naudą didinant maišymosi mentelių posvyrio kampą, tačiau hidraulinis tyrimas parodė, kad padidinus maišymosi menčių pasvirimo kampą padidėja kuro elemento hidraulinis pasipriešinimas, kuriam nugalėti yra reikalinga didesnė reaktoriaus aušinimo siurblių galia.

Kadangi tiksliai apskaičiuoti ekonominę dalį žinant tik vienos iš daugelio visos aušinimo sistemos dalių hidraulinių pasipriešinimą yra neįmanoma, priimamos prielaidos, leidžiančios apytiksliai įvertinti nuostolius, patiriamus dėl padidėjusio hidraulinio pasipriešinimo:

1. Reaktoriaus aušinimo siurblio parametrai – 5.220 kW, išvystomas slėgis – 93 m.v.st, išvystomas debitas – 90.000 m³/h [11]. Tokių siurblių nagrinėjamoje atominėje jėgainėje – 4 vnt;
2. Visas išvystomas siurblio slėgis yra sunaudojamas hidrauliniams aušinimo sistemos hidrauliniams pasipriešinimui nugalėti;
3. Atliekant tyrimą naudotas 0,67 m ilgio geometrinis modelis. Realus Westinghouse reaktoriaus kuro rinklės aukštis - 3,66 m. Laikoma, kad įdiegus maišymosi menteles slėgio nuostoliai bus proporcingi padidėjusiam ilgiui, t.y. $\frac{3,66}{0,67} \approx 5,5$ karto didesni.

Siurblio variklio galią galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$P = q \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \eta; \text{ kW} \quad (5.5)$$

čia: P – siurblio galia, kW, q – siurbiamas srautas, m³/h, ρ – vandens tankis, kg/m³, g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s², h – išvystomas slėgis, m.v.st., η – siurblio naudingojo veikimo koeficientas.

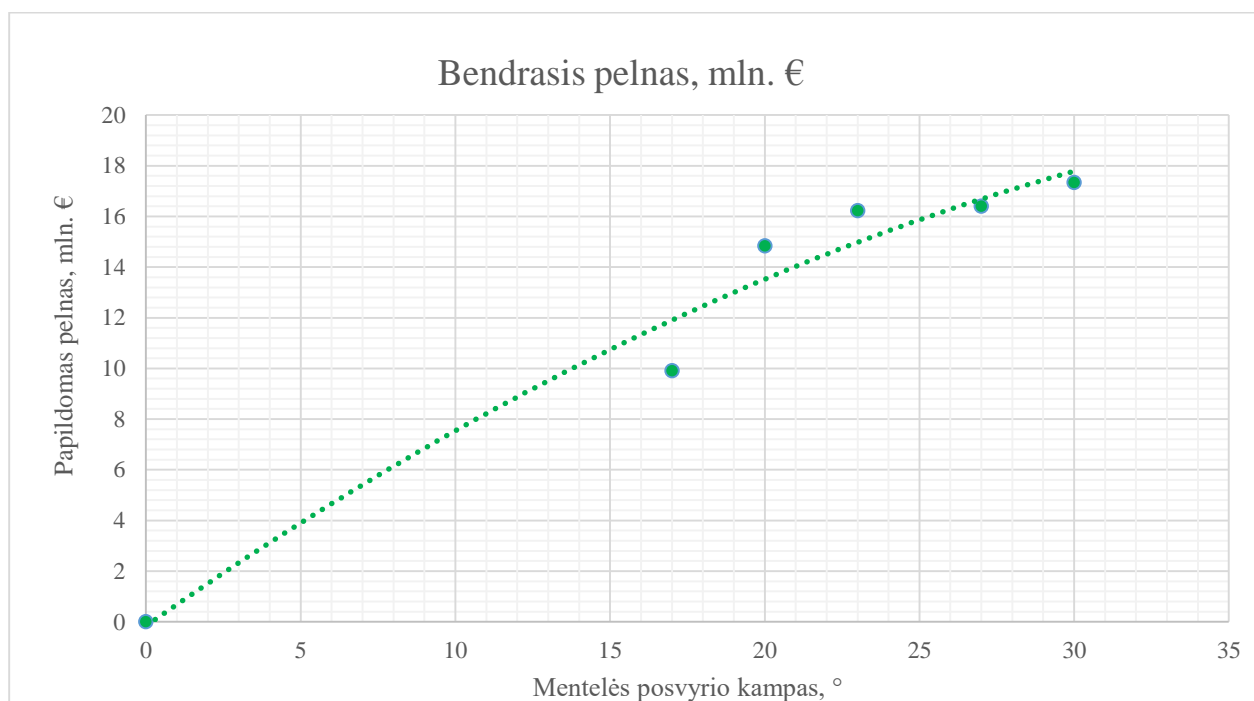
Įvertinus tai, kad siurblio galios apskaičiavimo formulėje kinta tik vienas – išvystomo slėgio – kintamasis, reikalingą siurblio galios prieaugį galima apskaičiuoti proporcingai paprasčiausiai įvertinant kiek kartų padidės slėgio nuostoliai modeliuojamoje sistemoje. Reikalingos siurblio galios padidėjimo ir ekonominių praradimų skaičiavimai pateikiami žemiau

5.14 lentelė. Hidraulinių parametų ekonominio įvertinimo rodikliai

Hidrauliniai bei ekonominiai rodikliai	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
Hidraulinis tirtos sistemos pasipriešinimas, bar	0,299	0,308	0,308	0,315	0,323	0,346
Hidraulinio pasipriešinimo daugiklis	5,460	5,460	5,460	5,460	5,460	5,460
Teorinis aktyviosios zonos su maišymosi mentėmis hidraulinis pasipriešinimas, bar	1,633	1,682	1,682	1,720	1,764	1,889
Slėgio padidėjimo daugiklis	1,000	1,030	1,030	1,054	1,080	1,157
Esamų siurblių bendras instaliuotas galingumas, kW	20 880,0	20 880,0	20 880,0	20 880,0	20 880,0	20 880,0

Hidrauliniai bei ekonominiai rodikliai	Mentelės pasvirimo kampas					
	0°	17°	20°	23°	27°	30°
Reikalinga siurblių galia nugalėti papildomą hidraulinį pasipriešinimą, kW	20 880,0	21 508,5	21 508,5	21 997,3	22 556,0	24 162,1
Teorinis papildomos galios prieaugis siurbliui, kW	0,000	628,495	628,495	1 117,324	1 675,987	3 282,140
Metinis darbo laikas, val	7 500	7 500	7 500	7 500	7 500	7 500
Elektros energijos kaina, €/kWh	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218	0,218
Papildomos elektros energijos išlaidos, mln. €	0,000	1,028	1,028	1,827	2,740	5,366

Apskaičiavus tiek šiluminių, tiek hidraulinių parametų įtaką reaktoriaus aktyviosios zonos parametrams bei kitiems aktualiems įrenginiams, nustatytos uždirbamos bei prarandamos finansinės sumos:



5.23 pav. Atlikto skaitinio tyrimo finansinės įtakos įvertinimas

Įvertinus visus turimus modeliavimo duomenis galima priimti išvadą, kad maišymosi mentelių įdiegimas reaktoriaus aktyviojoje zonoje yra teisingas ir atsiperkantis sprendimas, galintis per metus jėgainės operatoriui gauti apie 18 mln. € papildomų pajamų. Rekomenduojama į rėtinę diegti 30° kampu pasvirusias maišymosi menteles optimaliausiam šiluminiam, hidrauliniam bei finansiniam rezultatui pasiekti.

6. IŠVADOS

Elektros energijai tapus pačia svarbiausia energijos rūšimi efektyvus jos panaudojimas tapo kasdieniu iššūkiu šios srities inžinieriams. Suslėgto vandens reaktoriaus veiklos analizė bei nuolatinis tobulinimas yra būtina sąlyga konkurencingai tolimesnei šių reaktorių raidai elektros energijos sektoriuje. Šiame darbe atliktas branduolinio kuro elemento skaitinis tyrimas parodė, kad modifikuojant kuro rinklės rėtinės formą galima padidinti suslėgto vandens reaktoriaus efektyvumą. Apibendrinant darbo rezultatus galima daryti išvadas:

1. Didinant maišymosi menčių pasvirimo kampą sraute užfiksuoti didėjantys slėgio nuostoliai. Naudojant 30° pasvirimo maišymosi mentes patiriami iki 0,2 % didesni slėgio nuostoliai, lyginant su kuro elementu, kuriame nėra naudojamos maišymosi mentelės (posvyrio kampas lygus nuliui).
2. Srauto greitis išilgai skaičiuojamojo modelio kinta. Nustatytos greičio didėjimo bei mažėjimo sritys, kuriose užfiksuojamas greičio reikšmių pokytis, lyginant skirtingas kuro elemento konfigūracijas, siekia iki 5 %. Kuo didesnis mentelės pasvirimo kampas, tuo didesnė greičių skirtumo reikšmė.
3. Vietose, kuriose greičio pokytis didžiausias, susiformuoja antrinis srautas. Antrinis srautas didėja didėjant maišymosi mentės posvyrio kampui ir ryškiausiai pastebimas aplink maišymosi menteles.
4. Didinant maišymosi mentelės posvyrio kampą aušinančio vandens temperatūra didėja. Lyginant 0° bei 30° mentelių pasvirimo kampus pasiekiamas iki 0,135 °K, arba 0,02% aušinančio vandens temperatūros padidėjimas.
5. Nustatyta, kad antrinis srautas, susidarantis apie maišymosi menteles, padidina šilumos atidavimo koeficientą. Antrinio srauto susidarymo zonose šilumos mainai tarp kuro elemento sienelės bei aušinančio vandens padidėja iki 0,26%.
6. Šiame darbe apskaičiuota, kad padidėję slėgio nuostoliai per metus dėl padidėjusių elektros energijos išlaidų siekia apie 5,4 mln. €, tačiau padidėjusi aušinančio vandens temperatūra, įgalinti šiek tiek padidinti reaktoriaus gaminamo garo našumą, papildomai per metus generuoja apie 22,7 mln. € pajamų. Įdiegus 30° maišymosi menteles per metus dėl efektyviau veikiančio reaktoriaus galimai uždirbama 17,335 mln. €.
7. Visapusiškai efektyviausia bei naudingiausia kuro rinklėse yra naudoti 30° posvyrio kampo maišymosi menteles.

7. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Westinghouse Electric Corporation, The Westinghouse pressurized water reactor nuclear power plant. 1984 m, Water reactor division, 245 p.
2. Pasaulyje veikiančios branduoliniai reaktoriai, Prieiga per internetą: <http://www.nei.org/Knowledge-Center/Nuclear-Statistics/World-Statistics/World-Nuclear-Power-Plants-in-Operation> (žiūrėta 2016 m. kovo mėn. 21 d.)
3. Tarptautinė elektros energijos gamybos statistika, Prieiga per internetą: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=alltypes&aid=12&cid=ww,&syid=2012&eyid=2012&unit=BKWH>, (paskutinį kartą žiūrėta 2016 m. kovo mėn. 21 d.)
4. U. Sandberg, Sizewell B/C. Advanced first time core loading design. 1995 m. British nuclear energy society. 7 p.
5. M. E. Conner, Elvis E. Dominguez-Ontiveros, Yassin A. Hassan. Hydraulic Benchmark Data for PWR Mixing Vane Grid. 2011 m. The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics. 15p.
6. Moysés A. Navarro I and André A. C. Santos. Numerical evaluation of flow through a 5x5 PWR rod bundle: effect of the vane arrangement in a spacer grid. 2009 m. International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009. 13 p.
7. Jacopo Buongiorno. PWR Description. 2015m. MIT open courseware. 33 p.
8. W. Weihermilfer, C. S. Allison. LWR nuclear fuel bundle data for use in fuel bundle handling. 1979 m. Pacific Northwest laboratory. 46 p.
9. Ikeda, K., Makino, Y., Hoshi, M. Single-phase CFD applicability for estimating fluid hot-spot locations in a 5 x 5 fuel rod bundle. 2006. Nuclear Engineering and Design, vol. 236. 5 p.
10. Alfredo Abe, Claudia Giovedi, Daniel de Souza Gomes, Antonio Teixeira e Silva. Revisiting stainless steel as PWR fuel rod cladding after Fukushima Daiichi accident. 2014. Journal of Energy and Power Engineering, 8 p.
11. David M. Kitch. Pump selection and application in a pressurised water reactor electric generating plant. Second international pump symposium, 11 p.
12. W.B. Weihermiller, G.S. Allison. LWR nuclear fuel bundle data for use in fuel bundle handling. 1979. Battelle. 46 p.
13. Keiji Miyazaki. An experimental investigation on grid spacer effect on post-DNB heat transfer. 1999. 7th International conference of Nuclear Engineering, 9 p.
14. Igor L. Pioro, Romney B. Duffey. Experimental heat transfer in supercritical water flowing inside channels (survey). 2005. Nuclear engineering and design. 24 p.