



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

Augustas Čepelė

**TERMOHIDRAULINIŲ PROCESŲ TYRIMAS BRANDUOLINIO
REAKTORIAUS AKTYVIOJOJE ZONOJE ANSYS PROGRAMŲ
PAKETO APLINKOJE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Prof Eugenijus Ušpuras

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Doc. Egidijus Puida

**TERMOHIDRAULINIŲ PROCESŲ TYRIMAS BRANDUOLINIO
REAKTORIAUS AKTYVIOJOJE ZONOJE ANSYS PROGRAMŲ
PAKETO APLINKOJE**

Baigiamasis magistro projektas
Branduolinė energetika (kodas 621E32001)M

Vadovas
Prof. Eugenijus Ušpuras

Recenzentas
Doc. Algimantas Balčius

Projektą atliko
Augustas Čepelė

KAUNAS, 2015

**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 **Termohidraulinių procesų tyrimas branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje ANSYS programų paketo aplinkoje.**

Study of thermal-hydraulic processes in nuclear reactor active zone using ANSYS software.

Patvirtinta 2015 ... m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr.

2. Darbo tikslas **Ištirti termohidraulinius procesus vykstančius reaktoriaus aktyviojoje zonoje.**

3. Darbo struktūra **Pasirinkto reaktoriaus aktyviosios zonos technologiniai sprendiniai ir detali reaktoriaus kuro rinklės ir valdymo kryžiaus analizė, aktyviosios zonos modeliavimo CFD programų paketais praktika; aktyviosios zonos elementų ANSYS aplinkoje modelis; termohidraulinių procesų tyrimas keturių kuro rinklių sistemoje; išvados ir rekomendacijos.**

4. Reikalavimai ir sąlygos

Ruošiant darbą vadovautis baigiamųjų darbų rengimo reikalavimais.

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2015 . m. birželio mėn. 01 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui..... Augustui Čepelei

Užduotį gavau.....**Augustas Čepelė**.....2013-02-14
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas.....**prof. Eugenijus Ušpuras**.....2013-02-14
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

Augustas Čepelė

(Studento vardas, pavardė)

Branduolinė energetika (kodas 621E32001)M

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Termohidraulinių procesų tyrimas branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje ANSYS programų paketo aplinkoje.“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2015 m. birželio mėn. 03 d.

Patvirtinu, kad mano **Augusto Čepelės** baigiamasis projektas tema „**Termohidraulinių procesų tyrimas branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje ANSYS programų paketo aplinkoje**“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Čepelė, A. Study of thermal-hydraulic processes in nuclear reactor active zone using ANSYS software. Master's work / supervisor prof. Eugenijus Ušpuras; Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Thermal and Nuclear Energy. Kaunas, 2015. 59 psl.

SUMMARY

In this work study of thermal-hydraulic processes in nuclear reactor active zone using ANSYS software were made. Main goal of this work is to analyze thermal dynamics processes which occur in the reactors active zone. To achieve this goal following main task needs to be reached:

1. Analyze main parts of advanced boiling water reactor ABWR;
2. Analyze futures of ANSYS program package and capabilities of ANSYS FLUENT program package;
3. Conclude research model, create its geometry, mesh and define boundary conditions;
4. Perform calculations and analyze results;

In the beginning of this work it is reviewed evolution of nuclear power plant with advanced boiling water reactor, main parameters, advantages and disadvantages i.e. analyzing principle flow diagram of nuclear power plant with advanced boiling water reactor, advantages of reactors containment and its evolution. For pressure vessel of ABWR reactor improvements were also made – most of the housing parts (nearly 1,000 tons weight) been minted from a single work piece and external circulation pump were refused to use. These two major improvements enabled for constructors significantly to increase reactors safety levels and reduce probability of loss of coolant accidents (LOCA).

There are also analyzed in more detail ABWR reactors design features - analyzed the reactor internal pumps, steam separator and steam dryer, the layout of the fuel assemblies in the reactor core and the architecture of fuel assemblies GE14.

Not less attention is paid to review futures of the ANSYS software package and to conclude the research model. Model compiling includes three major parts – the creation of model geometry, computational mesh creation and the most important part - describing of boundary conditions.

In the third chapter of this work “Futures of ANSYS program package” is analyzed possibilities and specifics of main tool of this work – ANSYS FLUENT. ANSYS FLUENT is just a part of ANSYS program package family. ANSYS is also able to analyze electronic, structural changes, multi physics problems and systems issues.

When literature is analyzed and tool is selected, the research model is concluding. As a research model four bundle fuel module (cell) was chosen. Because of large and complicated geometry few simplifications must be done:

1. Lifting handle, spacers, upper and lower tie plates were removed;
2. Central water rods were replaced by hollow rods;
3. Fuel rods are modeled as simple solid cylinders without holders and pins.

When the research model is ready mesh was generated and boundary conditions were set. Key assumptions were that the nuclear reactor is stopped and only the residual heat is released for which drain is necessary to maintain sufficient coolant flow.

After all calculations and results analysis were done, it was noticed that calculated flow rate is sufficient to maintain removal of residual heat form nuclear reactor.

TURINYS

ĮVADAS.....	11
1 DARBO TIKLSAS IR UŽDAVINIAI.....	13
2 PAŽANGUSIS VERDANČIO VANDENS REAKTORIUS.....	14
2.1 ABWR reaktoriaus konstrukcijos ypatybės.....	16
2.2 ABWR reaktoriaus kuro rinklės ypatumai.....	23
3 ANSYS PROGRAMŲ PAKETO YPATYBĖS.....	28
3.1 FLUENT programinės įrangos apžvalga.....	29
4 TIRIAMOJO MODELIO SUDARYMAS.....	37
4.1 Modelio geometrija ir supaprastinimai.....	37
4.2 Tinklelio sudarymas.....	41
4.3 Kraštinės sąlygos.....	42
5 MODELIAVIMAS IR REZULTATAI.....	45
6 IŠVADOS.....	50
7 LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	51
8 PRIEDAI.....	52
8.1 A PRIEDAS. Publikacijų kopijos.....	52
8.1.1 A. Čepelė Branduolinio reaktoriaus aktyviosios zonos termohidraulinių procesų modelis ANSYS Fluent programų paketo aplinkoje.....	52

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pirmasis branduolinis reaktorius CP-1 [14].....	10
2.1 pav. Branduolinės jėgainės su ABWR reaktoriumi vizualizacija [1].....	14
2.2 pav. GE BWR reaktorių evoliucija [1].....	16
2.3 pav. Principinė branduolinės jėgainės su ABWR reaktoriumi srautų diagrama [1].....	16
2.4 pav. BWR reaktorių apsauginio kevalo evoliucija [1].....	18
2.5 pav. ABWR branduolinis reaktorius [1].....	20
2.6 pav. BWR reaktorių aušinimo sistemos evoliucija [1].....	21
2.7 pav. ABWR vidinio siurblio skersinis pjūvis [1].....	22
2.8 pav. Garo separatoriaus, garo džiovintuvo ir schematinis cirkuliacijos vaizdas [1].....	23
2.9 pav. ABWR reaktoriaus aktyviosios zonos konfigūracija [1].....	24
2.10 pav. Keturių kuro rinklių modulis su valdymo kryžiumi [1].....	24
2.11 pav. ABWR kuro rinklės ir atskiro ŠIEL' o sandara [1,5].....	25
2.12 pav. ABWR ŠIEL' o tvirtinimas [1].....	26
2.13 pav. AGR, VVER 1000 ir RBMK reaktorių šiluminių elementų rinklės [6].....	27
3.1 pav. ANSYS programų paketų įvairovė ir pajėgumai [7].....	28
3.2 pav. Serijinė ANSYS FLUENT architektūra [9].....	33
3.3 pav. Lygiagreti ANSYS FLUENT architektūra [9].....	34
3.4 pav. Tinklelio celių tipai [9].....	35
4.1 pav. Kuro modulio ir valdymo kryžiaus 3D vaizdas.....	37
4.2 pav. Kuro rinklės supaprastinimai.....	38
4.3 pav. Dalinio ir pilno ilgio ŠIEL' ū išsidėstymas.....	40
4.4 pav. „Ertmės“ sudarymo pavyzdys.....	40
4.5 pav. Modelio sudalinimas į atskiras dalis.....	41
4.6 pav. ½ -ios kuro modulio tinklelio vaizdas iš viršaus.....	41
4.7 pav. 1-o modelio dalies tinklelio 3D vaizdas.....	42
5.1 pav. Šilumnešio temperatūros kitimas per visą modelio aukštį.....	45
5.2 pav. Greičio profilis pirmos modelio dalies išilginiame ir išėjimo pjūviuose.....	46
5.3 pav. Temperatūros pasiskirstymas pirmos modelio dalies tūryje ir išėjimo pjūvyje.....	47
5.4 pav. Temperatūros pasiskirstymas antros modelio dalies tūryje ir pjūvyje per viduriniame skersiniame pjūvyje.....	47
5.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas trečios modelio dalies tūryje ir išilginiame pjūvyje.....	48
5.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas ketvirtos modelio dalies tūryje ir išėjimo pjūvyje.....	48
5.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas penktojoje modelio dalies tūryje ir išėjimo pjūvyje.....	49
5.8 pav. Greičio profilis penktosios modelio dalies išilginiame pjūvyje.....	49

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė Pagrindiniai ABWR ir BWR branduolinių reaktorių parametrai [2]	14
4.1 lentelė Pagrindinės modelio charakteristikos [1,11].....	39
4.2 lentelė Likutinės šilumos ir debito skaičiavimo tarpiniai rezultatai	43
5.1 lentelė Įtekančio ir ištekančio šilumnešio temperatūros	46

SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

ABWR – Pažangusis verdančio vandens reaktorius (angl. advanced boiling water reactor)

AGR – pažangusis dujomis aušinamas reaktorius (angl. Advanced gas-cooled reactor)

AZAAS – aktyviosios zonos avarinio aušinimo sistema

BWR – verdančio vandens reaktorius (angl. boiling water reactor)

CANDU – Kanados deuterio urano reaktorius (angl. CANada Deuterium Uranium)

CFD – skaičiuojamosios fluidų dinamikos (angl. computable fluid Dynamics)

ECCS – avarinė šerdies aušinimo sistema (angl. emergency core cooling system)

GE – General electric

JAV – Jungtinės Amerikos valstijos

LPRM – lokalinės galios stebėjimo rinklės (angl. Local Power Range Monitors)

PWR – suslėgto vandens reaktorius (angl. pressurized water reactor)

RAZIS – reaktoriaus aktyviosios zonos izoliavimo aušinimo sistema

RBMK – didelės galios kanalinis reaktorius

RIP – reaktoriaus vidiniai siurbliai (angl. reactor internal pump)

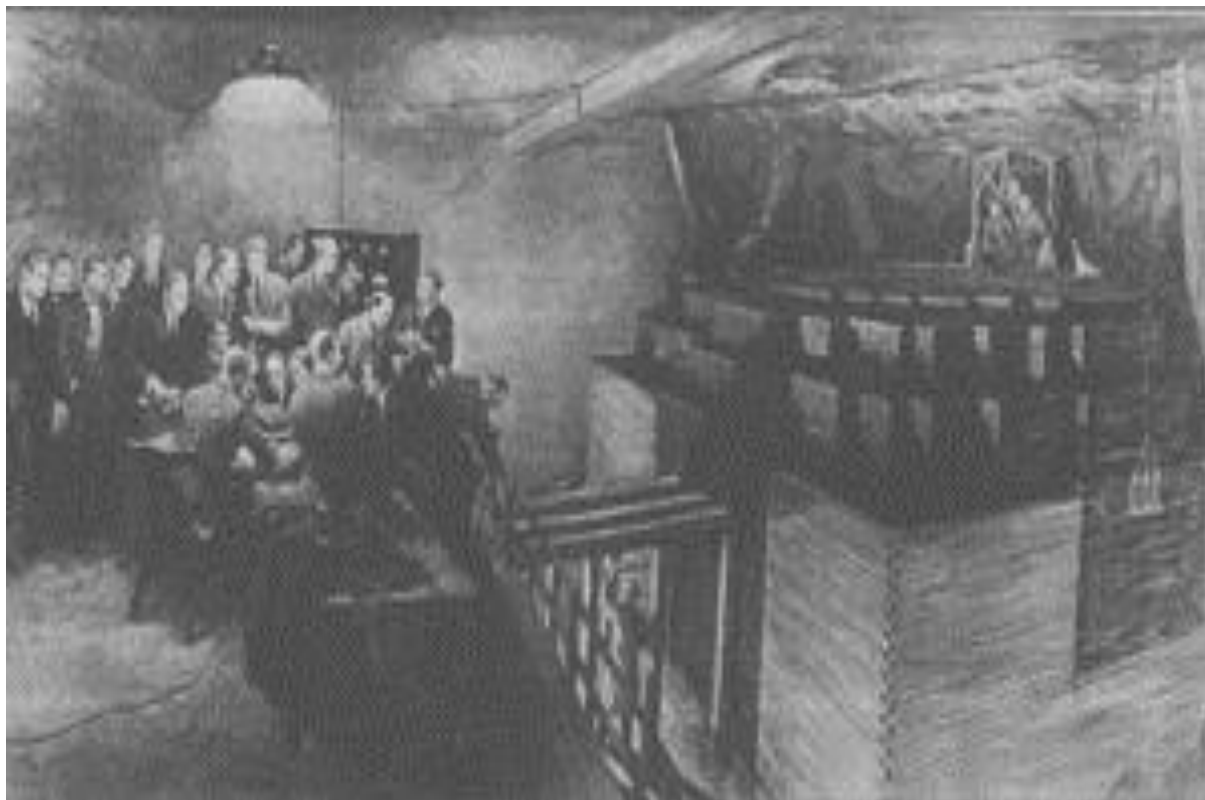
ŠIEL – šiluminis elementas

U235 – urano 235 izotopas

VVER – Vanduo-vanduo energetinis reaktorius

IVADAS

Branduolinę energetiką galime pavadinti kaip technologijų visumą, kuri yra paremta kontroliuojama branduolių skilimo reakcija. Šios reakcijos metu išsiskiria šiluma, kuri vėliau yra naudojama šilumos ar garo gamybai. Branduolinę energetiką galima suskaidyti į šiuos pagrindinius etapus – branduolinio kuro kasimas, kuro sodrinimas, energijos generavimas elektrinėse bei jau panaudoto ir atidirbusio kuro saugojimas ir laidojimas.



1.1 pav. Pirmasis branduolinis reaktorius CP-1 [14]

1942 m. gruodžio 2 d. vadovaujant Enrico Fermi Čikagoje (JAV) buvo paleistas pirmasis pasaulyje branduolinis reaktorius Chicago Pile-1 (žr. 1.1 pav.) . Šis eksperimentas buvo dalis Manheteno projekto, finansuojamo JAV vyriausybės. Tačiau šio eksperimento tikslas buvo visai ne saugaus ir taikaus energijos generavimo šaltinio sukūrimas, jo tikslas buvo sukurti branduolinį ginklą. Šis pirmasis reaktorius veikė tik apie pusvalandį, neturėjo jokios aušinimo sistemos ir apsaugos nuo sklindančios radiacijos.

Uždarius Ignalinos atominę elektrinę Lietuvoje planuojama statyti naują Visagino atominę elektrinę. Šios elektrinės strateginiu investuotoju pasirinkta kompanija Hitachi-GE, kuri ketina statyti pažangųjį verdančio vandens reaktorių – ABWR (angl. Advanced boiling water reactor). Todėl šio tipo reaktoriai šiuo metu yra aktualūs Lietuvai. Dėl šių priežasčių Lietuvai tapo aktualu sužinoti ir kuo labiau pažinti šio tipo reaktorių.

ABWR reaktoriuose, kaip ir kituose BWR ar PWR tipo reaktoriuose šiluminė energija yra generuojama šiluminiuose elementuose (ŠIEL'uose), kurie yra sumontuojami į kuro rinkles, o šios

talpinamos į reaktoriaus aktyviąją zoną. Galios reguliavimui yra naudojami kryžiaus formos valdymo strypai, kurie verdančio vandens tipo reaktoriuose į aktyviąją zoną yra suleidžiami iš reaktoriaus apačios, o verdančio vandens tipo reaktoriuose – iš viršaus.

Išsamus termohidraulinių procesų išmanymas yra labai svarbu branduolinių reaktorių kuro rinklių konstrukcijai ir jų saugiam eksploatavimui. Tyrimai šioje srityje gali padėti patobulinti šiuolaikinių tipų reaktorius bei praplėsti jų galimybes. Atlikti šias užduotis gali padėti eksperimentai bei CFD kodai. Pagrindinis šio darbo tikslas yra sukurti patvirtintą CFD modelį supaprastintam vienam ketvirtadaliui kuro celės ir ateityje visiškai funkcionalų ir patvirtintą CFD modelį visai kuro rinklei.

1 DARBO TIKLSAS IR UŽDAVINIAI

Tikslas:

- Ištirti termohidraulinius procesus, vykstančius reaktoriaus aktyvioje zonoje.

Uždaviniai:

- Išanalizuoti pagrindines pažangiojo verdančio vandens reaktoriaus ABWR dalis;
- Išanalizuoti ANSYS programų paketo ypatybes ir ANSYS FLUENT programinės įrangos galimybes;
- Sudaryti tiriamąjį modelį, sukuriant jo geometriją, tinklę bei kraštines sąlygas;
- Atlikti skaičiavimus ir išanalizuoti gautus rezultatus.

Tyrimo metodai:

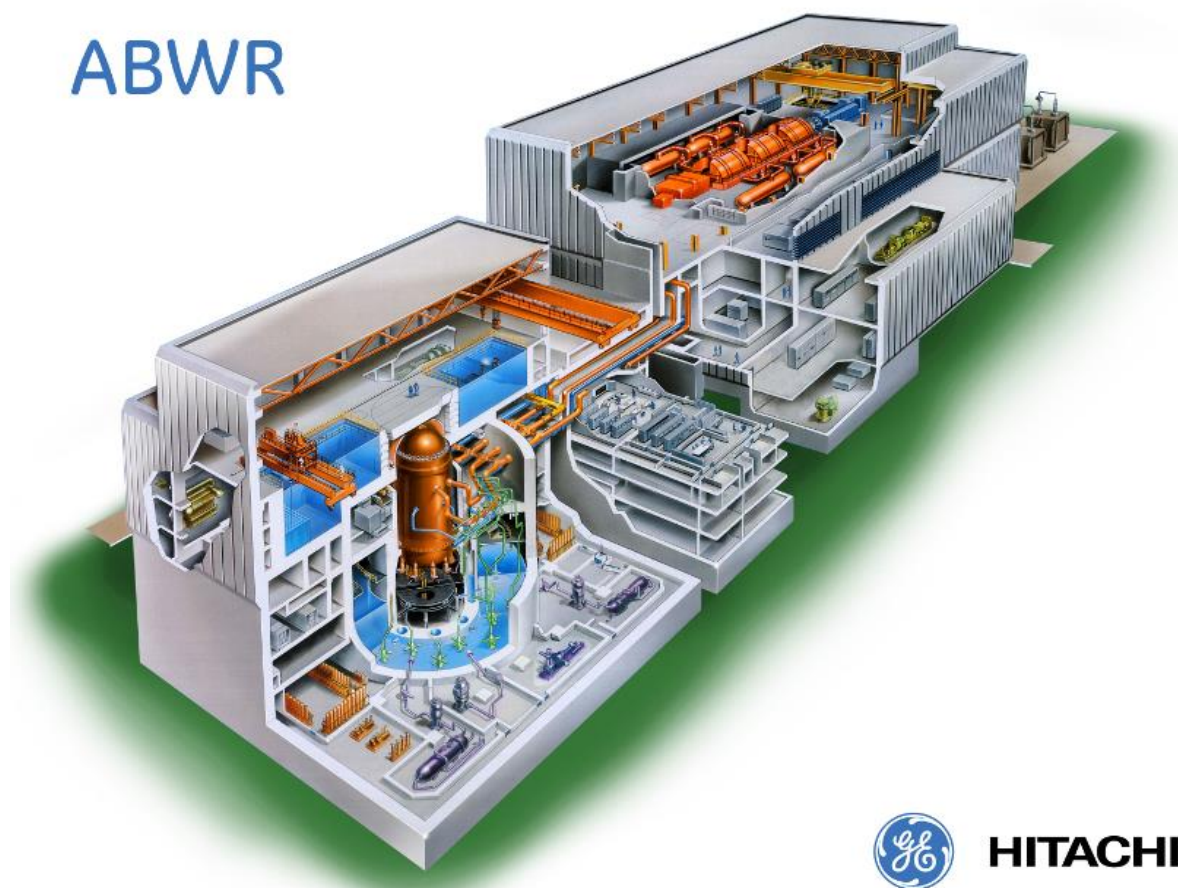
- Darbe buvo pasitelktas baigtinių tūrių metodas, kurį ir naudoja ANSYS FLUENT programų paketas.

Naujumas:

- Panaudojus baigtinių tūrių tyrimo metodą buvo ištirti ABWR reaktoriaus aktyviojoje zonoje vykstantys termohidrauliniai procesai. Kadangi Lietuva planuoja statyti branduolinę jėgainę su šiuo reaktoriumi, Lietuvai ir jos žmonėms ir svarbu ir aktualu sužinoti kuo daugiau apie šį reaktorių, jo privalumus ir trūkumus.

2 PAŽANGUSIS VERDANČIO VANDENS REAKTORIUS

Pažangusis verdančio vandens reaktorius (angl. ABWR – advanced boiling water reactor) yra III+ kartos lengvojo vandens reaktorius, kuris buvo išplėtotas remiantis ilgalaikę eksploatacinę patirtimi, naudojant išbandytas ir patvirtintas technologijas iš ankstesnių verdančio vandens reaktorių (angl. BWR –boiling water reactor) projektinių sprendinių.



2.1 pav. Branduolinės jėgainės su ABWR reaktoriumi vizualizacija [1]

Du pagrindiniai fundamentalūs skirtumai tarp BWR tipo ir kitų lengvojo vandens reaktorių yra tai, kad kitaip nei suslėgto vandens reaktoriuose (angl. PWR –Pressurized water reactor), pirmiausiai virimo procesas vyksta tiesiog aktyviojoje zonoje ir antrą – pagamintas garas yra tiekiamas tiesiai į turbiną, kuri ir suka elektros generatorių, gaminančių elektros energiją. Suslėgto vandens reaktoriaus aktyviojoje zonoje joks virimas nevyksta dėl palaikomo itin aukšto darbinio slėgio kuris siekia 160 bar slėgį. Tai reaktoriaus konstrukcijas padaro sudėtingesnes nei verdančio vandens reaktorių.

2.1 lentelė Pagrindiniai ABWR ir BWR branduolinių reaktorių parametrai [2]

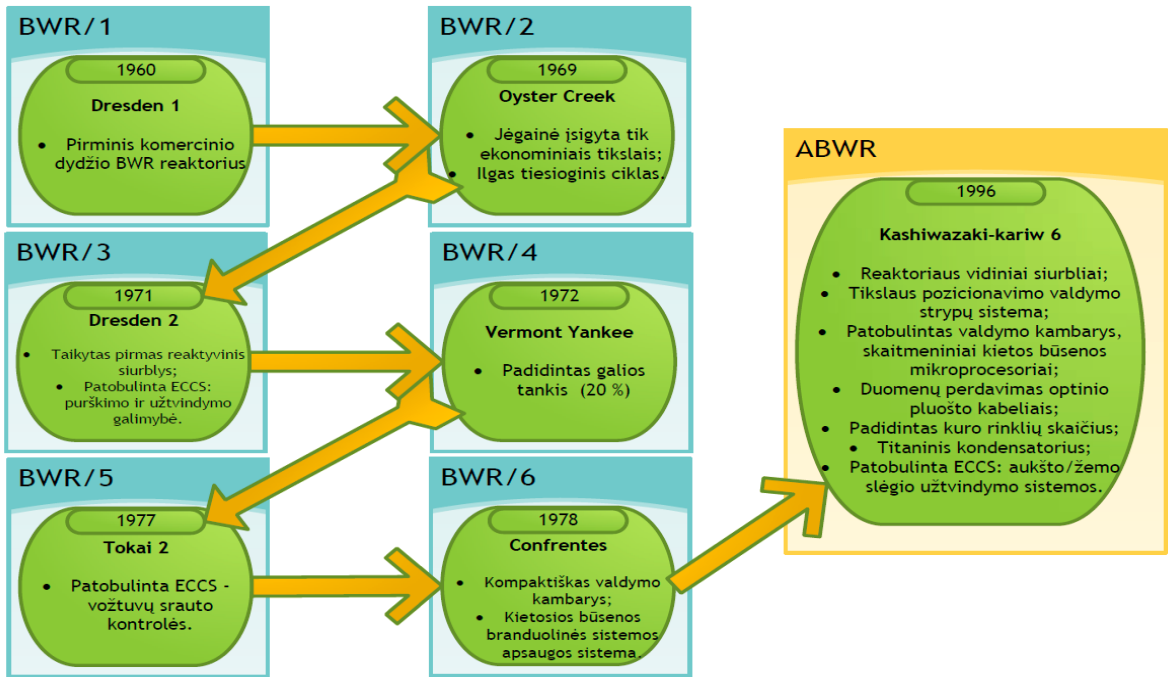
Parametrai	ABWR	BWR
Elektrinė galia, MWe	1350	1100
Šiluminė galia, MWt	3926	3293
Slėgis reaktoriuje, MPa	7,2	7,1

Parametrai	ABWR	BWR
Maitinimo vandens temperatūra, °C	215	215
Kuro rinklių skaičius	872	764
Valdymo strypų skaičius	205	185
Reaktoriaus korpuso skersmuo, aukštis, m	7,1 ir 21	6,4 ir 22
Reaktoriaus vandens recirkuliacijos sistema	Vidiniai siurbiai (10 vnt.)	Išoriniai siurbiai (2 vnt.) ir inžektoriai (20 vnt.)
Galios valdymas	Tikslaus judesio sistema	Hidraulinė judesio sistema
Greitas stabdymas (SCRAM)	Hidraulinis	Hidraulinis
Aktyviosios zonos avarinio aušinimo sistema (AZAAS)	Žemo slėgio užliejimas (3 sistemos)	Žemo slėgio užliejimas (3 sistemos)
	Aukšto slėgio užliejimas (2 sistemos)	Žemo slėgio įpurškimas (1 sistema)
	Reaktoriaus aktyviosios zonos izoliavimo aušinimo sistema (RAZIS)	Aukšto slėgio aktyviosios zonos apipurškimo sistema
	Automatinė slėgio mažinimo sistema	Automatinė slėgio mažinimo sistema
Likutinės šilumos šalinimo sistema	3 sistemos (bendrai naudojamos)	2 sistemos (bendrai naudojamos)
Apsauginis kevalas	Sustiprinto betono vientiso tipo pastatas	Mark-I arba plieninis, Mark-II kevalai
Pagrindinės garo turbinos šiluminis ciklas	Su 2 pakopų tarpiniu garo pašildymu	Be tarpinio garo pašildymo

Kaip ir buvo minėta, ABWR reaktorius buvo sukurtas siekiant supaprastinti reaktoriaus konstrukcinius sprendinius ir jėgainės eksploatavimą, taip pagerinant saugumą bei sistemų ir konstrukcijų patikimumą.

Supaprastinimai, saugumo ir patikimumo pagerinimas buvo ir lieka prioritetu nuo pirmųjų BWR reaktorių technologijų, pristatytų dar 1950-aisiais metais. Kai kurie iš pagrindinių ABWR patobulinimų ir skirtumų, palyginti su ankstesniais BWR reaktoriais, apima:

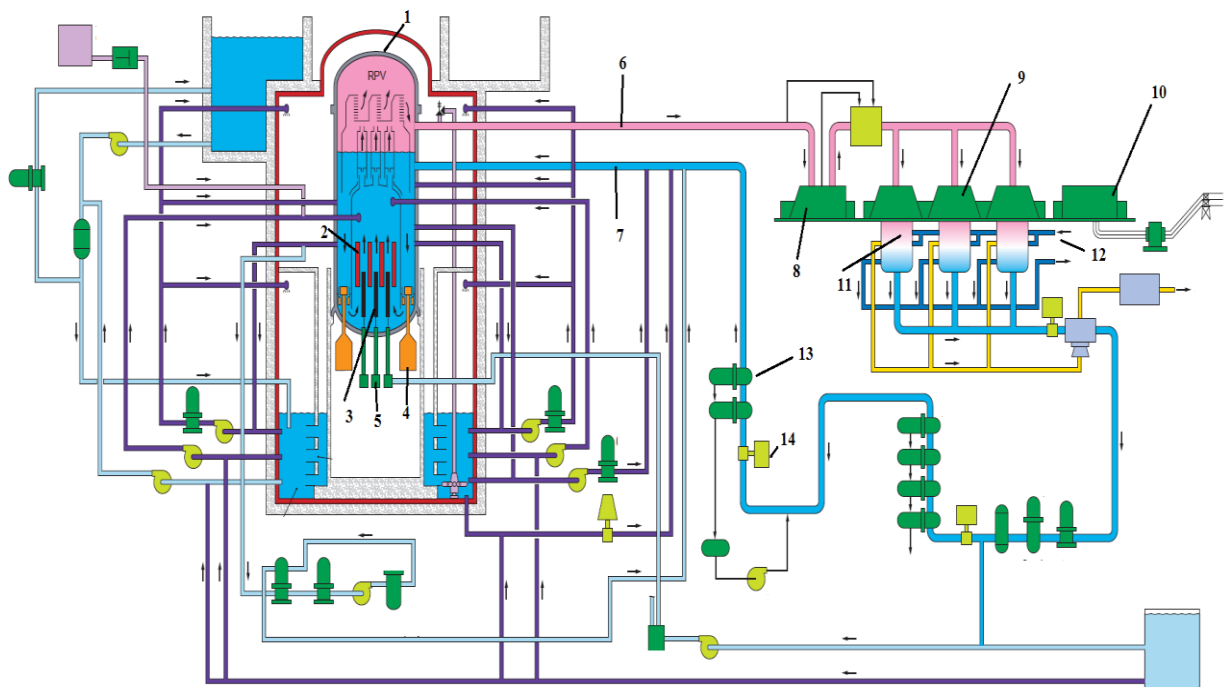
1. Saugumo ir patikimumo patobulinimai;
2. Talpumo koeficiento pagerinimas;
3. Radiacijos dozės, kurią gauna darbininkai, sumažinimas.



2.2 pav. GE BWR reaktorių evoliucija [1]

2.1 ABWR reaktoriaus konstrukcijos ypatybės

ABWR reaktoriaus principinė schema yra tipinė kaip ir visų verdančio vandens reaktorių. Juose vanduo užverda tiesiai aktyviojoje zonoje ir čia pat išgaruoja. Iš susidariusio vandens garo yra atskiriami vandens lašeliai, garas perkaitinamas ir vamzdžiais tiekiamas į garo turbiną, kurioje jis plečiasi ją sukdamas, o ši – elektros generatorių. Garui atidirbus, jis toliau siunčiamas pro kondensatorių, kur likutinė garo energija yra atiduodama žemesnės temperatūros vandens telkiniui ar aušinimo bokštui ir garas yra sukondensuojamas. Toliau kondensatas gražinamas atgal į aktyviają zoną ir ciklas prasideda iš naujo.



2.3 pav. Principinė branduolinės jėgainės su ABWR reaktoriumi srautų diagrama [1]

Čia 1 – reaktoriaus korpusas, 2 – branduolinis kuras, 3 – valdymo strypas, 4 – vidinis cirkuliacinis siurblys, 5 – valdymo strypo variklis, 6 – garo linija, 7 – kondensato linija(maitinimo vandens), 8–aukšto slėgio turbina, 9–žemo slėgio turbina, 10–elektros generatorius, 11–garo kondensatorius, 12 – kondensatoriaus aušinimo vanduo, 13 – aukšto slėgio pašildytuvai, 14 – pagrindinis cirkuliacinis siurblys.

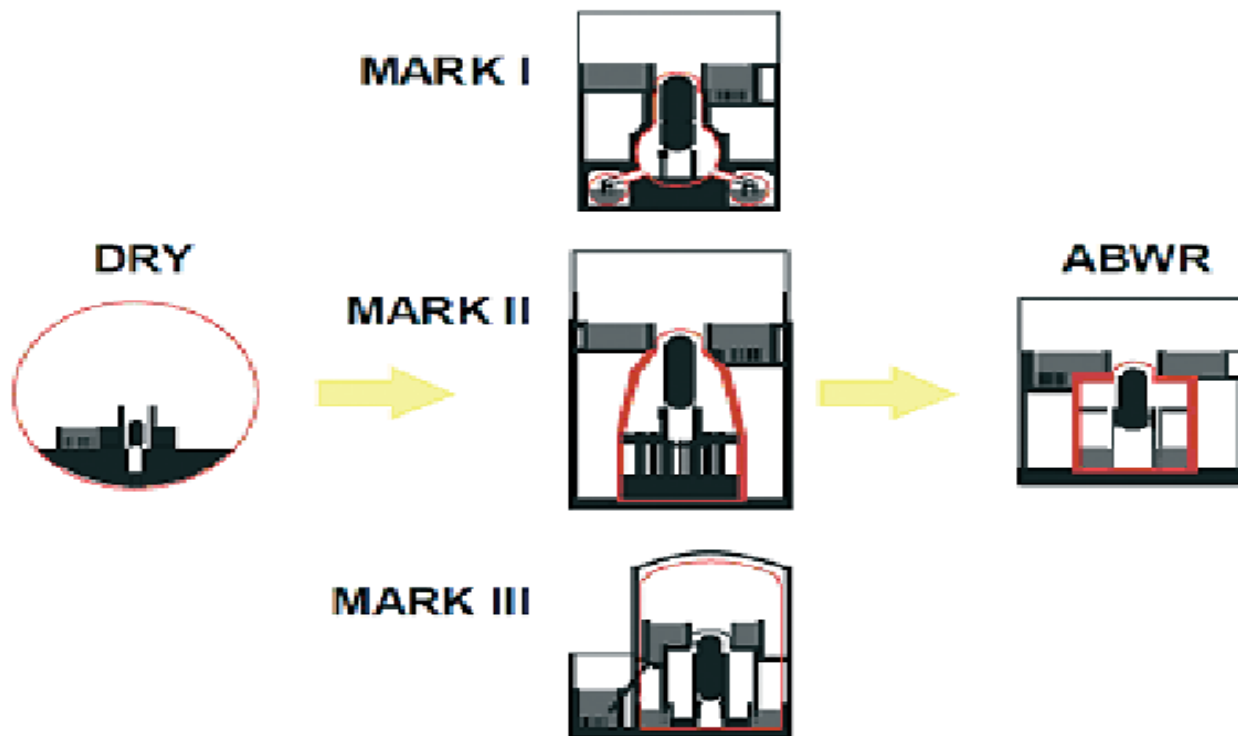
Apsauginis reaktoriaus kevalas.

Apsauginis reaktoriaus kevalas yra cilindrinės formos korpusas, pagamintas iš įveržto gelžbetonio, padengto plieno lakštais ir yra integruotas į pastato konstrukcijas. Tai pirminis apsauginis gaubtas. Kadangi apatinėje reaktoriaus slėginio korpuso dalyje nėra išorinių recirkuliacijos siurblių ir šio kontūro vamzdynų, ABWR reaktorių kevalas yra kur kas mažesnis nei ankstesnės kartos BWR reaktorių (žr. 2.4 pav.). Atitinkamai yra mažesnis ir pats ABWR reaktorių pastatas. Tai sumažino reaktoriaus statybų trukmę, reaktoriaus pastato statybai reikalingų medžiagų kiekį. Dėl to sumažėjus atominės elektrinės su ABWR tipo reaktoriumi projekto atsiperkamumo laikotarpiui, padidėja tikimybė pritraukti daugiau investuotojų ir padidinti projekto sėkmę. Siekiant maksimaliai padidinti atsparumą seisminiam aktyvumui, reaktoriaus kevalas du reaktoriaus korpusu sudaro vientisą integruotą konstrukciją, kuri yra atspari žemės drebėjimams [1].

Reaktoriaus aktyviosios zonos išsilydimo atvejui po reaktoriaus korpusus yra įrengtas bazaltu sustiprintas storas gelžbetoninis pagrindas, gebantis „surinkti“ ir sulaikyti aktyviosios zonos lydalą, kuris prasiskverbia pro reaktoriaus korpusą. Dėl ABWR reaktoriuje įrengtų saugos sistemų ir ne tik, tokio tipo avarijos yra labai mažai tikėtinos.

Šiam ABWR reaktoriaus apsauginiam kevalui yra būdinga:

1. Yra didesnė laisvė formos pasirinkimui lyginant su plieniniais kevalais, dėl to, kad įveržto gelžbetonio kevalai įgalina įrangą racionaliai išdėstyti kevalo viduje;
2. Įveržto gelžbetonio kevalo stiprumas leidžia jį naudoti vamzdynų ar įrangos atramų tvirtinimui, dėl to kevalo erdvė yra išnaudojama daug efektyviau;
3. Pjedestalas, kuris laiko reaktoriaus korpusą, gali apimti ir horizontalios ventiliacijos konfigūracijos ventiliacijos vamzdžius ir tai padidina erdvės panaudojimo efektyvumą ir sumažina ventiliacijos vamzdžių skaičių lyginant su tradicine plieno vamzdžių vertikalia konfigūracija.



2.4 pav. BWR reaktorių apsauginio kevalo evoliucija [1]

Pirmasis BWR reaktorių apsauginis kevalas buvo sferinės formos „sausos“ tipo struktūros, visai toks pat, kaip ir tie, kurie yra iki šių dienų naudojami PWR reaktorių konstrukciniuose sprendimuose. Tačiau greitai buvo pereita prie „slėgio slopinimo“ tipo kevalų dėl jų daugybės privalumų, tokių kaip:

1. Aukštas šiluminis talpumas;
2. Mažesnis projektinis slėgis;
3. Pranašesnis gebėjimas greičiau prisitaikyti prie slėgio sumažinimo;
4. Unikali galimybė filtruoti ir sulaikyti skilimo produktus;
5. Didelio šaltinio lengvai prieinamo paruošto vandens tiekimas nelaimių atveju;
6. Supaprastinti, kompaktiškesni konstrukciniai sprendimai.

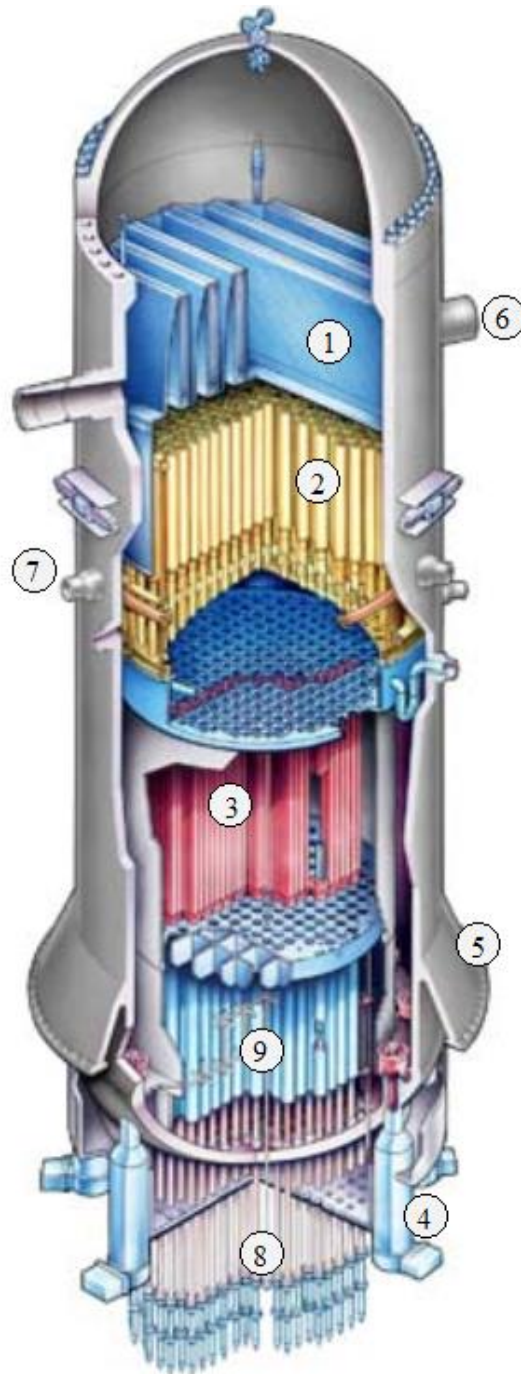
Mark I tipo kevalai buvo pirmieji naujo dizaino kevalai. Toro formos vandens talpa charakterizuoja šio tipo kevalą kaip „šviesos lemputę“. Kūgio formos Mark II tipo kevalas turi mažiau komplikotą išdėstymą, paremtą plieno lakštais padengtą įveržtą betoną. Esminis šio tipo kevalo bruožas yra didelis kevalo „sausas šulinys“ kuris suteikia daugiau erdvės garo ir apsauginių sistemų vamzdynams. Mark III kevalų dizainas yra plačiai naudojamas pasaulyje su BWR/6s ir kai kuriais BWR/5s tipo reaktoriais, reprezentuoja supaprastinimus kaip patobulinimus. Jų plieninių kevalų struktūra yra apvalaus cilindro formos kas yra lengva pagaminti. ABWR tipo kevalas yra ženkliai mažesnis už Mark III tipo kevalą todėl, kad buvo pašalinta išorinei recirkuliacijos vamzdynai.

Reaktoriaus korpusas.

Reaktoriaus korpusas yra cilindro formos plieninis slėginis indas savyje turintis aktyviają zoną ir vidines dalis. Reaktoriaus korpusas susideda iš pusrutulio formos viršutinio dangčio, cilindrinės dalies, apatinio dangčio ir kelių atvamzdžių. Reaktoriaus korpusas yra sumontuotas vertikaliai ant pjedestalo viduje apsauginio reaktoriaus kevalo pastato. Reaktoriaus korpusas yra apie 21 m. aukščio ir 7,4 m. diametro, o jo sienelės storis siekia net 17 centimetrų. Reaktoriaus korpuso pagrindinės funkcijos yra išlaikyti aukštą darbinį slėgį, sulaikant lengvojo vandens aušalą jo viduje taip izoliuojant radioaktyvių medžiagų spinduliavimą nuo aplinkos, esančios reaktoriaus korpuso išorėje.

Reaktoriaus korpusas yra pagamintas iš mažaanglio plieno. Tuo buvo siekiama padidinti atsparumą korozijai. Papildomai vidinė korpuso dalis padengta korozijai atsparaus plieno sluoksniu. Toks korpusas yra atsparesnis spinduliuotės poveikiui kuri sklinda iš reaktoriaus aktyviosios zonos, todėl jis yra ilgaamžiškesnis. Didžioji korpuso dalis (beveik 1000 t masės) iškalta iš vientiso ruošinio. Tai pašalina 30 % suvirinimo siūlių iš reaktoriaus juostinės dalies, kurioms periodiškai yra reikalinga atlikti patikrą. Be to korpusas turi ir mažiau atvamzdžių, žemiau aktyviosios zonos nėra nė vienos angos, kurios skersmuo būtų didesnis negu 5 cm. Visa tai padidina korpuso integralumą ir sumažina galimybę prarasti aušinančio šilumnešio aktyviają zoną [3-4].

Aktyvioji zona yra vertikalaus cilindro formos ir yra apie 3,7 m. aukščio bei 5,2 m. diametro. Ją sudaro 872 kuro rinklės ir 205 valdymo strypai. Aktyviają zoną supa jos plieninis cilindros formos kiautas. Šis kiautas atskiria du vandens srautus – per aktyviają zoną kylantį aukštyn, ir žemyn besileidžiantį už kiauto ribų. Kiauto viršutinė dalis yra sumontuota virš aktyvios zonos kiauto ir viršutinės kreipiančiosios. Viršutinė kiauto dalis sudaro tūrį virš aktyviosios zonos išėjimo ir tarnauja kaip vandens ir garo susimaišymo kamera prieš jiems patenkant į drėgmės separatorius.



2.5 pav. ABWR branduolinis reaktorius [1]

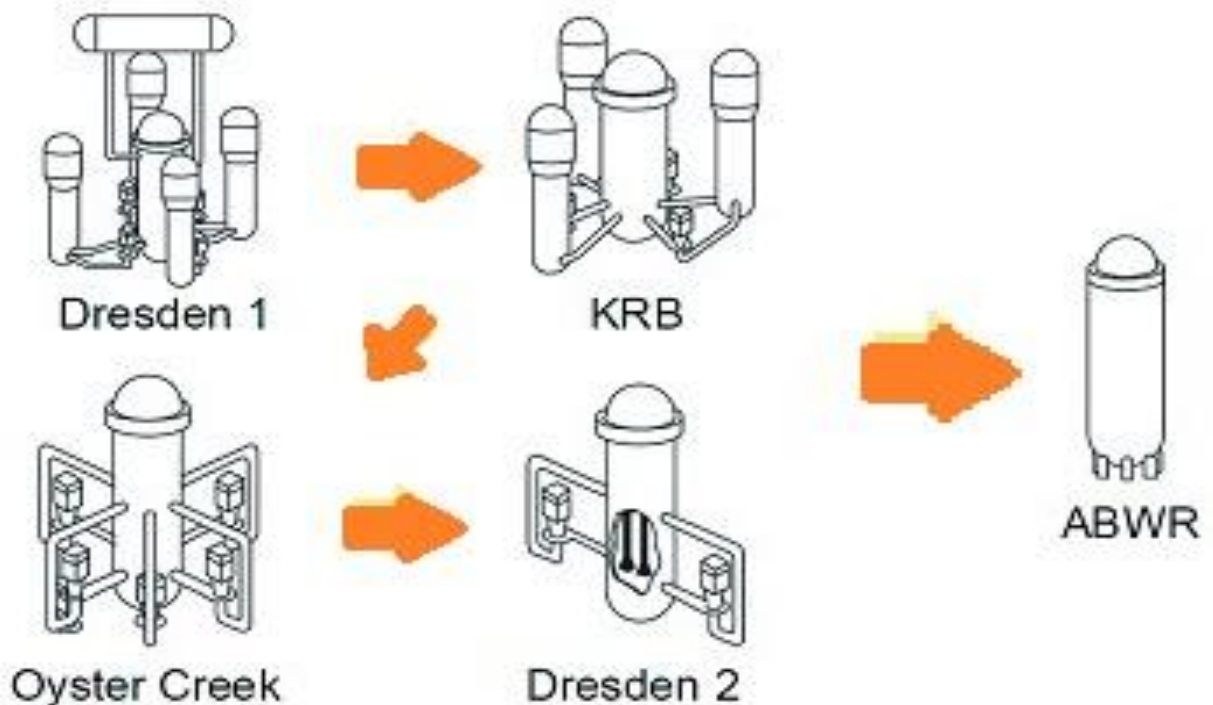
Čia 1 – žaliuzių tipo drėgmės džiovintuvas, 2 – cikloninio tipo drėgmės separatorius, 3– kuro rinklės, 4– reaktoriaus vidiniai siurbliai, 5– “sijono” tipo korpuso atrama, 6– garo nuvedimo atvamzdis, 7 – maitinimo vandens padavimo atvamzdis, 8 – tikslaus pozicionavimo valdymo strypų mechanizmai, 9 – valdymo strypai.

Reaktoriaus vidiniai siurbliai.

Reaktoriaus korpuso apačioje yra įrengta dešimt reaktoriaus vidinių siurblių (RIP – Reactors Internal Pumps) skirtų priverstiniai šilumnešio recirkuliacijai. Šie siurbliai pakeitė senesnės konstrukcijos BWR naudotus išorinius recirkuliacijos siurblius. Todėl ABWR reaktoriams daugiau

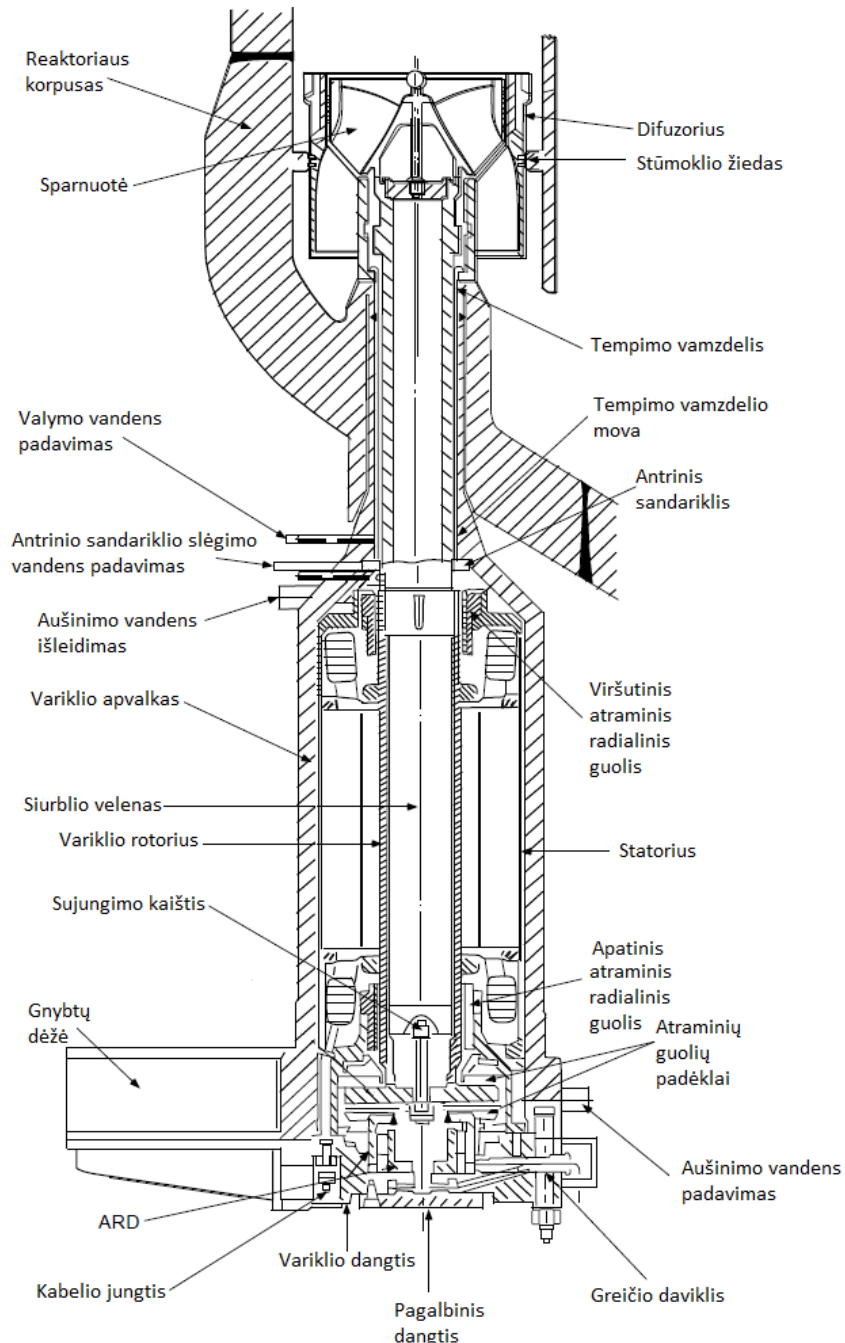
neboreikia jokių išorinių cirkuliacijos kilpų, jokių išorinių vamzdynų apatinėje reaktoriaus korpuso dalyje, todėl korpuso struktūra tapo gerokai paprastesnė ir kompaktiškesnė. Kadangi reaktoriaus svorio centras pažemėjo, ABWR reaktorius tapo atsparesnis žemės drebėjimų poveikiui.

Atsisakius didelio diametro vamzdynų pajungimo apatinėje reaktoriaus korpuso dalyje, sunkios avarijos tikimybė buvo sumažinta lyginant su ankstesniais BWR reaktoriais. Šis sprendimas pagerino visus bendrus ABWR reaktorių branduolinės saugos aspektus. Vidinių siurblių naudojimas sudarė galimybę optimizuoti avarinę šerdies aušinimo sistemą (ECCS). Šie siurbliai yra patobulinta Europoje suprojektuotų ir naudojamų nevienoje atominėje elektrinėje versija. Sukaupus 9 milijonų darbo valandų patirties, kai kurie tebėra naudojami nuo 1970-ųjų. Vienas vidinis siurblys gali tiekti iki 7700 m³ per valandą ir veikiant visiems dešimčiai yra užtikrinamas 110% našumas t.y. reaktoriaus aušinimas yra pilnai užtikrinamas veikiant 9-iems siurbliams. [2]



2.6 pav. BWR reaktorių aušinimo sistemos evoliucija [1]

Paleidus RIP variklį yra kontroliuojama, kad jis pasiektų savo minimalų greitį. Taip pat, vienas po kito yra paleidžiami ir kiti devyni siurbliai. Nuo to momento visų dešimties siurblių greitis gali būti padidintas individualiai arba naudojant automatinį režimą padidintas visų kartu. Siurblių greičio padidinimas keičia šilumnešio debitą, ko pasėkoje keičiasi reaktoriaus gale. Taigi, dėl tam tikrų priežasčių, sugedus vienam siurbliui, sumažėja reaktoriaus gale. Tam kad elektrinės atiduodama gale liktų nepakitus, automatinės sistemos pagalba yra padidinama kitų devynių siurblių greičiai ir elektros tinklas nepajaučia jokių pokyčių.



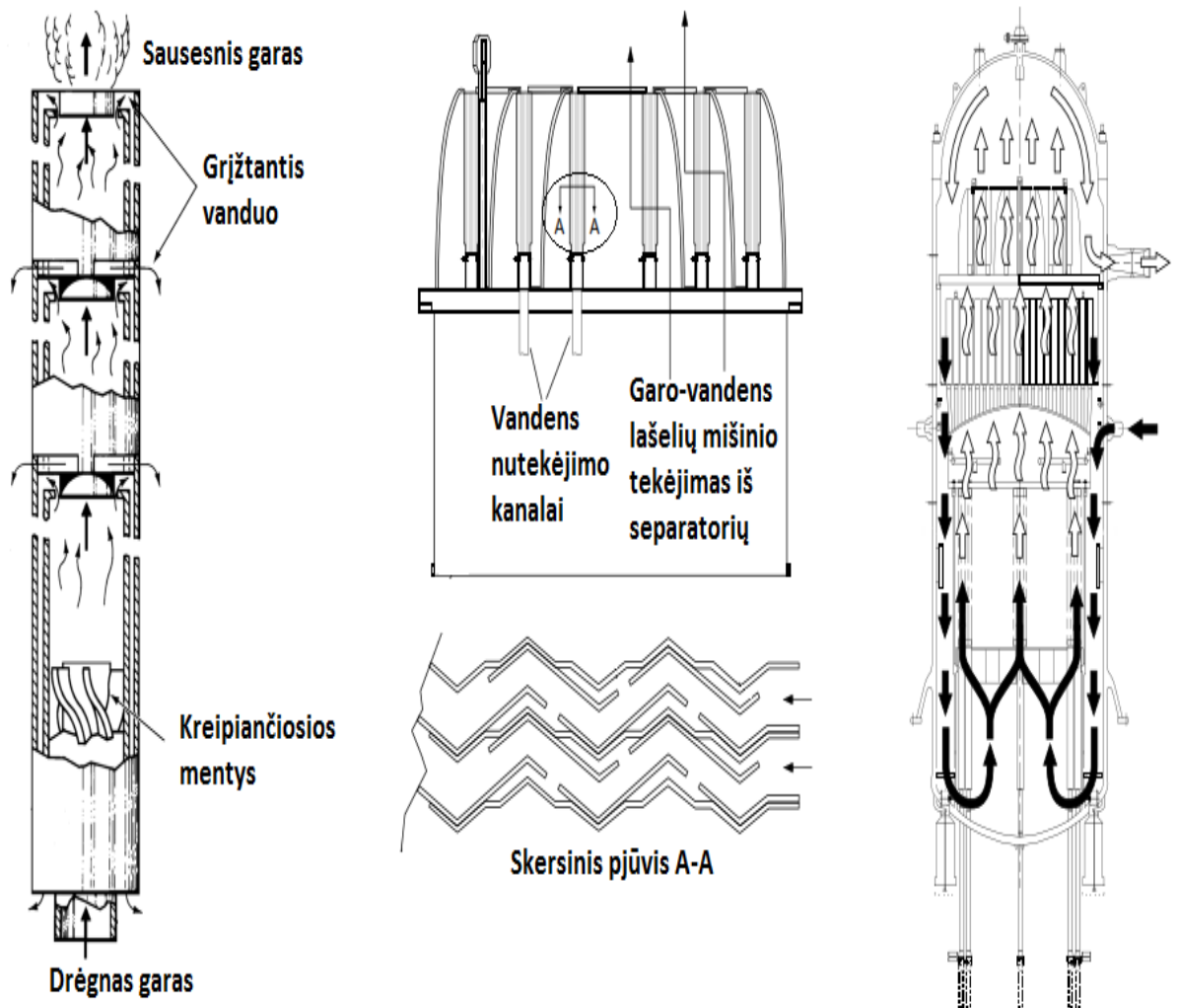
2.7 pav. ABWR vidinio siurblio skersinis pjūvis [1]

Garo separatorius ir garo džiovintuvas.

Garo separatorių separatorių sudaro švelniai išgaubtas paviršius ant kurio viršaus yra privirinami daugybė trijų etapų garo separatoriaus vamzdelių. Fiksuotas ašinės krypties tekėjimo tipo garo separatorius neturi jokių judančių dalių bei yra pagamintas iš nerūdijančio plieno. Kiekviename separatoriuje vandens-garo mišinys kyla aukštyn pro vamzdelius ir pro kreipiančiąsias menteles, kurios tekantį srautą įsuka aplink savo tekėjimo ašį. Besisukantį srautą veikia išcentrinės jėgos, kurios vandens lašelius nubloškia prie sienelių, o šie sienelių paviršiumi nuteka žemyn atgal į aktyviają zoną.

Ištekėjęs garas dar nėra pakankamai sausas, todėl yra naudojamas garo džiovintuvas. Jį sudaro daugybė džiovinimo vienetų sumontuotų į vientisą struktūrą, kuri iš reaktoriaus korpuso yra

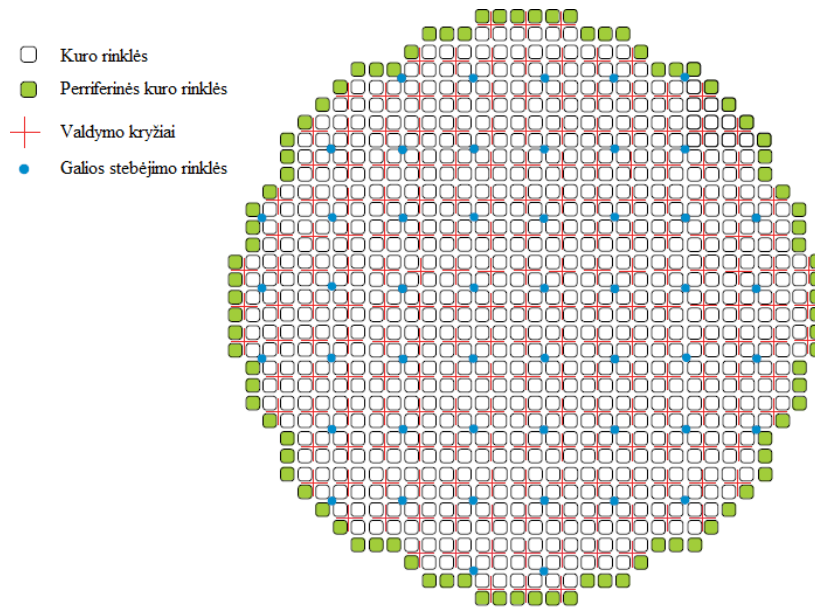
išimama kaip vientisas įrenginys t.y. dalimis pašalinti negalima. Garo separatoriuje sausesnis garas patenka į savotišką labirintą, kuriame daugybe kartų pakeičia savo tekėjimo kryptį, taip likusi drėgmė nusėda ant džiovintuvo sienelių. Drėgmę surinkti taip pat padeda ir vadinamieji „drėgmės kabliai“, kur drėgmė pakliūna į spąstus ir kartu su visa surinkta drėgme yra sistemos kanalais yra nudrenuojama į baseiną supantį separatorius, o iš ten į recirkuliacinį nutekėjimo žiedą, esanti tarp reaktoriaus aktyviosios zonos ir korpuso sienelės.



2.8 pav. Garo separatoriaus, garo džiovintuvo ir schematinis cirkuliacijos vaizdas [1]

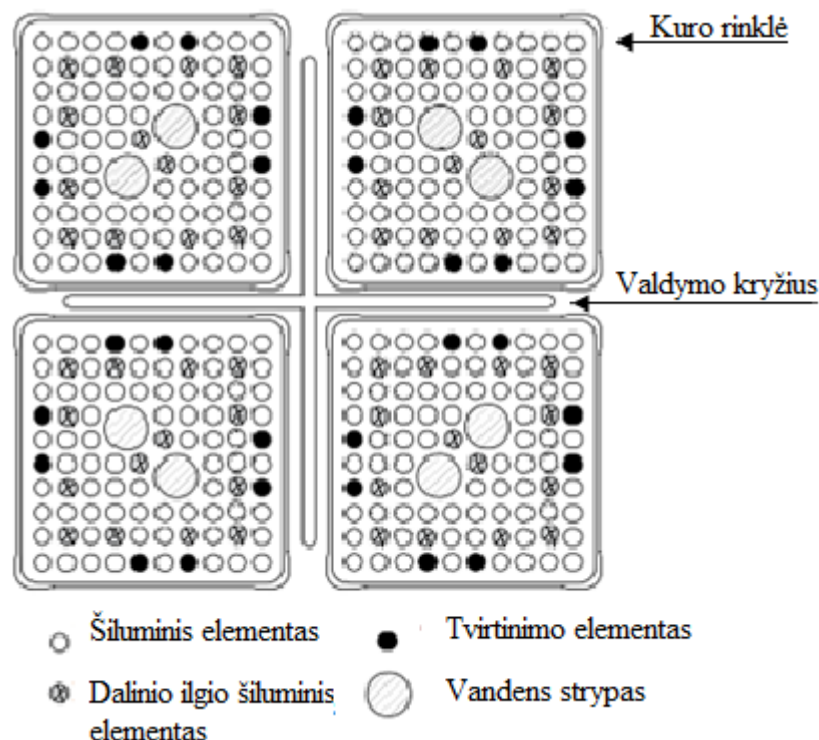
2.2 ABWR reaktoriaus kuro rinklės ypatumai

ABWR reaktoriaus aktyviosios zonos konfigūracija yra pavaizduota 2.9 pav. Ją sudaro 872 kuro rinklės, 205 valdymo kryžiai ir 52 lokalinės galios stebėjimo rinklės (angl. LPRM – Local Power Range Monitors). Eksploatacijos metu reaktorių reaktyvumas yra valdomas valdymo kryžių pagalba, kuriuos įvedant yra sugeriamas neutronų perteklius. Kiekvienas valdymo kryžius ir jį supančios keturios kuro rinklės sudaro valdymo celę. Dažniausiai reaktyvumas yra valdomas po vieną valdymo celę, todėl kiti valdymo kryžiai būna ištraukti iš reaktoriaus aktyviosios zonos.

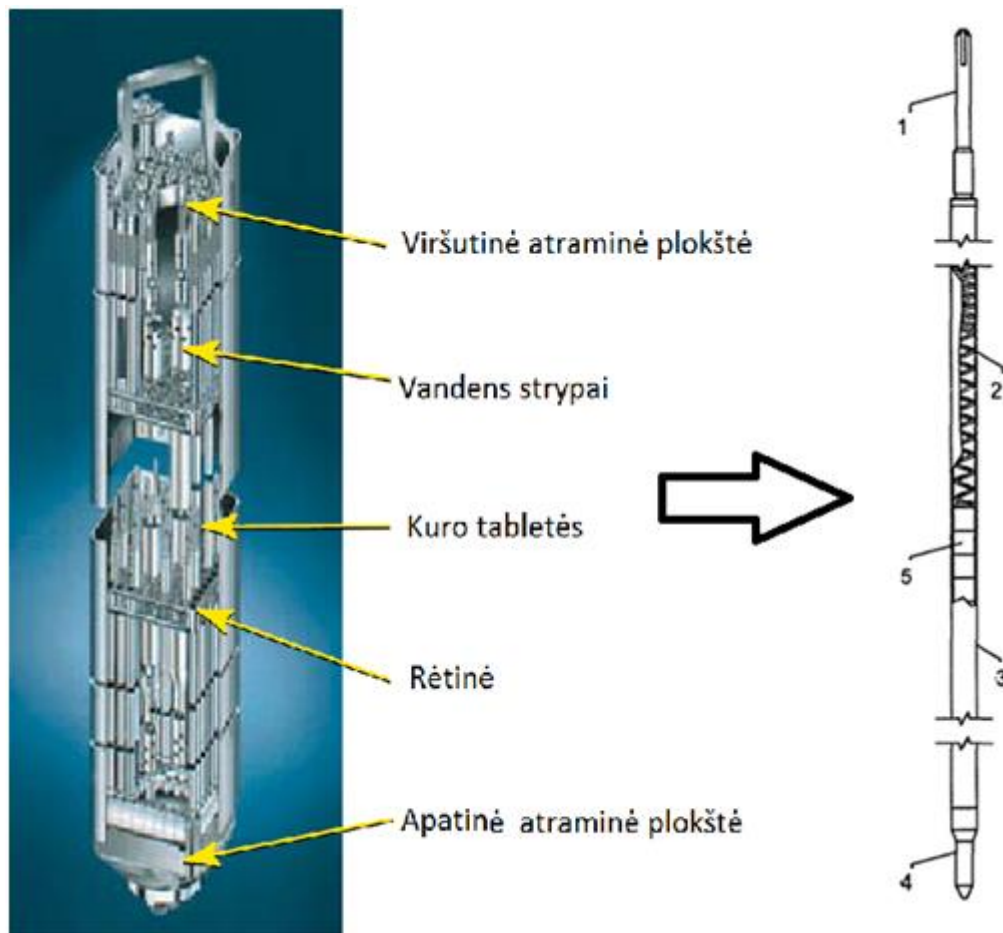


2.9 pav. ABWR reaktoriaus aktyviosios zonos konfigūracija [1]

ABWR kuro rinklė susideda iš kuro pluošto ir kanalo. Kuro pluoštas susideda iš šiluminių elementų ir įrangos reikalingos jiems tinkamai išdėstyti ir išlaikyti savo vietose. Kanalas yra iš cirkalojaus pagaminta dėžė, kurią apgaubia kuro pluoštą ir nukreipia pro aktyviają zoną tekančią šilumnešį tekėti pro kuro pluoštą ir tuo pačiu tarnauja tinkamai nukreipti judančius valdymo strypus. GE14 rinklėje yra sumontuota 10x10 išdėstymo 78 pilno ilgio šiluminiai elementai, 14 dalinio ilgio ŠIEL'ai, kurių ilgis siekia du trečdalius aktyviojo ilgio, ir du dideli centriniai vandens strypai. Pastaruoju metu yra vystoma nauja kuro rinklės versija, kuri greitu metu planuojama, kad bus suprojektuota, licencijuota ir kurią bus galima naudoti pirminių ABWR reaktorių aktyviosiose zonos [2].



2.10 pav. Keturių kuro rinklių modulis su valdymo kryžiumi [1]

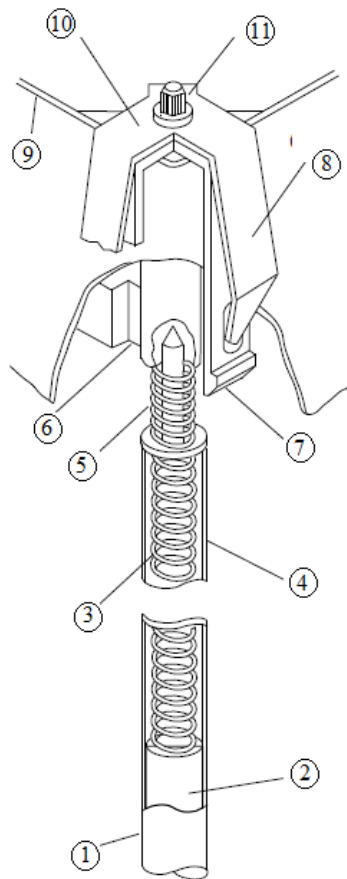


2.11 pav. ABWR kuro rinklės ir atskiro ŠIEL'o sandara [1,5]

Čia 1- viršutinis tvirtinimas, 2- spyruoklė, 3- apvlakalas, 4- apatinis tvirtinimas, 5- kuro tabletės.

2.11 pav. pavaizduota pagrindinės kuro rinklės dalys ir atskiras šiluminis elementas. Nerūdijančio plieno apatinę atraminę plokštę sudaro kūgio formos sekcija, kurioje yra įtvirtinami ŠIEL'ai ir tarp jų yra išlaikomi reikalingi atstumai kuro rinklės apačioje.

Viršutinė atraminė plokštė taip pat užtikrina tinkamą ŠIEL'ų išsidėstymą. Taip pat joje yra rankena, kuri yra skirta rinklę pakelti ir įkrauti į reaktorių, arba jai atidirbus iš jo iškelti. Kuro pluoštas yra laikomas aštuonių rišančiųjų strypų išdėstytą periferijoje. Kiekvieno rišančiojo strypo apatinio galo sriegis yra įsukamas į apatinę atraminę plokščią, o viršutinio galo sriegis yra praveriamas pro viršutinę atraminę plokštę ir priveržiama su veržle. Dalinio ilgio kuro strypai taip pat turi sriegį savo galuose, kurie yra įsukami į apatinę atraminę plokštę, tam kad išvengti strypų judėjimo gabenant kuro rinkles ar jas kraunant horizontalioje padėtyje. Pilno ilgio ŠEIL'ai ir vandens strypai turi prailgintus viršutinius galus, kurie yra įstatomi į viršutinę atraminę plokštę. Prailginti galai reikalingi, tam kad būtų atsižvelgta į didelio išdegimo laipsnio kuro rinklių plėtimąsi. Išsiplėtimo spyruoklės taip pat yra įrengtos ir virš viršutinio tvirtinimo, tam kad užtikrinti pilno ilgio ŠIEL'ų ir vandens strypų tinkamą įtvirtinimą apatinėje tvirtinimo plokštėje [2].



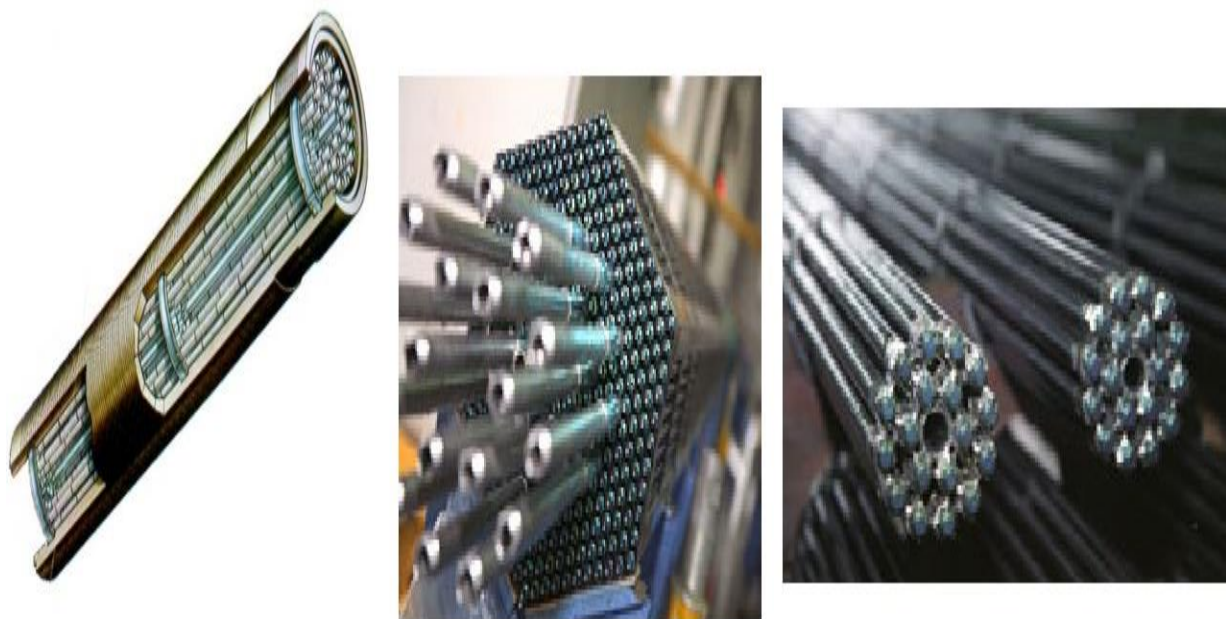
2.12 pav. ABWR ŠIEL'ų tvirtinimas [1]

Čia 1- ŠIEL'as, 2- kuro tabletė, 3- kuro tabletes prispaudžianti spyruoklė, 4 - ŠIEL'ų apvalkalas, 5- ŠIEL'ą prispaudžianti spyruoklė, 6 - viršutinė tvirtinimo plokštė, 7 - apsaugos elementas, 8 – lankstus elementas, 9 – kanalas, 10 – tvirtinimo elementas, 11 – tvirtinimo varžtas.

ABWR tipo reaktoriuose šiluminiai elementai yra sudaryti iš viršutinio bei apatinio įtvirtinimų, sukepinto iki 3,2 % frakcijos įsodrintų urano dioksido kuro tablečių, kurias prilaiko spyruoklė, ir jas gaubiančio cirkonio (Zircaloy – 2) lydinio apvalkalo apvalkalo. Tablečių tankis siekia 97% teorinio tankio ($10,96 \text{ g/cm}^3$), o tarpelis tarp apvalkalo ir tablečių yra užpildytas helio dujomis.

BWR šiluminių elementų gamybos etapai yra panašūs kaip ir PWR elementų. Skiriasi tik tai, kad apvalkalai gaminami iš kitokio cirkonio lydinio (cirkalojaus 2 su Sn 1,2÷1,7%). Branduolinio kuro tablečių skersmuo taip pat būna didesnis (apie 10,6 mm, o PWR reaktorių – 8,2 mm). Distancinės (ribojančios) rėtinės pritvirtinamos nustatytais atstumais išilgai centrinio vamzdelio, kuriame nėra branduolinio kuro ir kuris eksploatacijos metu užpildomas aušalu (vandeniu). Kai kuriais atvejais yra net keli tokia vandens „strypai“ (ABWR kuro rinklėje yra 2 vandens strypai), o distancinės rėtinės pritvirtinamos prie jų sudaro gardelę, į kurią įkišami šiluminiai elementai. [6]

Vakaruose projektuotų branduolinių reaktorių, išskyrus CANDU, šiluminių elementų rinklių skerspjūvis yra kvadrato formos (žr. 2.13 pav.), rusiškų VVER reaktorių šešiakampės, o RBMK reaktorių – apskritas. AGR reaktorių šiluminių elementų rinklės taip pat yra cilindrinės.[6]



2.13 pav. AGR, VVER 1000 ir RBMK reaktorių šiluminių elementų rinklės [6]

Iš esmės tipinė BWR reaktoriaus kuro rinklė yra tokia pati kaip ir 2.11 pav. pavaizduota ABWR šiluminių elementų rinklė. Pradžioje šiuose reaktoriuose būdavo montuojamos 7x7 šiluminių elementų rinklės. Tačiau eksploatuojant tokias rinkles, buvo susidurta su tam tikrais sunkumais, visu pirma su intensyvia tabletės ir apvalkalo sąveika (angl. PCI – pellet cladding interaction). Siekiant sumažinti šio fenomeno poveikį, reaktoriaus galią būtina keisti lėtai, laikantis tam tikros programos. Tokiu atveju švelniau keičiasi šilumos išsiskyrimo srautas ir PCI poveikis sumažėja. Linijinis šilumos srautas, sukeltantis PCI rinklėje, sudarytoje iš 8x8 šiluminių elementų, yra mažesnis. Pastaruoju metu vis plačiau diegiamos 9x9 šiluminių elementų rinklės. Jų eksploatacijai nebetaikomi 7x7 šiluminių elementų rinklėms būtini apribojimai. Be to, naujosiose rinklėse branduolinio kuro išdega net 20% procentų daugiau. Šios rinklės padidina ir įrangos (reaktoriaus) panaudojimo laipsnį. BWR reaktorių šiluminių elementų skersmuo yra didesnis negu PWR reaktorių ŠIEL'ų. [6]

Reaktoriaus aktyvioji zona yra suprojektuota taip, kad kuro rinklės išdegtų pilnai, nestabdant reaktoriaus. Skirtingai nuo RBMK tipo reaktorių, ABWR neturi „online refueling“ t.y. kuro perkrovimo reaktoriui dribant galimybės. Todėl siekiant išvengti bereikalingų stabdymų, kuro rinklės yra eksploatuojamos ciklais, po kiekvieno kuro rinklę perkeliant į kitą reaktoriaus aktyviosios zonos vietą. Žemo reaktyvumo arba kitaip tariant didesnio išdegimo kuro rinklės yra perkeliamos į aktyviosios zonos periferiją arba arčiau jos, jei kuras nėra pakankamai išdeges. Šio perkėlimo tikslas yra sumažinti neutronų nutekėjimą iš aktyviosios zonos. Reaktorių pradėdant darbą, periferinėje zonoje naudojamas mažo reaktyvumo kuras būna pagamintas iš gamtinio urano arba silpnai sodrinto urano.

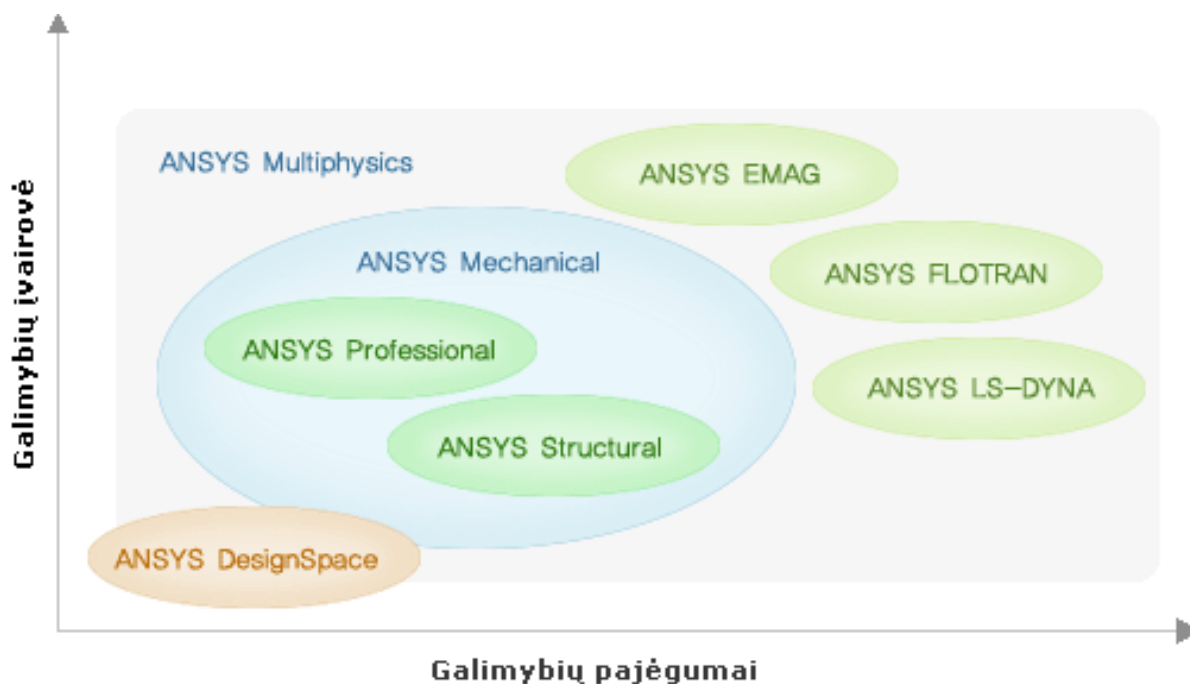
3 ANSYS PROGRAMŲ PAKETO YPATYBĖS

ANSYS programų paketas – lengvai naudojamas, atliekantis inžinerinę (struktūrinę / terminę) projektų analizę baigtinių elementų metodu. Paketą sudaro struktūrinės, skysčių, elektronikos, geometrijos ir tinkelio sudarymo bei simuliacijos produktai.

Šiame programų rinkinyje yra įdiegti svarbiausi šiuolaikinių technologijų simuliacijos metodai, todėl programa sudaro galimybę vartotojui pasinaudoti aukšto lygio simuliacijos galimybėmis, nereikalaudama aukšto ekspertizės lygio. Taip pat šioje programoje vartotojas ras linijinių elementų rinkinį, daug netiesinių elementų, galimybę atlikti visą montażą ir daug kitų vartotojui reikalingų funkcijų. [7]

„ANSYS Inc.“ kuriamų produktų sąrašė yra gerai visame pasaulyje žinomi ir daugelyje pramonės bei gamybos sričių plačiai pritaikoma ir naudojama programinė įranga, skirta inžineriniams uždaviniams modeliuoti. „ANSYS“ modeliavimas yra pagrįstas baigtinių elementų metodu ir ši sistema leidžia globaliai nagrinėti projektuojamą objektą, sukuriant norimo gaminio ar sistemos skaitinį modelį. ANSYS programų paketą sudaro:

- Sistemos ir įterptosios programinės įrangos;
- Elektronikos analizės;
- Fluidų dinamikos tyrimai;
- Struktūrinės analizės;
- Multifizikinių uždavinių sprendimas.



3.1 pav. ANSYS programų paketų įvairovė ir pajėgumai [7]

ANSYS siūlo visapusišką programinės įrangos paketą, kuris apima visą spektrą fizikinių reiškinių, suteikiant prieigą prie beveik bet kokios inžinerinės modeliavimo, kuri gali kilti projektavimo procesas metu. Organizacijos visame pasaulyje pasitiki ANSYS programų paketais.

Modeliavimu pagrįstų produktų kūrimas inžineriją perkelia į kitą lygį – neprilygstamos šio programų paketo galimybės kartu su savo neprilygstamu inžinerijos masteliu bei visapusiškais multifizikos pagrindais ir prisitaikanti architektūra išsiskiria ši produktą iš kitų CAE įrankių. Šie ANSYS privalumai suteikia projektavimo procesui inžinerinės vertės, teikdama efektyvumą, skatina naujoves ir mažina fizinių išteklių poreikį, leidžia imituoti testus, kurie kitais atvejais gali būti neįmanomi.

Naudojant anksčiau paminėtus „ANSYS“ programinius paketus, jau nuo pat pirminio projektavimo ir iki galutinio testavimo didžioji dalis inžinerinių problemų sprendžiamos sklandžiai. Šios programos inžinieriams suteikia inžinerinio dizaino analizavimo ir optimizavimo funkcijų, įskaitant modeliavimą ir elementų suderinimą, grafines ir dizaino optimizavimo savybes. Šiame darbe bus nagrinėjama termohidrauliniai procesai ir jų problematika, todėl šiam tikslui vienas iš labiausiai tinkamų įrankių yra „ANSYS“ produktas „FLUENT“.

3.1 FLUENT programinės įrangos apžvalga

ANSYS FLUENT (CFD) yra aukšto lygio kompiuterinė programa skirta modeliuoti fluido tekėjimą, šilumos perdavimą bei chemines reakcijas esant kompleksiniai tiriamo kūno geometrijai.

CFD yra skysčių mechanikos dalis, kuri naudoja skaitinius metodus ir algoritmus padedančius išspręsti ir analizuoti problemas, kurios atsiranda skysčiams tekant. ANSYS CFX ir CFD kuris taiko baigtinių tūrių metodą išspręsti Navje-Stokso lygtį. Ši lygtis yra diferencialinė lygtis nusakanti skysčių masės judėjimą. Ji susideda iš diferencialinė masių ir energijos tvermės dėsnų formos.

Lygtis (1) išreiškia masės tvermės dėsnį, kuris dažnai vadinama tęstinumo lygtimi, nes ji nereikalauja jokių prielaidų išskyrus tai, kad tankis ir greitis yra tęstinumo funkcijos. Tai reiškia, kad srautas gali būti pastovus arba nepastovus, klampus arba be trinties, spūdis arba nesuspaudžiamas [6]. Tai dalinė diferencialinė lygtis apimanti tankį (ρ) ir ašinių greičių (u, v, w).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Momento tvermės dėsnis yra fundamentalus gamtos dėsnis ir jis teigia, kad jeigu uždaroje sistemoje objektų neveiks išorinės jėgos, uždaros sistemos momentas išliks pastovus. Viena iš šio teginio išvadų gali būti ta, kad bet kokių objektų sistemos masių centro greitis visada išliks pastovus, nebent sistema bus paveikta išorinių jėgų. Lygtyje (2) tankis, tekančio fluido slėgis, klamos koeficientas ir laikas yra kintamieji.

$$\begin{aligned}
\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\
\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\
\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt}
\end{aligned} \tag{2}$$

Energijos tvermės dėsnis (3) galioja Niutoniniams fluidams pačioms pagrindinėms nestabilumo, spūdimumo, klampos, šilumos perdavimo srauto sąlygoms išskyrus neigiamą šilumos perdavimą spinduliavimu ir vidinių šilumos šaltinių kurie gali atsirasti vykstant cheminėms ar branduolinėms reakcijoms. Kintamieji lygtyje (3) yra tankis, judančio fluido slėgis, vidinė energija (u), greitis (V), šiluminio laidumo koeficientas (k), temperatūros gradientas (DT) ir laikas (t).

$$\rho \frac{du}{dt} + p(\Delta.V) = \Delta(k\Delta T) + \phi \tag{3}$$

CFD trumpai galima apibrėžti kaip kėtinimą pakeisti tolydžią skaičiavimų sistemą į diskrečias sistemomas naudojant skaičiavimų tinklelį. Tolydžioje sistemoje kintamasis yra apibrėžiamas kiekviename taške, kurių yra itin daug. Paimkime slėgio p priklausomybę tolydžioje vieno matmens sistemoje. Ji gali būti apibrėžta taip:

$$p = p(x), \text{ kai } 0 < x < 1 \tag{4}$$

Diskrečioje sistemoje, kiekvienas srauto kintamasis yra apibrėžtas tik tinklelio taškuose, todėl diskrečioje sistemoje slėgis p yra apibrėžiamas:

$$p_i = p(x_i), \text{ kai } i = 1, 2, \dots, N \tag{5}$$

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

Lengviausia yra nagrinėti vieno matmens sistemą ir jos pritaikymą CFD skaičiavimams.

$$\frac{du}{dx} + u^m = 0, \quad 0 \leq x \leq 1; \quad u(0) = 1 \tag{6}$$

Lygtis (5) yra laikoma tiesine, tada kai indeksas m yra lygus 1. Jei $m = 2$, lygtis būtų laikoma netiesine ir jai būtų reikalingi specifiniai CFD 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 lygtis (5) nusako kintamojo u apskaičiavimą bet kuriame tinklelio taške, lygtį galima pakeisti taip:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i + u_i = 0 \quad (7)$$

Čia indeksas „i“ nurodo kuriame tinklelio taške yra skaičiuojamas parametras. Siekiant išreikšti $(du/dx)_i$ kintamoji u atžvilgiu, lygtis (7) išreiškiama Teiloro eilute:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (8)$$

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

Nepaisydami aukštesnių Teiloro eilutės išskleidimo narių, bei naudodami (7) ir (8) lygtis, gauname:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + u_i = 0 \quad (9)$$

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

Sistemose, kurios naudoja dviejų matmenų sistemą, tinklelis susideda dažniausiai iš trikampių ar keturkampių elementų, o 3D sistemose tinklelio formos gali būti ketursienės, šešiasienės arba prizmės formos. Vieno tinklelio nario užimamas plotas vadinamas „cele“, o celių susikirtimo taškai – mazgais.

Baigtinių tūrių metodas remiasi integralių tvermės lygčių pritaikymu celės aprašomam tūriui, siekiant gauti diskretines celės lygtis. CFD 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 (9) lygtį, gauname:

$$-u_i - 1 + (1 + \Delta x)u_i = 0 \quad (10)$$

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

$$-u_1 + (1 + \Delta x)u_2 = 0 \quad (11)$$

$$-u_2 + (1 + \Delta x)u_3 = 0 \quad (12)$$

$$-u_3 + (1 + \Delta x)u_4 = 0 \quad (13)$$

Kairiajai sistemos ribai diskrečioji lygtis negali būti taikoma, kadangi narys u_{i-1} nėra apibrėžtas. Tokiu atveju priimama, kad $u_1=1$.

Lygybės 11 – 13 bei aukščiau priimta $u1$ reikšmė sudaro nuoseklią algebrinę sistemą, kurią patogiausia užrašyti matricos pavidalu:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 + \Delta x & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 + \Delta x & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 + \Delta x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Praktiniu CFD 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 CFD naudoja duomenis iš gretimų celių arba mazgų. Siekiant išvengti bereikalingo kompiuterio apkrovimo, CFD 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 CFD užduotas ir apskaičiuotas sprendinys. Siekiant sumažinti sutrumpinimo klaidą naudojamas tinklelio taškų kiekio didinimas. Tai leidžia CFD 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 CFD uždavinyje įsitikinti ir žinoti, kad tinklelio dydis ir detalumas atitinka būtinas sąlygas ir poreikį.

Tačiau sprendžiant nelinejines lygybes 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 [8].

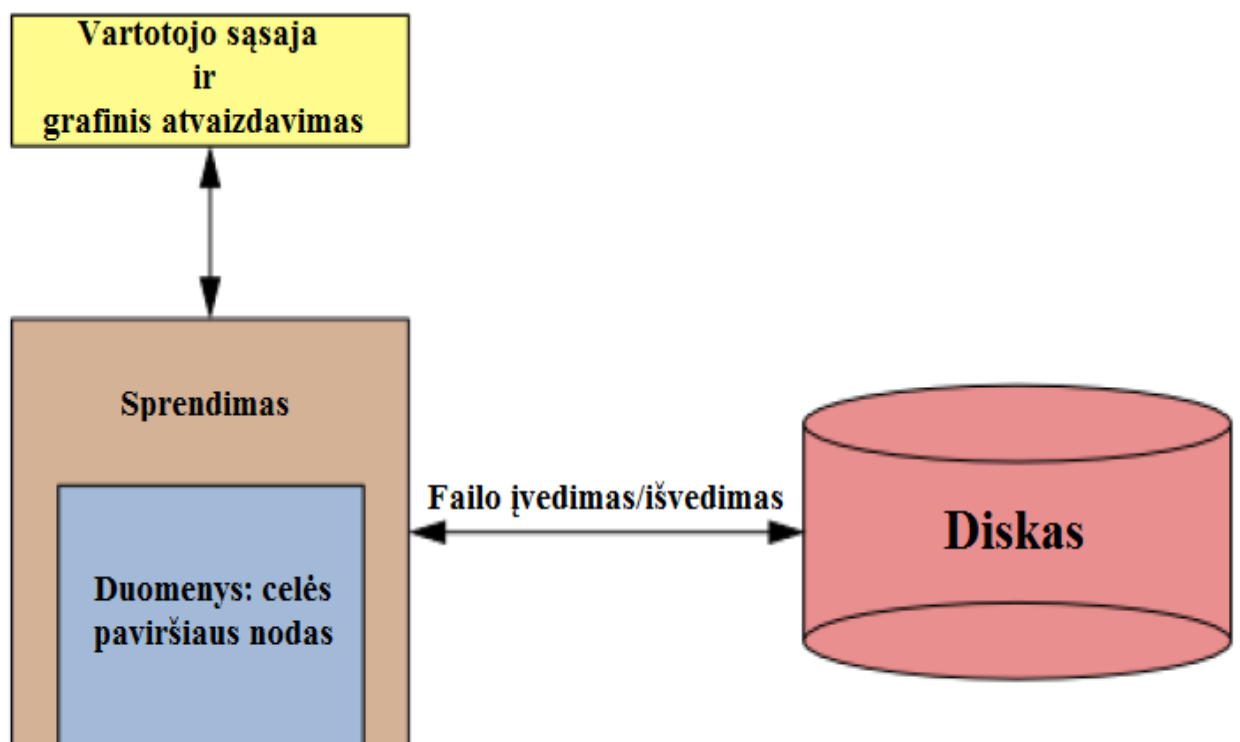
ANSYS FLUENT programų paketas yra parašytas naudojant „C“ programavimo kalbą ir tai šį įrankį padaro lanksčiu bei labai pajėgiu. Todėl tikras dinaminės atminties paskirstymas, veiksminga duomenų struktūra ir lankstus sprendimo valdymas yra galimi. ANSYS FLUENT naudoja kliento/serverio architektūra, kas leidžia į pagalbą pasitelkti galingą išorinę skaičiavimo techniką nuotoliniu būdu. Ši architektūra įgalina efektyvų vykdymą, interaktyvią kontrolę ir visišką lankstumą tarp skirtingo tipo mašinų ar operacinių sistemų.

ANSYS FLUENT suteikia visišką tinklelio lankstumą, įskaitant galimybę spręsti srautų problemas taikant nestruktūrinį tinklelį, tam kad apie sudėtingos geometrijos kūnus tinklelį galima

būtų sukurti gana lengvai. Tarp palaikomų tinklelio tipų yra 2D trikampio / keturkampis, 3D tetraedro / Šešiabriaunio / piramidės / pleišto / daugiakampio ir mišraus (hibridinio) tipo tinkleliai. ANSYS FLUENT taip pat leidžia sutankinti ar praretinti tinklelį priklausomai nuo tekėjimo sprendimo.

Į ANSYS FLUENT programų paketą tinklelį galima nuskaityti, arba, pavyzdžiui, 3D geometrijai, tinklelį galima sukurti naudojant FLUENT tinklelio kūrimo režimą. Visos likusios operacijos yra vykdomos naudojant FLUENT sprendimų režimą, įskaitant kraštinių sąlygų nustatymą, fluido savybių apibrėžimą, sprendimo vykdymą, tinklelio tobulinimą ir žinoma rezultatų apdorojimą bei peržiūrą.

ANSYS FLUENT serijinis sprendimas valdo failo įvedimą ir išvedimą, duomenų saugojimą ir srauto lauko skaičiavimą naudojant vieno sprendimo procesą naudojant tik vieną kompiuterį. Paralelinis sprendimas leidžia vartotojui apskaičiuoti sprendimą naudojant daugybinius procesus kurie gali būti valdomi tame pačiame kompiuteryje arba skirtinguose, kurie yra sujungti į tinklą.



3.2 pav. Serijinė ANSYS FLUENT architektūra [9]

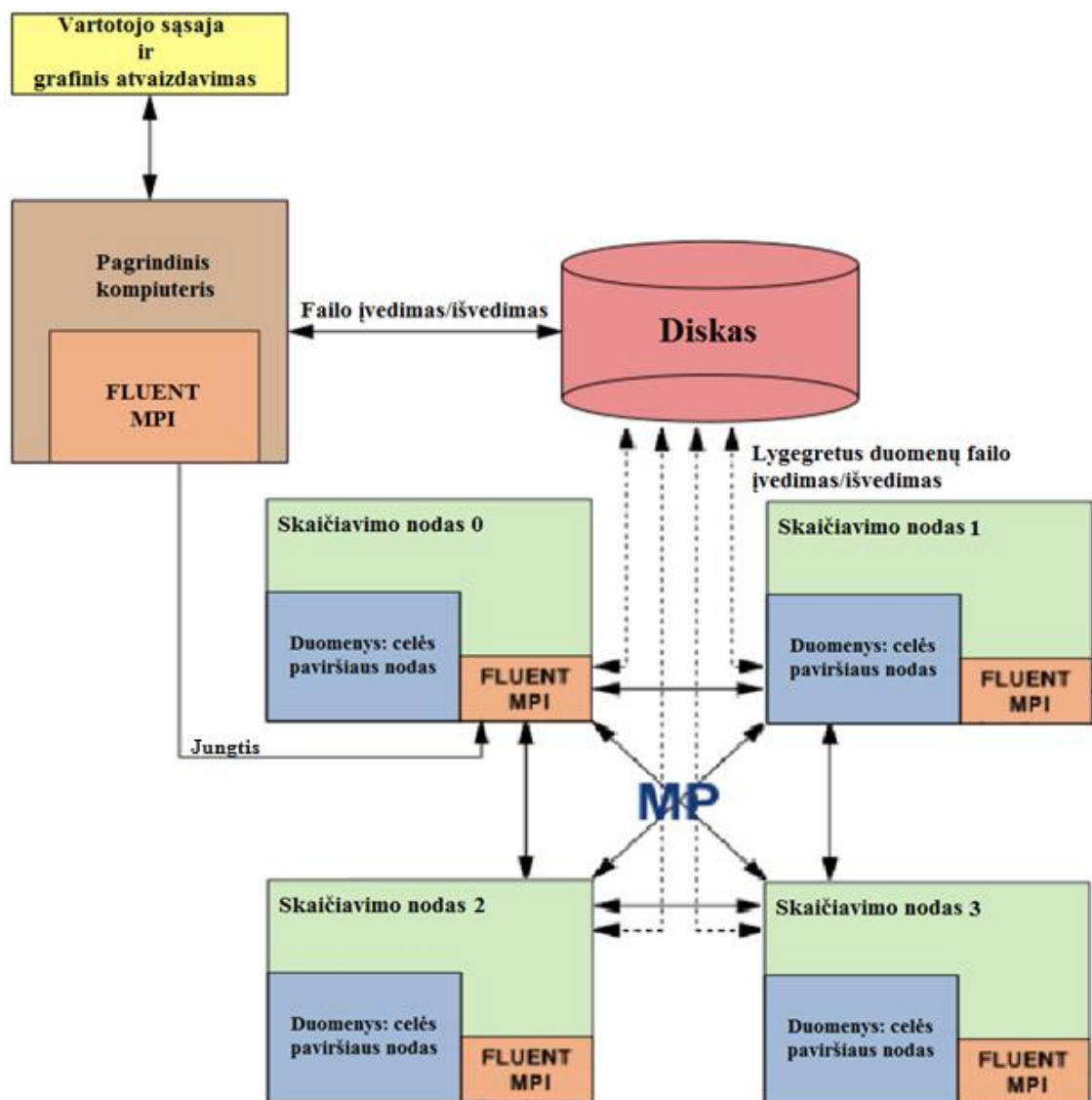
Lygiagretus vykdymas ANSYS FLUENT programų pakete įtraukia ANSYS FLUENT, pagrindinį kompiuterį ir skaičiavimo nodų rinkinį į vieną bendrą procesą. ANSYS FLUENT sąveikauja su pagrindiniu kompiuteriu ir skaičiavimo nodų rinkiniu naudojant vartotojo sąsają ir grafinį atvaizdavimą. Visos funkcijos reikalingos apskaičiuoti sprendinius ir atvaizduoti rezultatus yra prieinamos pasinaudojant interaktyviąją sąsają.

Pagrindiniai uždaviniai kuriuos galima spręsti su FLUENT programų paketu būtų šie:

1. 2D plokštuminius, 2D su ašine simetrija ir 3D fluido tekėjimus;

2. Pastovius arba pereinamuosius srauto tekėjimus;
3. Nespūdžius arba spūdžius srauto tekėjimus įskaitant greičio režimus (iki garsinis, garso ir viršgarsinis greičio režimai);
4. Laminarinius ir turbuliantinius tekėjimus;
5. Niutoninius ir neniutoninius skysčius;
6. Idealių ar realių dujų tekėjimus;
7. Šilumos perdavimo uždavinius įskaitant natūralią, priverstinę bei mišrią konvekciją ir spinduliavimą;

Ir daug kito tipo uždavinių.



3.3 pav. Lygiagreti ANSYS FLUENT architektūra [9]

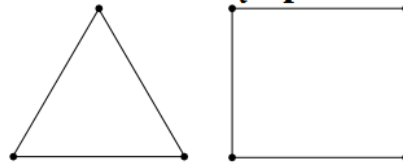
Kuomet yra žinoma problema ar klausimas, kurį norima spręsti ir nagrinėti, rekomenduotina vadovautis šiais punktais:

1. Nusakykite tyrimo tikslus;
2. Sukurkite modelio geometriją ir tinklą;

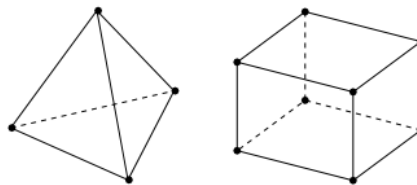
3. Nusakykite sprendimo ir fizinius modelius;
4. Atlikite skaičiavimus ir gaukite rezultatus;
5. Išanalizuokite ir išsaugokite rezultatus;
6. Jei reikia, apsvarstykite skaitinio ar fizinio modelių pakoregavimo reikiamumą [10].

Nusakant tyrimo tikslus yra svarbu atsakyti į daug klausimų, tačiau svarbiausia yra jau pirmuosiuose modeliavimo žingsniuose apibrėžti kokius rezultatus yra tikimasi gauti ir kam jie bus panaudoti. Tai žinant reikia nuspręsti kokios yra modeliavimo galimybės, kokius fizinius modelius bus būtina įtraukti į analizę, kokius modelio supaprastinimus bus privalu priimti norint padaryti uždavinį išsprendžiamą. Atsakius į šiuos klausimus reikia apirašyti kraštines sąlygas. Priklausomai nuo uždavinio tipo, tai gali būti fluido srauto kiekis, išsiskiriančios šilumos galingumas, temperatūros, slėgiai ir aibė kitų parametrų.

2D elementų tipai

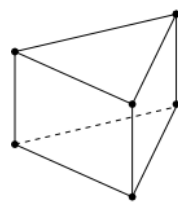


3D elementų tipai

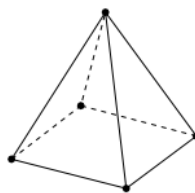


Tetraedras

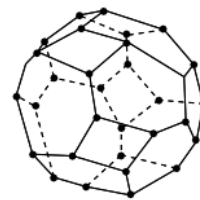
Šešiakampis



Prizmė



Piramidė



Daugiabriaunis

3.4 pav. Tinklelio celių tipai [9]

Kuriant modelio geometriją galima pasitelkti ir kitus programų paketus, tokius kaip SolidWorks ar Autodesk Inventor, tačiau skaičiavimų atlikimui būtina tinklė galima sukurti tik ANSYS FLUENT meshing programos pagalba. ANSYS FLUENT naudoja nestruktūrizuotą tinklę siekiant sumažinti laiką, kurį vartotojas praleidžia kuriant tinklę, supaprastinti geometrijos kūrimo ir tinklės generavimo procesus, įgalinti sudėtingesnės geometrijos modeliavimo galimybę nei galimą būtų naudojant konvekcinius, daugelio blokų struktūrinis tinklė [10].

ANSYS FLUENT gali vienu metu naudoti trikampus ir keturkampius elementus sprendžiant 2D uždavinius bei tetraedrus, šešiabriaunius, piramidės, daugiakampius elementus sprendžiant 3D uždavinius. Šis lankstumas leidžia pasirinkti tinkamo topologijas, kurios geriausiai atitinka konkrečiam uždaviniui ir modeliui.

Sukūrus modelio geometriją ir sugeneravus tinklą, būtina apibrėžti sprendimo ir fizinius modelius. Importavus tinklą yra pasirenkama skaitinio sprendimo būdas – paremtas tankiu ar slėgiu, nestabilus tekėjimas ir t.t. Kitu etapu pasirenkamas tekėjimo modelis – laminarinis, turbulentinis, dvifazis ar kt. Svarbu nepamiršti nusakyti ir medžiagų savybių t.y., nusakyti fluideo, kietos medžiagos ar mišinio savybes. Nusakius eksploataavimo savybes ir apibrėžus kitas kraštines sąlygas yra inicijuojamas pirminis sprendimas. Jame nustatoma iteracijų skaičius, duomenų išvedimo dažnumas ir kiti parametrai ir jau tuomet paleidžiamas skaičiavimas.

Paskutinis etapas yra rezultatų analizė ir jų išsaugojimas. ANSYS FLUENT turi stiprų įrankį vizualiai atvaizduoti rezultatus. Programa leidžia sukurti itin informatyvią rezultatų analizę atvaizduojant temperatūras, slėgius, fluideo tekėjimo greičius ir begalę kitų parametrų juos atvaizduojant kiekviename skaičiavimo taške taip sukuriant paveikslus kiekviename norimame pjūvyje ar net visame tūryje.

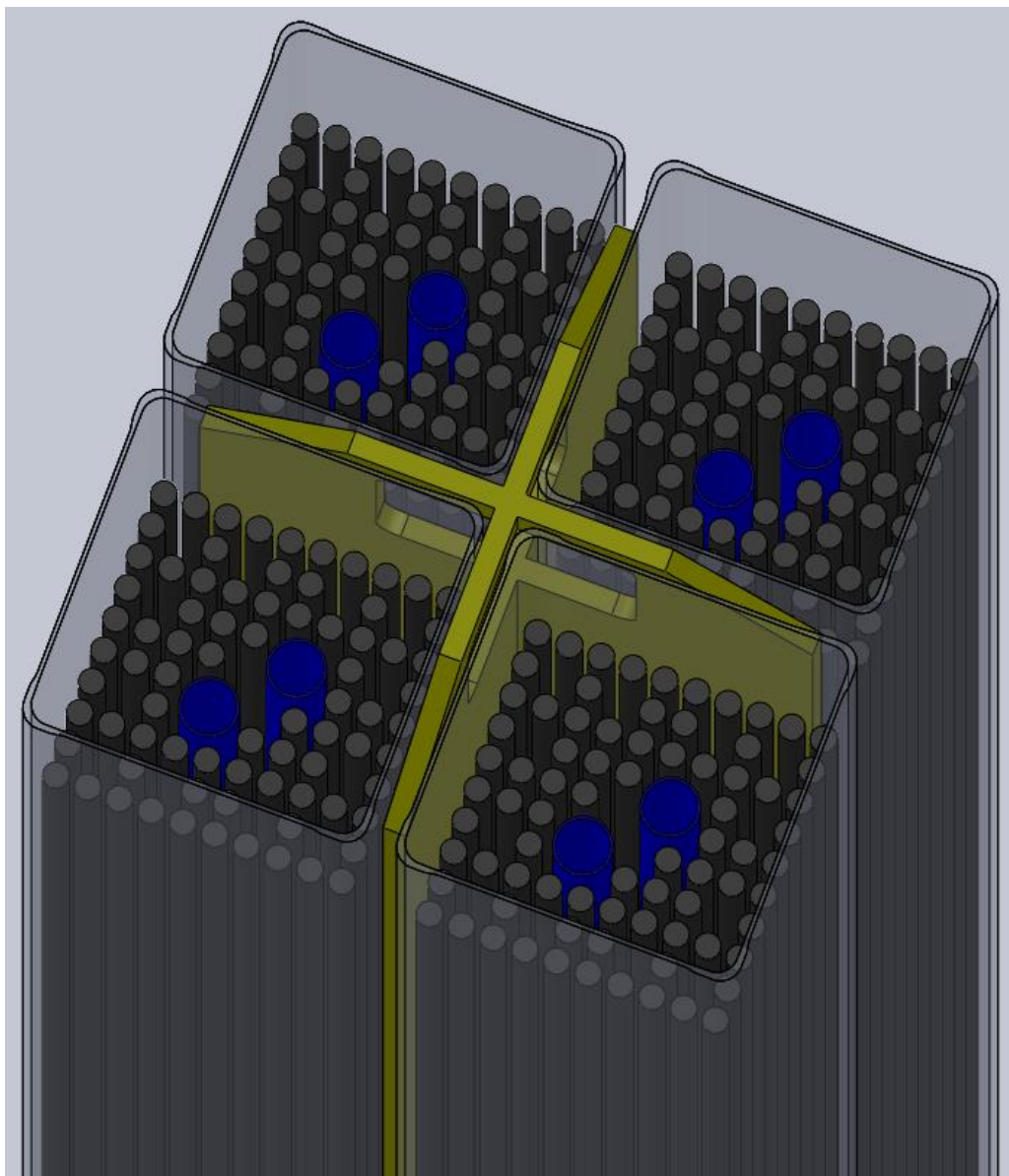
Gavus ir atvaizdavirus rezultatus galima atlikti jų analizę ir nustatyti ar modelis buvo suskurtas tinkamas, ar gerai parinktos kraštinės sąlygos, ar tekėjimo modelis parinktas tinkamas. Radus neatitikimus, nesunku yra skaičiavimus pakartoti ir analizę atlikti iš naujo taip padininant skaičiavimo rezultatų patikimumą.

4 TIRIAMOJO MODELIO SUDARYMAS

Tinkamas modelio sudarymas yra pagrindinis veiksnys, lemiantis rezultatų tikslumą ir patikimumą. Nors ir skaičiavimo įranga yra smarkiai patobulėjusi nuo jos sukūrimo laikų, tačiau vis tiek tenka atsižvelgti į jos skaičiavimo galimybių ribas. Todėl sudarant modelio geometriją, skaičiavimo tinklą bei parenkant kraštines sąlygas, tenka numatyti, iš pirmo žvilgsnio, daug, tačiau būtinų supaprastinimų. Jie reikalingi tam, kad nebūtų peržengta skaičiavimo įrangos galimybių riba bei būtų pasiektas optimalus santykis tarp skaičiavimo greičio ir rezultatų tikslumo.

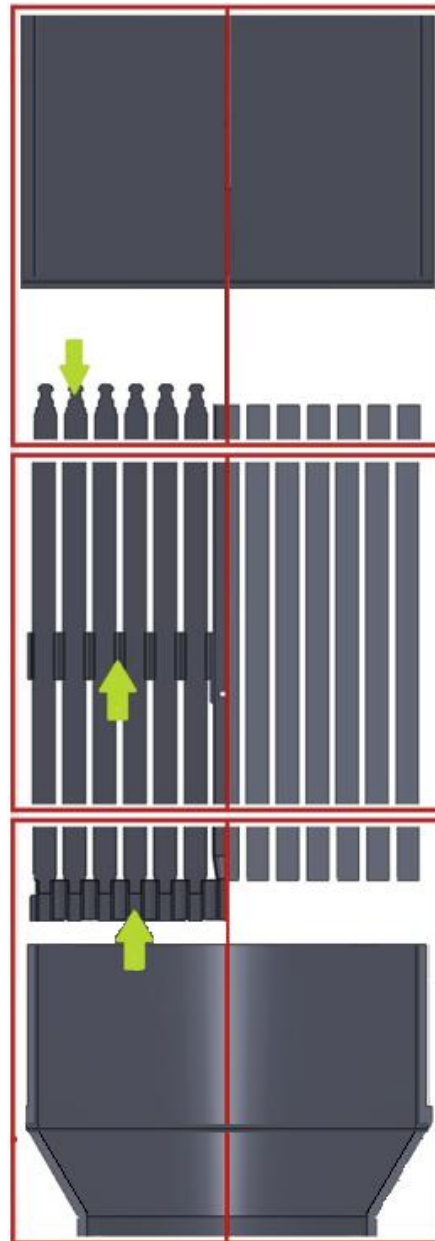
4.1 Modelio geometrija ir supaprastinimai

Kaip tiriamasis modelis, buvo pasirinkta pastaruoju metu dažnai Lietuvoje minimo pažangaus verdančio vandens reaktoriaus ABWR (angl. Advanced boiling water reactor) keturių kuro rinklių ir valdymo kryžiaus sistema, dar vadinama „kuro modulių“.



4.1 pav. Kuro modulio ir valdymo kryžiaus 3D vaizdas

Visi skaičiavimai bus atliekami su ANSYS FLUENT (CFD) programų paketu, kuris yra komercinis fluidų dinamikos skaičiuojamasis kodas taikantis baigtinių tūrių metodą. Ir kaip buvo minėta anksčiau, dėl skaičiavimo įrangos galimybių ribų, buvo priimti keli būtini modelio supaprastinimai.



4.2 pav. Kuro rinklės supaprastinimai

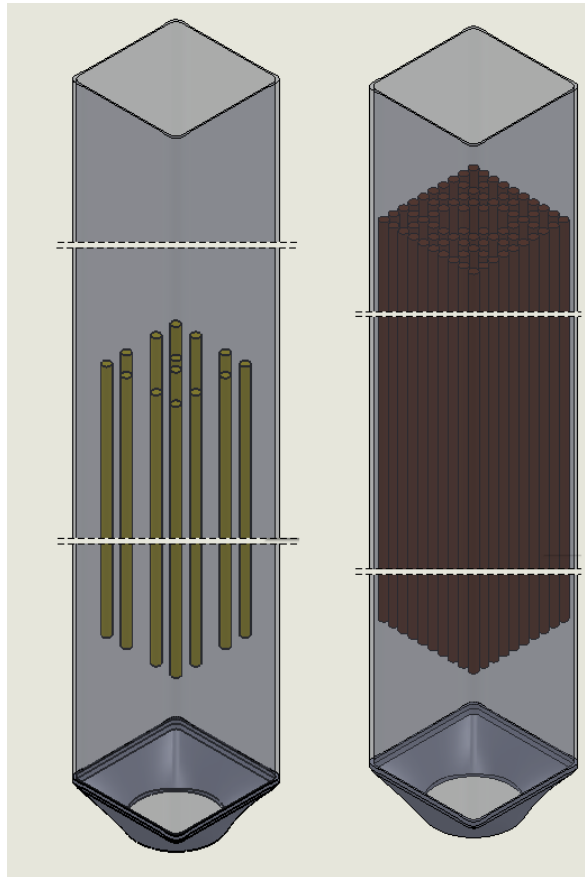
Padaryti modelio supaprastinimai yra ganėtinai dideli, tačiau kaip ir minėta anksčiau, jie yra būtina. Esant paprastesnei geometrijai ir pakeitus tinklelio parametrus, skaičiavimų rezultatai bus gauti per trumpesnę laiką, atsižvelgiant į skaičiavimo tikslumo išlaikymą optimalaus varianto ribose. Iš originalaus kuro rinklės modelio buvo pašalintos rėtinės (prilaikančios, distancinės ir sumaišymo) ir kėlimo rankenos. Kuro strypai (pilno ir dalinio ilgių) buvo modeliuoti kaip paprasti cilindrai, strypų laikikliai ir kaiščiai buvo pašalinti. Centriniai vandens strypai buvo pakeisti į tuščiaidurius strypus. Kadangi modeliavimo buvo susidurta su skaičiavimo įrangos techninių galimybių nepakankamumu, teko priimti dar vieną supaprastinimą, kurio metu modelis buvo

penkias lygias dalis. Tokiu atveju, apskaičiavus ir gavus pirmos dalies rezultatus, galima paimti jos fluideo ištekėjimo vidutinę temperatūrą ir nurodyti ją kaip antros dalies fluideo įtekėjimo temperatūrą ir skaičiavimus pratęsti. Analogiškas variantas yra atliekamas ir su likusiomis trijomis dalimis.

4.1 lentelė Pagrindinės modelio charakteristikos [1,11]

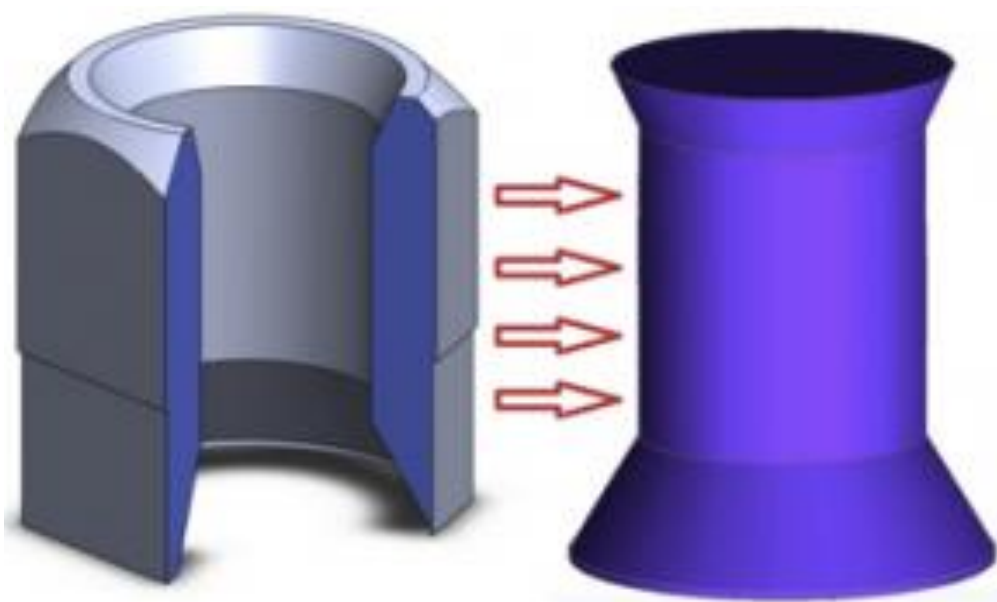
Modelio dalis	Charakteristika	Reikšmė	Mato vnt.
Kuro rinklė	Tipas	GE14 10x10	-
	Kiekis reaktoriuje	872	vnt
	Kreipiančiųjų rėtinių sk.	8	vnt
	Kampų/sienelių storis	2,5/1,6	mm
	Gabaritiniai matmenys	140x140	mm
	Atstumas tarp rinklių centrų	152,4	mm
	Aukštis	4470	mm
ŠIEL'as	Skersmuo	10,026	mm
	Aktyvus aukštis	3689,1	mm
	Atstumas tarp ŠIEL'ų centrų	12,95	mm
Dalinio ilgio ŠIEL'as	Skersmuo	10,026	mm
	Aukštis	2133,6	mm
Valdymo kryžius	Aukštis	4470	mm
	Skersmuo	250	mm
	Sienelės storis	8	mm
	Aušinimo skylių skersmuo	15	mm
Vandens strypas	Skersmuo	24,9	mm
	Aukštis	3689,1	mm

Kadangi pagrindinis šio darbo tikslas yra išanalizuoti tekančio fluideo termohidraulinius procesus, todėl buvo sukurtos ertmės. „Ertmė“ yra modeliavimo programos funkcija, kuri sukuria formą iš supaprastinto kuro rinklės modelio. Dėka šios funkcijos gauname naują vidinį skysčio užimamo tūrio modelį. Žinant tai, kad kuro rinklės geometrija yra simetriška išilginei ašiai, skaičiavimams buvo naudota tik ¼ - oji kuro modulio modelio.

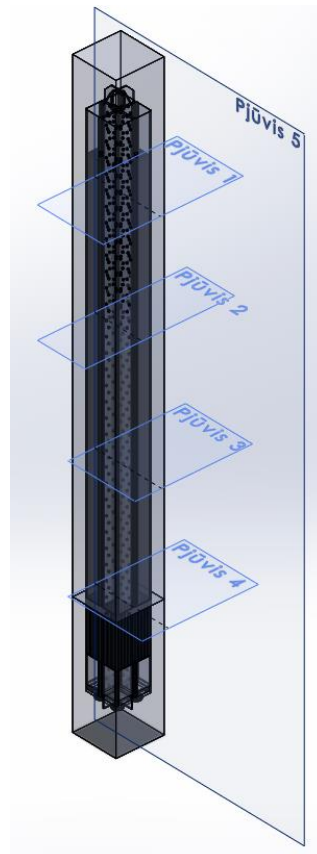


4.3 pav. Dalinio ir pilno ilgio ŠIEL'ų išsidėstymas

Vienas iš svarbesnių modelio suprastinimų buvo tas, kad modelis buvo sudalintas į penkias lygias dalis ir kiekviena dalis skaičiuota atskirai užduodant pirmos dalies vidutinę ištekėjimo temperatūrą kaip antrosios dalies įtekėjimo temperatūra. Toks sprendimas leidžia smarkiai sutaupyti skaičiavimo įrangos resursus ir neretai įgalina apskaičiuoti uždavinius, kurių be šio supaprastinimo būtų neįmanoma atlikti dėl skaičiavimo įrangos resursų nepakankamumo.



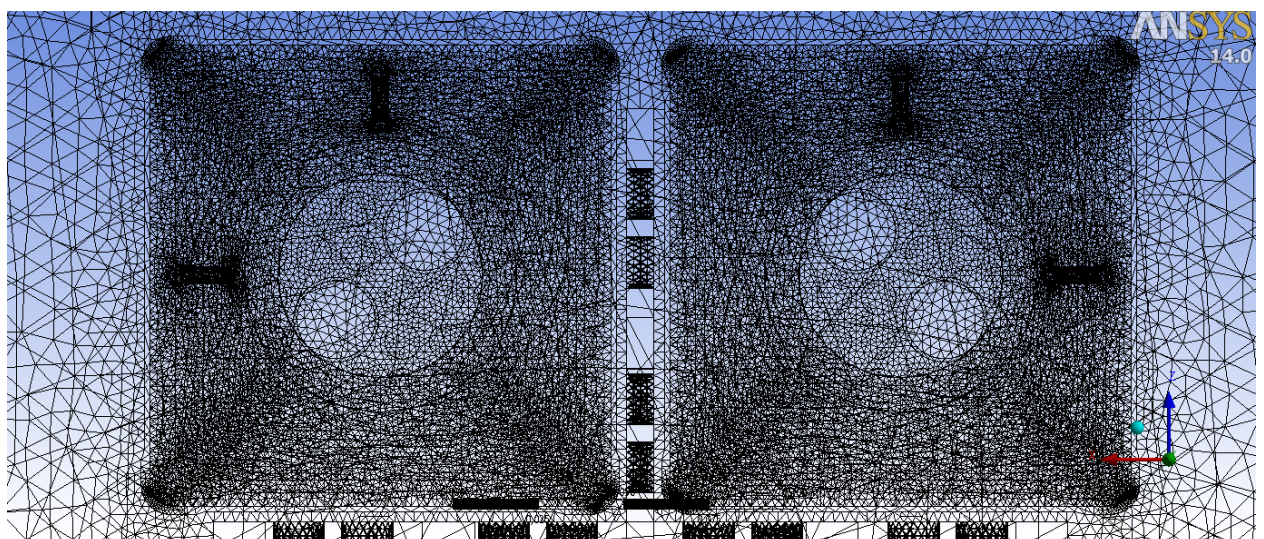
4.4 pav. „Ertmės“ sudarymo pavyzdys



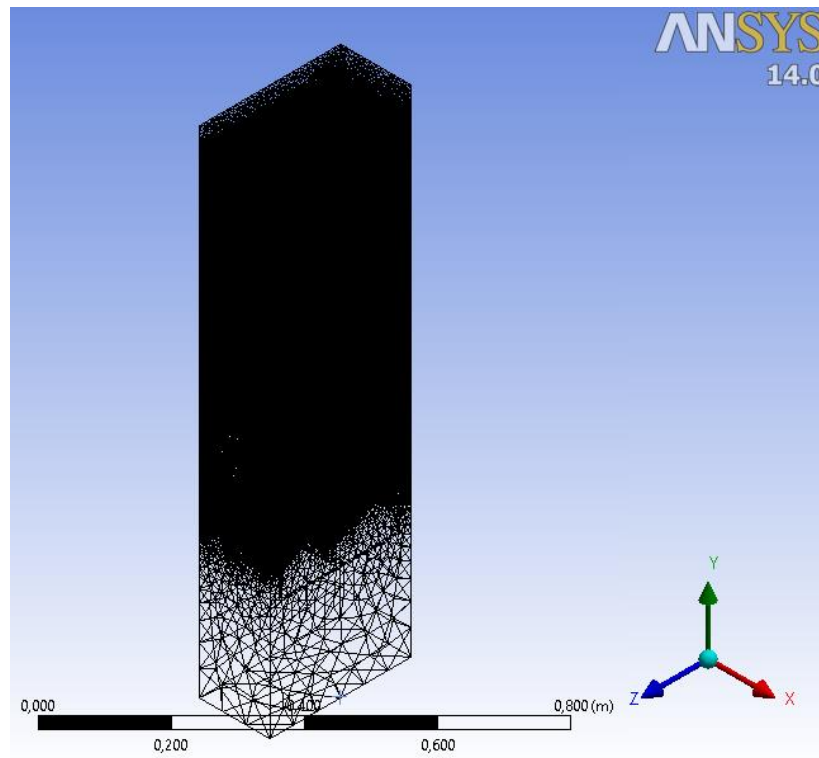
4.5 pav. Modelio sudalinimas į atskiras dalis

4.2 Tinklelio sudarymas

Kadangi fluidas teka pro kuro rinklę, fluideo molekulės prilimpa prie sienelių. Esant nedideliui atstumui nuo sienelių, molekulės nebeprilimpa, tačiau yra sulėtinamos dėl sąveikos su tomis, kurios yra prilipusios prie sienelių. Šis sluoksnis lėtina sluoksnį esantį virš jo, tačiau poveikis yra silpnesnis. Šis efektas sukuria ploną pasienio sluoksnį, kuriame greitis kinta nuo 0, molekulėms esant ant sienelių, iki nesutrukdyto molekulių srauto, esančių toli nuo sienelės. Tam, kad būtų galima pastebėti šį efektą, reikalinga sukurti tinklą, kuris apgaubtų tiriamųjų elementų sienelės.



4.6 pav. $\frac{1}{2}$ -ios kuro modulio tinklelio vaizdas iš viršaus.



4.7 pav. 1-os modelio dalies tinklelio 3D vaizdas

4.3 Kraštinės sąlygos

Kitas etapas sprendžiant modeliavimo uždavinį – nusakyti kraštinės sąlygas. Yra būtina nusakyti įeinančio srauto greitį ar debitą, vidutinį šilumos srautą, ašinį šilumos srauto pasiskirstymą, įeinančio srauto temperatūrą ir fluideo slėgį, tam kad būtų galima iširti termo-hidraulinę fluideo elgseną supaprastintame kuro rinklės modelyje.

Remiantis literatūros šaltiniu [1], debitas, tekantis per reaktoriaus aktyviąją zoną yra lygus 52,2 Mkg/h. Iš čia nesunku rasti koks debitas tekės pro vieną kuro rinklę:

$$G_{k.r} = \frac{G_{a.z}}{n} = \frac{52,2 \text{ Mkg/h}}{872} = 59,86 \text{ t/h} \quad (15)$$

Čia $G_{k.r}$ -debitas tekantis per vieną kuro rinklę, $G_{a.z}$ - debitas, tekantis per reaktoriaus aktyviąją zoną, n – kuro rinklių skaičius [12]. Tačiau toks debitas būna reaktoriaus normalios eksploatacijos metu. Šiame darbe bus nagrinėjamas atvejis, kuomet reaktorius yra visiškai sustabdytas ir po jo sustabdymo yra praėjusios 24 h. Tokiu atveju reaktoriaus aktyviojoje zonoje išsiskiria tik vadinamoji „likutinė“ šiluma. Reaktorių sustabdžius, jo aktyviojoje zonoje išsiskirianti šiluma staiga sumažėja ir siekia 5– 6 % nuo pradinės galios. Bėgant laikui likutinės šilumos išsiskyrimas ir toliau mažėja. Jos priklausomybę nuo laiko galima rasti įvairioje literatūroje pateiktuose grafikuose arba esant konkrečių reikšmių poreikiui, galima pasinaudoti Way –Wigner formule ir rasti likutinės šilumos išsiskyrimo dydį po pasirinkto laiko intervalo. Way – Wigner formulė atrodo taip:

$$W_{liek} = 0,064 \cdot W_0 \cdot [t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] \quad (16)$$

Čia t – laikas po reaktoriaus sustabdymo (s), T – laikas, kurį reaktorius dirbo iki sustabdymo (s), W_0 – reaktoriaus, kuro rinklės ar kuro tabletės (priklausomai nuo to kas skaičiuojama) galia prieš sustabdant. Pradinį šilumos srautą, kuris išsiskiria viename kuro modulyje, galima rasti bendrą pilno ir dalinio ilgio ŠIEL'ų ilgių sumą padauginus iš vidutinio šilumos išsiskyrimo tankio [13].

Kadangi debitas yra ieškomas tik vienam kuro moduliui, apskaičiuojant W_0 reikia susumuoti atskirų dalinio ir pilno ilgio ŠIEL'ų išskiriamą šilumos srautą:

$$W_0 = \frac{(L_1 \cdot n_1 + L_2 \cdot n_2)}{1000} \cdot q_{vid} \quad (17)$$

Čia L_1, L_2 – pilno ir dalinio ilgio šielų ilgiai (m), n_1, n_2 – pilno ir dalinio ilgio šielų kiekiai kuro modulyje (vnt), q_{vid} - vidutinis šilumos išsiskyrimo tankis (kW/m).

Apytiksliai žinant, kiek šilumos išsiskirs reaktoriaus aktyviojoje zonoje, galima numatyti ir parinkti optimalesnį šilumnešio debitą, nes jis nuo pradinio gali skirtis dešimtimis ar net šimtus kartų, priklausomai nuo to, kiek laiko praėjo nuo reaktoriaus sustabdymo.

Optimalesnį šilumnešio debitą galima rasti išsireiškus šį dydį iš šilumos masių balanso lygties žinant norimos nuvesti šilumos kiekį, savitąją aušalo temperatūrą bei įtekančio ir ištekančio aušalo temperatūras. Galutinė lygties išraiška atrodo taip:

$$G = \frac{W_{liek}}{c_p \cdot (T_1 - T_2)} \quad (18)$$

Čia G – šilumnešio debitas (kg/s), W_{liek} – likutinė šiluminė galia (W), c_p – savitoji izobarinė šiluma kJ/kg, T_1 ir T_2 - atitinkamai ištekančio ir įtekančio fluideo temperatūros °C.

Temperatūra T_1 yra parenkama vadovaujantis tokiu principu, kad ji užtikrinus reikiamą šilumnešio debitą būtų 10 % žemesnė už vandens soties temperatūra prie tų pačių parametru. Tai garantuos, kad šilumnešis tekėdamas pro kuro modulį neužvirs ir efektyviai aušins kuro rinklę. Temperatūra T_2 yra parenkama tokia pati kaip ir maitinančio vandens temperatūra normalios eksploatacijos metu t.y. 215 °C. Vandens savybės, tokios kaip savitoji izobarinė šiluma ir soties temperatūra yra randamos literatūroje [12].

Tarpinio skaičiavimo rezultatai ir šilumnešio debitas kuro moduliui bei atitinkamai jo pusei pateikiami 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė Likutinės šilumos ir debito skaičiavimo tarpiniai rezultatai

Parametras	Kuro modulis	1/2 Kuro modulio	1/4 Kuro modulio
Pilno ilgio ŠIEL'ai, vnt.	312	156	78
Dalinio ilgio ŠIEL'ai, vnt.	56	28	14
Pilno ilgio ŠIEL'o ilgis, m.	3,689	3,689	3,689
Dalinio ilgio ŠIEL'o ilgis, m.	2,134	2,134	2,134
ŠIEL'ų užimamas plotas, m ²	39,893	19,947	9,973

Parametras	Kuro modulis	1/2 Kuro modulio	1/4 Kuro modulio
Vidutinis šilumos išsiskyrimo tankis kW/m	13,6	13,6	13,6
Pradinė galia, MW	17,279	8,639	4,320
Pradinė galia, MW/m ²	0,433	0,433	0,433
Laikas, kurį reaktorių dirbo iki sustabdymo (s)	6,31E+07	6,31E+07	6,31E+07
Laikas po reaktoriaus sustabdymo (s)	86400	86400	86400
Likutinė šiluma, W ₀ , kW	83,412	41,706	20,853
Likutinė šiluma W₀, kW/m²	2,0909	2,0909	2,0909
W _{liek} /W ₀	0,005	0,005	0,005
W ₀ /W _{liek}	207,146	207,146	207,146
Vidutinis šilumos išsiskyrimo tankis po sustabdymo kW/m	0,066	0,066	0,066
Valdymo strypo likutinė šiluma, kW/m ²	0,371	0,185	0,093
Savitoji izobarinė šiluma, kJ/kgK	4,612	4,612	4,612
Įtekančio aušalo temperatūra, K	488,2	488,2	488,2
Ištekančio aušalo temperatūra, K	509,6	509,6	509,6
Slėgis, bar	71,7	71,7	71,7
T _{sot} , K	560,6	560,6	560,6
Nuvedamos šilumos atsargos koeficientas	1,1	1,1	1,1
Debitas, kg/s	0,841	0,421	0,210

Kaip matome iš pateiktos lentelės, apskaičiuotas debitas yra tik 0,841 kg/ s, kuomet reaktoriui dirbant nominaliu režimu debitas siekia 16,63 kg/s t.y. ~20 kartų didesnis nei reikalingas užtikrinant 10 % atsargą nuo šilumnešio virimo temperatūros T_{sot}.

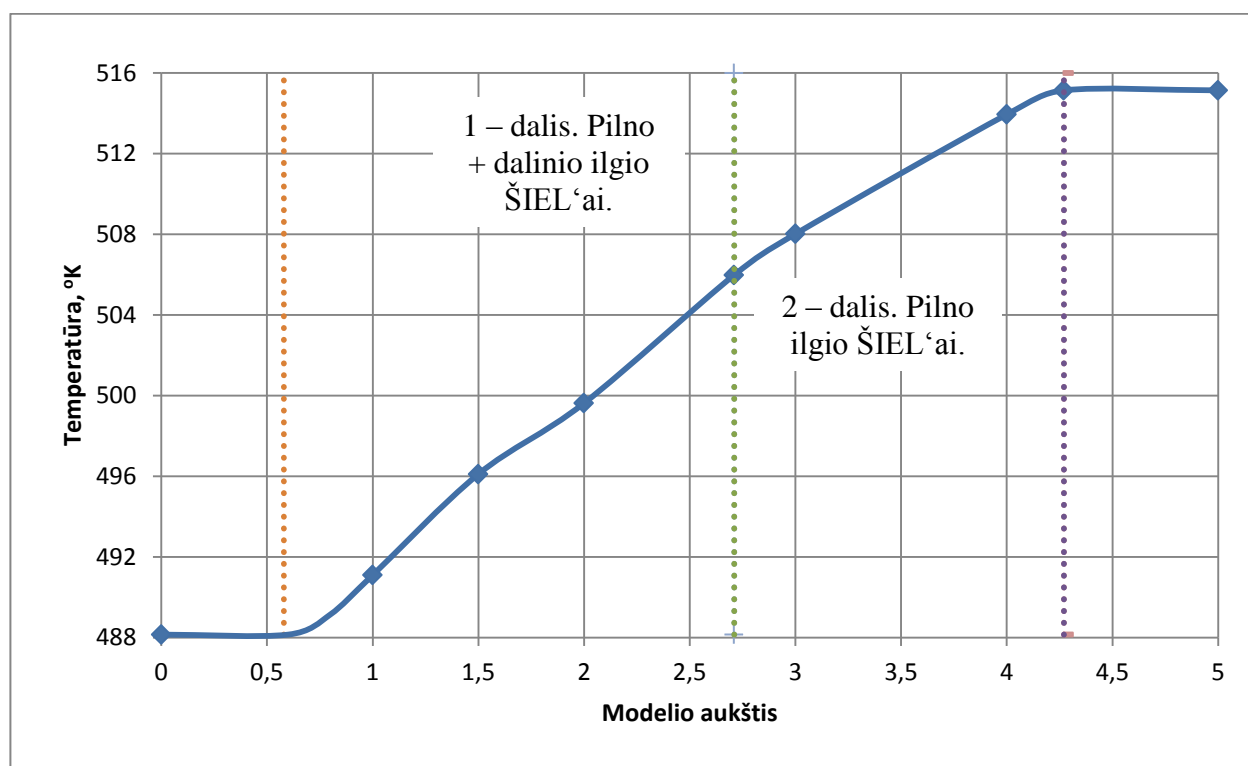
Modeliuojant tekėjimą galima naudoti ir fluido įtekėjimo greitį (m/s), tačiau rezultatas nuo to neturėtų keistis. Turbulencijos modeliu buvo pasirinktas k-omega modelis.

5 MODELIAVIMAS IR REZULTATAI

Paskutinis šio darbo etapas yra skaičiavimo atlikimas ir rezultatų analizė. Gauti rezultatai leis įvertinti modelio tikslumą ir patikimumą.

Skaičiavimo rezultatai parodė, kad šilumnešis, tekėdamas per kuro modulį pašilo nuo 488 iki 515 K (žr. 5.1 pav.) t.y., šilumnešio temperatūra pakilo 27 K, kuomet $T_{\text{tot}}=560,6$ K. Galima teigti, kad likutinės šilumos perdavimas yra visiškai užtikrinamas ir branduolinis reaktorius yra apsaugotas nuo šilumnešio užvirimo.

Atliekant debito skaičiavimus, šilumnešio temperatūra buvo pasirinkta 509,6 K ir nuo apskaičiuotosios skyrėsi 6 K. Toks neatitikimas galėjo atsirasti dėl netinkamai imituojamos vandens strypų aušinimo funkcijos. Tikroje kuro rinklėje vandens strypai yra porėti ir tekėdamas šilumnešis juose maišosi taip suintensyvindamas šilumos perdavimą iš centrinės kuro rinklės. Tačiau siekiant supaprastinti modelį, vandens strypai buvo sumodeliuoti kaip tuščiaviduriai strypai. Skaičiavimų netikslumui taip pat įtakos galėjo turėti ir tinklelio kokybės trūkumas.



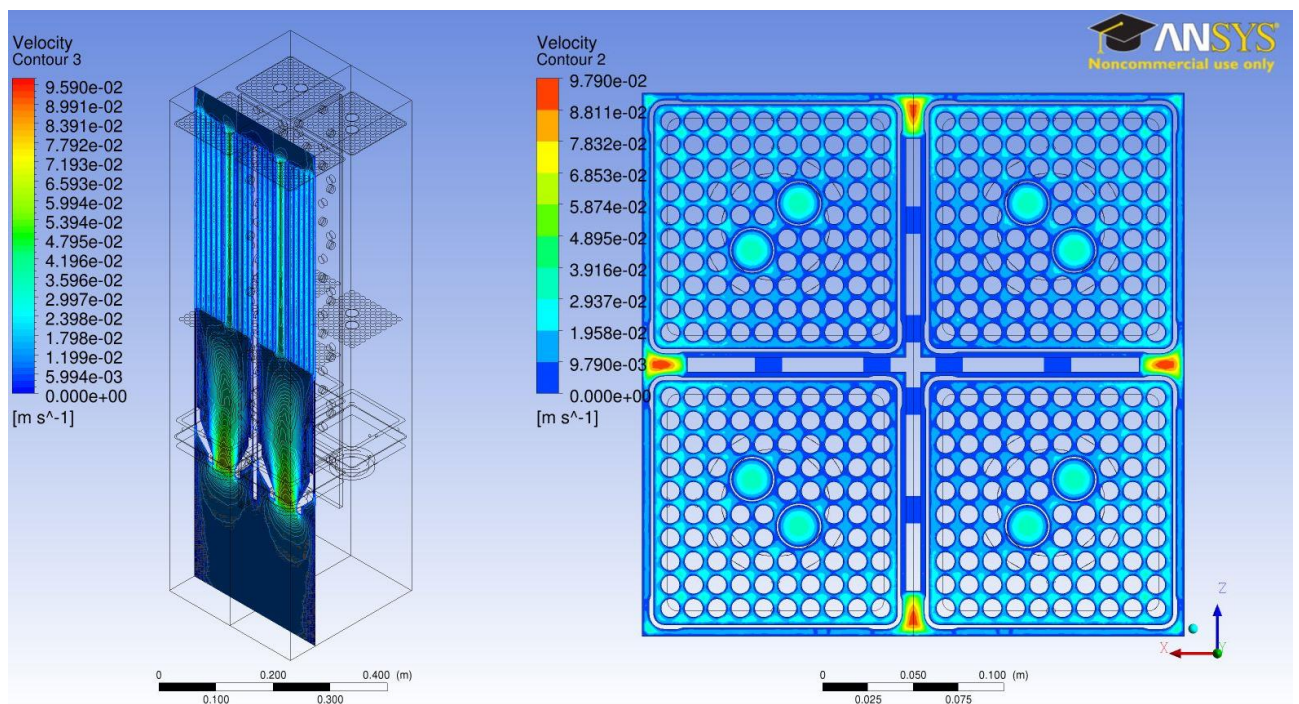
5.1 pav. Šilumnešio temperatūros kitimas per visą modelio aukštį

Iš 5.1 pav. matyti, kad šilumnešis tekėdamas pro kuro rinklę šilo laipsniškai, tačiau skirtingose zonose t.y., pirmoje ir antroje dalyse skirtingai. Skirtingą šilimo laipsnį lėmė tai, kad pirmoje kuro rinklės dalyje yra sumontuoti ir pilno ir dalinio ilgio ŠIEL'ai, o antroje dalyje dalinio ilgio ŠIEL'ai, kadangi yra trumpesni, jau yra pasibaigę ir likę tik pilno ilgio ŠIEL'ai. Toks konstrukcinis sprendimas yra priimtas neveltui, tuo yra siekiama sutolyginti šilumos išsiskyrimo profilį per aktyviosios zonos aukštį. Šilumos išsiskyrimo profilis taip pat būna tolyginimas ir skersai

aktyviosios zonos. Tai yra daroma naudojant skirtingo įsodrinimo kuro rinkles arba sukeičiai naujasnes kuro rinkles su labiau išdegusiomis.

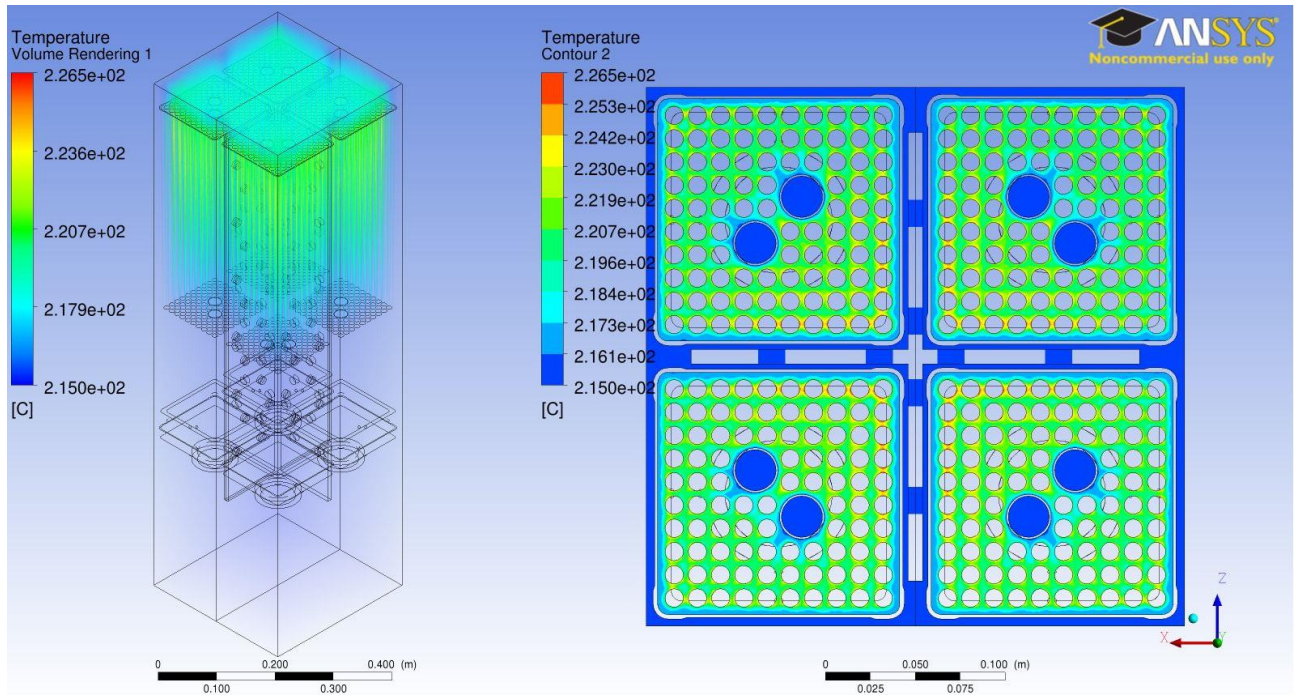
5.1 lentelė Įtekančio ir ištekančio šilumnešio temperatūros

Modelio aukštis	Temperatūra	Skirtumas
0	488,15	-
1	491,102	2,952
2	499,628	8,526
3	508,018	8,39
4	513,944	5,926
5	515,139	1,195



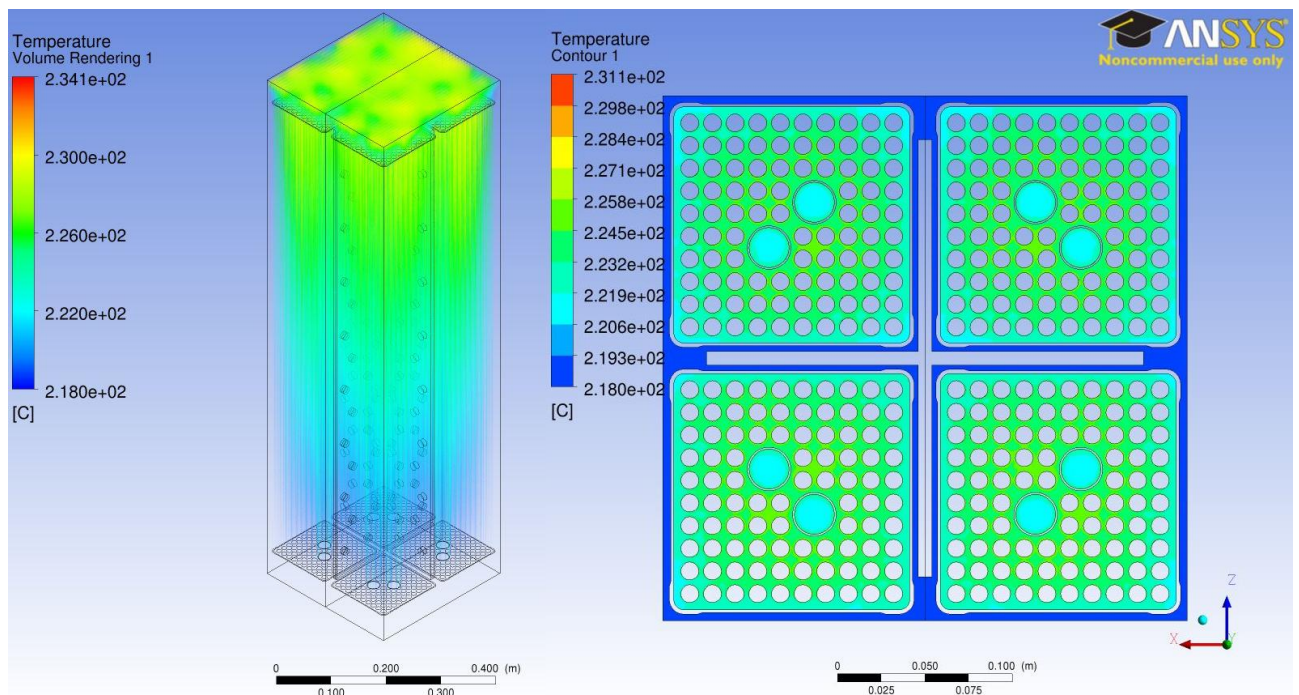
5.2 pav. Greičio profilis pirmos modelio dalies išilginiame ir išėjimo pjūviuose

5.2 pav. matome, kad fluidas į kuro rinklę įteka pro susiaurėjimą, todėl galima pastebėti, kad šilumnešio greitis šioje zonoje padidėjo ~4-5 kartus. Ištekančio fluideo iš pirmosios modelio dalies pjūvyje matome, kad didžiausias tekėjimo greitis yra vandens strypų viduje kadangi jų laisvo tekėjimo skerspjūvis yra didžiausias. Kadangi pirmoje modelio dalyje ŠIEL'ai yra išdėlioti tolygiai, greitis taip pat tolygiai tarp jų ir pasiskirsto. Neženkliūs nukrypimai galimi dėl įtekančio fluideo turbuliacinių zonų susidarymo, kadangi įtekėjusio fluideo srautas nespėja nusistovėti pastoviam tekėjimo režime.



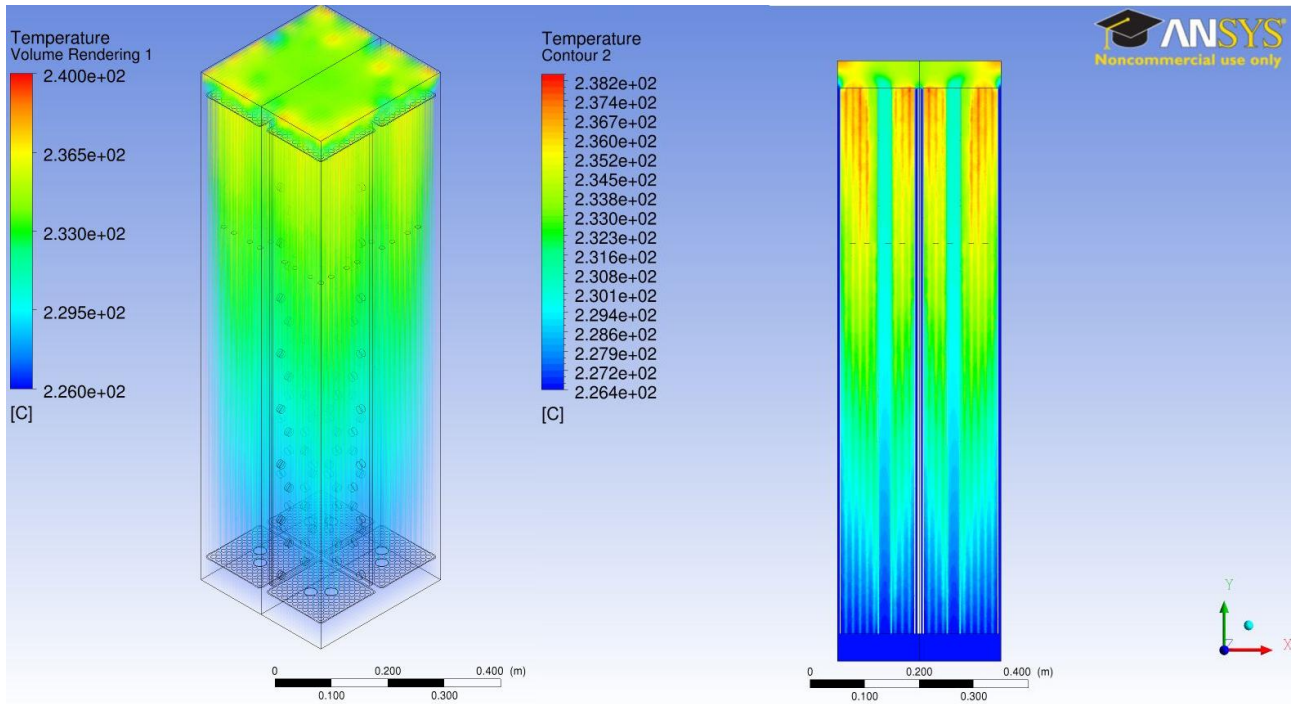
5.3 pav. Temperatūros pasiskirstymas pirmos modelio dalies tūryje ir išėjimo pjūvyje

5.3 pav. matome, kad šilumnešis pradeda tolygiai šilti vos pasiekęs šiluminius elementus visame tūryje. Kadangi pirmojoje modelio dalyje šiluminių elementų ilgis yra trumpesnis nei 2 ar 3 dalies, šilumnešis pašyla tik 2,952 °C.



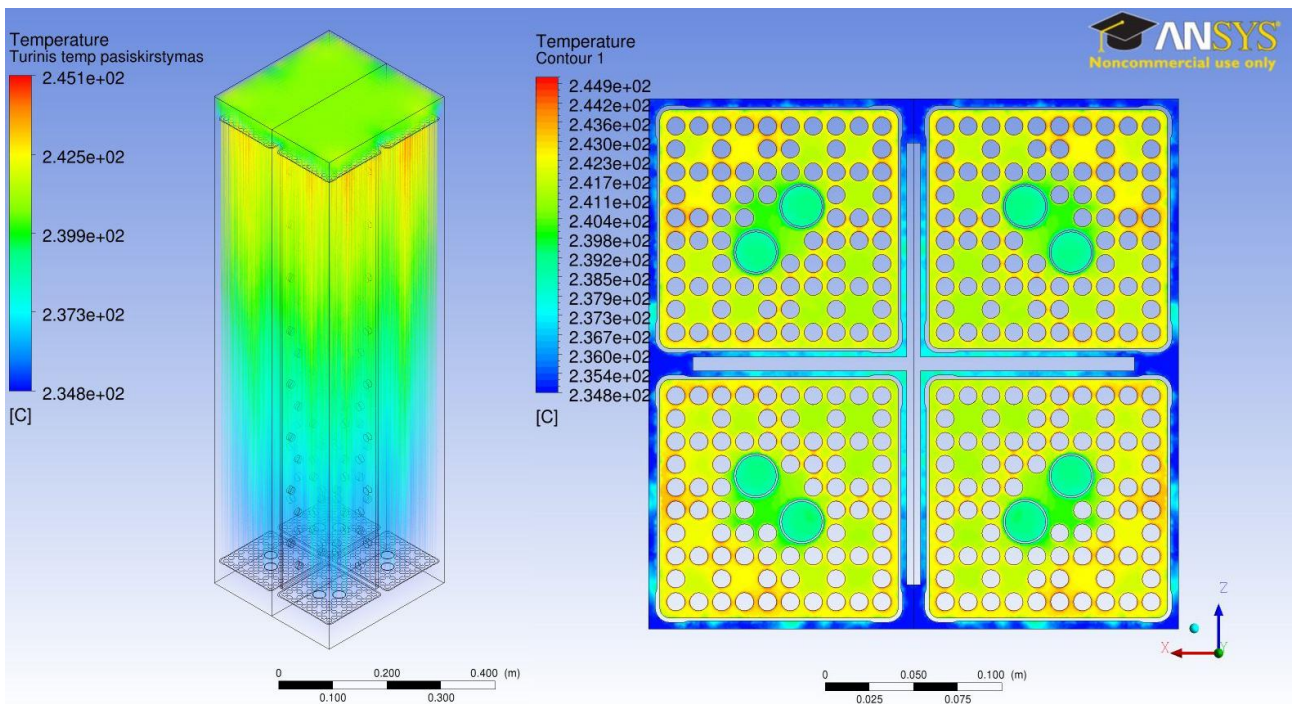
5.4 pav. Temperatūros pasiskirstymas antros modelio dalies tūryje ir pjūvyje per viduriniame skersiniame pjūvyje.

Per visą antros modelio dalies aukštį tolygiai yra išsidėstę ir pilno ir dalinio ilgio ŠIEL'ai, todėl šioje zonoje šilumnešis pašyla daugiausiai ir siekia 8,526 °C.



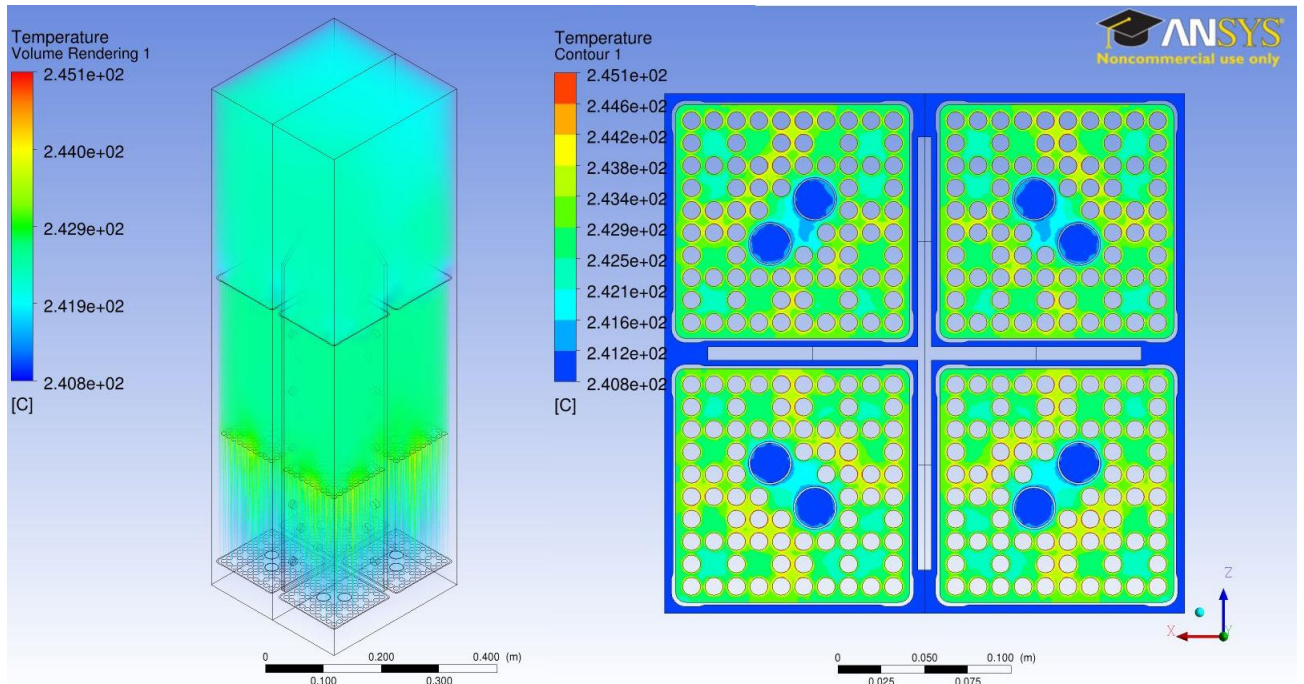
5.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas trečios modelio dalies tūryje ir išiliniame pjūvyje

Kadangi dalinio ilgio šiluminių elementų ilgis tėra tik $\sim 2/3$ pilno ilgio šiluminių elementų ilgio, trečiojoje modelio dalies antrojoje pusėje jie baigiasi ir todėl šilumnešis pašyla mažiau nei antrojoje dalyje. Trečiojoje dalyje šilumnešis pašyla $8,39^\circ\text{C}$.



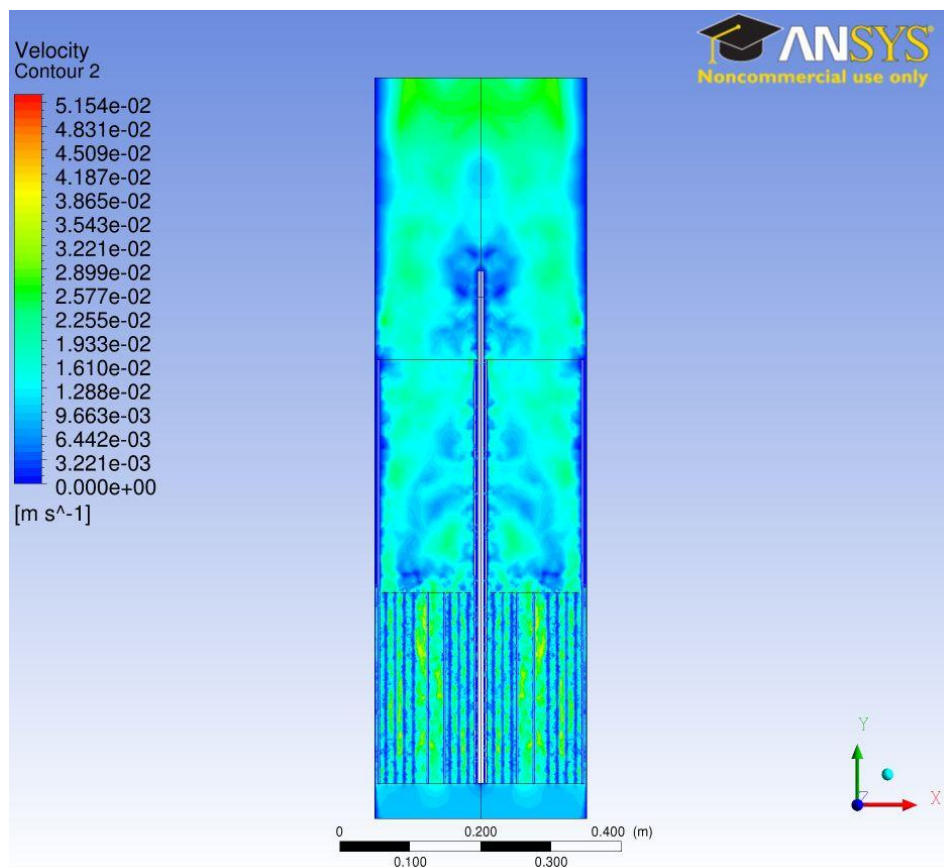
5.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas ketvirtos modelio dalies tūryje ir išėjimo pjūvyje

Kadangi ketvirtojoje modelio dalyje yra likę tik pilno ilgio šiluminiai elementai, 5.6 pav. galime pastebėti, kad atsiranda skirtingo išilimo laipsnio zonos, tačiau ir prasčiau aušinamose zonose, šilumnešis nepasiekia soties temperatūros kuri yra lygi 560 K esant $71,7\text{ bar}$ darbiniam slėgiui.



5.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas penktojoje modelio dalies tūryje ir išėjimo pjūvyje

Paskutinėje modelio dalyje temperatūrų pasiskirstymas išlieka toks pat kaip ir ketvirtojoje dalyje. Iš 5.8 pav. pavaizduotų greičių profilio matome, kad ištekancio fluideo srautas yra itin netolygus ir smarkiai maišosi, todėl temperatūra per visą skerspjūvį greitai nusistovi.



5.8 pav. Greičio profilis penktosios modelio dalies išilginiame pjūvyje

6 IŠVADOS

1. Atlikta pagrindinių pažangiojo verdančio vandens reaktoriaus ABWR dalių analizė parodė, kad viena svarbiausių dalių nagrinėjant termohidraulinius procesus aktyviojoje zonoje yra kuro modulis, kuris ir buvo pasirinktas modeliavimui.
2. Išanalizavus ANSYS programų paketo ypatybes ir ANSYS FLUENT programinės įrangos galimybes, galima teigti, kad šis įrankis puikiai tinka darbo tikslų įgyvendinimui.
3. Sudarytas kuro modulio tiriamasis modelis – sukurta jo geometrija, tinklas bei apibrėžtos kraštinės sąlygos.
4. Atlikus skaičiavimus, gauti rezultatai parodė, kad apskaičiuotas šilumnešio debitas užtikrina likutinės šilumos perdavimą.
5. Gauta šilumnešio temperatūra išėjime yra 5,539 K didesnė nei buvo priimta debito, reikalingo perduoti likutinei šilumai, skaičiavimuose;
6. Sukurtas tiriamas modelis apytiksliams skaičiavimams yra tinkamas, tačiau reikalingi patikslinimai norint gauti tikslesnes tarpines reikšmes. Modelis taip pat tinkamas tolimesniam plėtojimui.

7 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. ABWR Plant General Description, General Electric, 2006, Prieiga per internetą: <http://www.fornuclear.org/images/stories/recursos/zona-descarga/Descripcion_general_ABWR_GE.pdf> [žiūrėta 2015-04-12]
2. Visagino AE technologija – pažangusis verdančio vandens reaktorius ABWR http://www.vae.lt/files/apie_visagino_ae_tehnologija.pdf (paskutinį kartą žiūrėta 2015-05-24)
3. Jonas Gylys. Pasirinkta naujosios Visagino AE technologija – itin saugi, 2015-05-24, Prieiga per internetą: <http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-22913/straipsnis/Jonas-Gylys-Pasirinkta-naujosios-Visagino-AE-technologija--itin-saugi-?l=2&p=1> [žiūrėta 2015-04-12]
4. Gylys J., Pasirinkta Visagino AE technologija – pažangusis ABWR reaktorius, Mokslas ir technika, -05-24, Prieiga per internetą: <<http://www.mokslasirtehnika.lt/mokslonaujienos/pasirinkta-visagino-ae-technologija-pazangusis-abwr-reaktorius.html>> [žiūrėta 2015-04-12]
5. Shelton, S. B, GE14 Fuel Rod Thermal-Mechanical Design Report, January 2006
6. Atominių elektrinių branduoliniai energetiniai įrenginiai, vadovėlis inž. profilio aukšt. mokyklų stud /Gylys J., . Kaunas: Technologija Ašmantas L., 2011, 155-156 p.
7. AGACAD, ANSYS Professional, Prieiga per internetą: < <http://www.agacad.lt/paslaugos/programine-iranga/ansys-professional>> [žiūrėta 2015-05-24]
8. R. Bhaskaran, L. Collins, Introduction to CFD Basics, 2003, 17 p.
9. ANSYS FLUENT Getting Startes Guide, ANSYS, Inc., 2013, 46 p. Prieiga per internetą: <<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Getting%20Started%20Guide.pdf>> [žiūrėta 2015-05-24]
10. ANSYS Fluent Meshing User,s Guide,2013, 700 p., Prieiga per internetą: <<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Meshing%20Users%20Guide.pdf>> [žiūrėta 2015-05-24]
11. Nuclear engineering international | Fuel review – design data, 2012, www.neimagazine.com
12. Šiluminė technika: vadovėlis aukšt. m-klų studentams / Gimbutis G., Kajutis K., Krukonis V., Pranckūnas A., Švenčianas P. Vilnius: Mokslas, 1993, 333 p.
13. Ketvirtoji JEK paskaita: ABWR technologijos, 2008-07-01, Prieiga per internetą: < http://www.jek.lt/2011/11/ketvirtoji-jek-paskaita-abwr_01.html> [žiūrėta 2015-04-12]
14. J. Gylys, Branduolinės inžinerijos įvadas, / 1997, Technologija, 296p.

8.1 A PRIEDAS. Publikacijų kopijos

8.1.1 A. Čepelė Branduolinio reaktoriaus aktyviosios zonos termohidraulinių procesų modelis ANSYS Fluent programų paketo aplinkoje.

KTU Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

2015 gegužės 14 d., Kaunas

*Jaunųjų mokslininkų konferencija
„PRAMONĖS INŽINERIJA 2015“*

BRANDUOLINIO REAKTORIAUS AKTYVIOSIOS ZONOS TERMOHIDRAULINIŲ PROCESŲ MODELIS ANSYS FLUENT PROGRAMŲ PAKETO APLINKOJE

Augustas Čepelė¹

¹ *Kauno technologijos universitetas, Šilumos ir atomo energetikos katedra, adresas Studentų g. 56-438, LT-51424 Kaunas, el. paštas: augustas.cepele@ktu.edu*

Raktiniai žodžiai: ABWR, ANSYS, FLUENT.

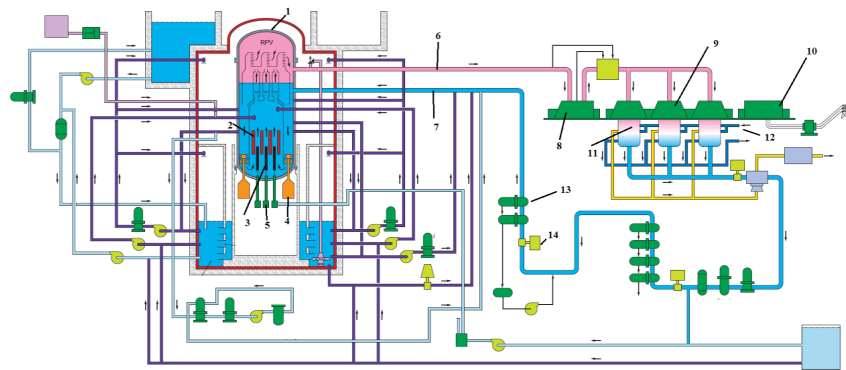
1. Įvadas

Uždarius Ignalinos atominę elektrinę, Lietuvoje planuojama statyti naują Visagino atominę elektrinę. Šios elektrinės strateginiu investuotoju buvo pasirinkta kompanija Hitachi-GE, kuri ketina statyti pažangųjį verdančio vandens reaktorių - ABWR (angl. Advanced boiling water reactor). Todėl šio tipo reaktoriai šiuo metu yra aktualūs Lietuvai.

Kadangi šis projektas susilaukė nemažai neadekvataus pasipriešinimo ir propagandos skleidimo, svarbu visokeriopai apšviesti visuomenę atskleidžiant ir parodant visas šio projekto puses. Žmonių baimė dažniausiai kyla iš nežinojimo arba dar blogiau – iš klaidingos ir konkrečiai šaliai parankios informacijos. Todėl būtina supažindinti visuomenę su šio reaktoriau privalumais iš techninės pusės tam kad būtų numalšintos nepagrįstos baimės, kurios trukdo plėtoti Visagino atominės elektrinės statybos projektui.

2. ABWR reaktoriaus ypatybės

ABWR reaktoriaus principinė schema yra tipinė kaip ir visų verdančio vandens reaktorių. Juose vanduo užverda tiesiai aktyviojoje zonoje ir čia pat išgaruoja. Iš susidariusio vandens garo yra atskiriami vandens lašeliai, garas perkaitinamas ir vamzdžiais tiekiamas į garo turbiną, kurioje jis plečiasi ją sukdamas, o ši – elektros generatorių. Garui atidirbus, jis toliau siunčiamas pro kondensatorių, kur likutinė garo energija yra atiduodama žemesnės temperatūros vandens telkiniui ar aušinimo bokštui ir garas yra sukondensuojamas. Toliau kondensatas gražinamas atgal į aktyviają zoną ir ciklas prasideda iš naujo.



1 pav. Principinė atominės elektrinės su ABWR reaktoriumi schema [1]

Čia 1 – reaktoriaus korpusas, 2 – branduolinis kuras, 3 – valdymo strypas, 4 – vidinis cirkuliacinis siurblys, 5 – valdymo strypo variklis, 6 – garo linija, 7 – kondensato linija(maitinimo vandens), 8–aukšto slėgio turbina, 9–žemo slėgio turbina, 10–elektros generatorius, 11–garo kondensatorius, 12 – kondensatoriaus aušinimo vanduo, 13 – aukšto slėgio pašildytuvai, 14 – pagrindinis cirkuliacinis siurblys.

Apsauginis reaktoriaus kevalas yra cilindrinės formos korpusas, pagamintas iš įveržto gelžbetonio, padengto plieno lakštais. Tai pirminis apsauginis gaubtas. Kadangi apatinėje reaktoriaus slėginio korpuso dalyje nėra išorinių recirkuliacijos siurblių ir šio kontūro vamzdynų, ABWR reaktorių kevalas yra kur kas mažesnis nei ankstesnės kartos BWR reaktorių.

Reaktoriaus korpusas yra pagamintas iš mažaanglio plieno. Tuo buvo siekiama padidinti atsparumą korozijai. Papildomai vidinė korpuso dalis padengta korozijai atsparaus plieno sluoksniu. Toks korpusas yra atsparesnis spinduliuotės poveikiui kuri sklinda iš reaktoriaus aktyviosios zonos, todėl jis yra ilgaamžiškesnis. Didžioji korpuso dalis (beveik 1000 t masės) iškalta iš vientiso ruošinio. Tai pašalina 30 % suvirinimo siūlių iš reaktoriaus juostinės dalies, kurioms periodiškai yra reikalinga atlikti patikrą. Be to korpusas turi ir mažiau atvamzdžių, žemiau aktyviosios zonos nėra nė vienos angos, kurios skersmuo būtų didesnis negu 5 cm. Visa tai padidina korpuso integralumą ir sumažina galimybę prarasti aušinančio šilumnešio aktyviają zoną [2].

3. Programų paketo specifika

ANSYS programų paketas - lengvai naudojamas, atliekantis inžinerinę (struktūrinę / terminę) projektų analizę baigtinių elementų metodu. Paketą sudaro struktūrinės, skysčių, elektronikos, geometrijos ir tinklelio sudarymo bei simuliacijos produktai.

Šiame programų rinkinyje yra įdiegti svarbiausi šiuolaikinių technologijų simuliacijos metodai, todėl programa sudaro galimybę vartotojui pasinaudoti aukšto lygio simuliacijos galimybėmis, nereikalaujama aukšto ekspertizės lygio. Taip pat šioje programoje vartotojas ras

pilną linijinių elementų rinkinį, daug netiesinių elementų, galimybę atlikti pilną montażą ir daug kitų vartotojui reikalingų funkcijų.

ANSYS FLUENT (CFD) yra aukšto lygio kompiuterinė programa skirta modeliuoti fluideo tekėjimą, šilumos perdavimą bei chemines reakcijas esant kompleksiniai tiriamo kūno geometrijai.

CFD yra skysčių mechanikos dalis, kuri naudoja skaitinius metodus ir algoritmus padedančius išspręsti ir analizuoti problemas, kurios atsiranda skysčiams tekant. ANSYS CFX ir CFD kuris taiko baigtinių tūrių metodą išspręsti Navje-Stokso lygtį. Ši lygtis yra diferencialinė lygtis nusakanti skysčių masės judėjimą. Ji susideda iš diferencialinė masių ir energijos tvermės dėsnų formos.

Lygtis (1) išreiškia masės tvermės dėsnį, kuris dažnai vadinamas tęstinumo lygtimi, nes ji nereikalauja jokių prielaidų išskyrus tai, kad tankis ir greitis yra tęstinumo funkcijos. Tai reiškia, kad srautas gali būti pastovus arba nepastovus, klampus arba be trinties, spūdas arba nesuspaudžiamas [6]. Tai dalinė diferencialinė lygtis apimanti tankį (ρ) ir ašinių greitį (u, v, w).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

Momento tvermės dėsnis yra fundamentalus gamtos dėsnis ir jis teigia, kad jeigu uždaroje sistemoje objektų neveiks išorinės jėgos, uždaros sistemos momentas išliks pastovus. Viena iš šio teiginio išvadų gali būti ta, kad bet kokių objektų sistemos masių centro greitis visada išliks pastovus, nebent sistema bus paveikta išorinių jėgų. Lygtyje (2) tankis, tekančio fluideo slėgis, klamos koeficientas ir laikas yra kintamieji.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

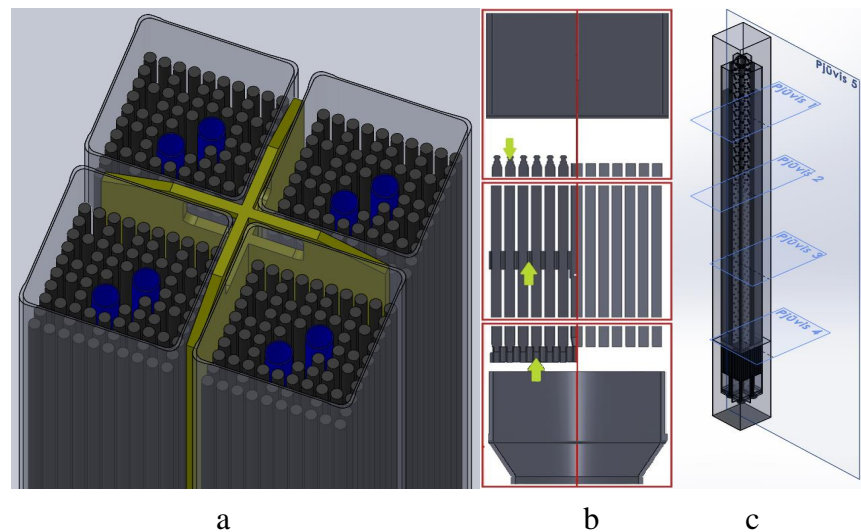
Energijos tvermės dėsnis (3) galioja Niutoniniams fluidams pačioms pagrindinėms nestabilumo, spūdomo, klamos, šilumos perdavimo srauto sąlygoms išskyrus neigiamą šilumos perdavimą spinduliavimu ir vidinių šilumos šaltinių kurie gali atsirasti vykstant cheminėms ar branduolinėms reakcijoms. Kintamieji lygtyje (3) yra tankis, judančio fluideo slėgis, vidinė energija (u), greitis (V), šiluminio laidumo koeficientas (k), temperatūros gradientas (∇T) ir laikas (t).

$$\rho \frac{du}{dt} + p(\Delta V) = \Delta(k \nabla T) + \phi \quad (3)$$

4. Modelio supaprastinimai ir kraštinės sąlygos

Nagrinėti branduolinio reaktoriaus aktyviają zoną kaip vieną vienetą įmanoma, tačiau modelio supaprastinimų sąrašas būtų labai ilgas, o jų patikimumas – abejotinas. Tam kad rezultatuose abejonės

neatsispindėtų arba jų įtaka būtų kuo mažesnė, buvo nuspręsta aktyviają zoną tirti skaidant ją į mažesnius elementus ir priimant kaip įmanoma mažiau supaprastinimų. Kaip tiriamasis elementas buvo pasirinktas kuro modulis ir valdymo kryžius tarp jų (2 pav.).



2 pav. a - Kuro modulio ir valdymo kryžiaus 3D vaizdas, b - kuro rinklės supaprastinimai, c - modelio sudalinimas į atskiras dalis.

Tinkamas modelio sudarymas yra pagrindinis veiksnys, lemiantis rezultatų tikslumą ir patikimumą. Nors ir skaičiavimo įranga yra smarkiai patobulėjusi nuo jos sukūrimo laikų, tačiau vis tiek tenka atsižvelgti į jos skaičiavimo galimybių ribas. Todėl sudarant modelio geometriją, skaičiavimo tinklelį bei parenkant kraštines sąlygas, vis tik tenka priimti, iš pirmo žvilgsnio, daug, tačiau būtinų supaprastinimų. Jie reikalingi tam, kad nebūtų peržengta skaičiavimo įrangos galimybių riba bei būtų pasiektas optimalus santykis tarp skaičiavimo greičio ir rezultatų tikslumo.

Priimti modelio supaprastinimai yra itin glaudžiai susiję su toliau einančiu etapu – tinklelio sudarymu. Sudėtingumą sudaro ne modelio dydis, o jo detalių smulkumas. Kiekvienas kampo užapvalinimas ar nereikalinga ertmė gali privesti prie to, kad tinklelio kūrimo trukmė padidės keletą kartų, o neretai gali atsitikti ir taip, kad tinklelis visai nebus sukurtas. Todėl itin svarbu tinklelio kūrimo etape tiksliai apsibrėžti tiriamąjį objektą ir norimus pasiekti rezultatus.

Turbūt svarbiausias ir daugiausiai įtakos turintis etapas visam modelio kūrimui yra kraštinių sąlygų (boundary conditions) nustatymui. Šiame etape būtina nusakyti įeinančio srauto greitį, vidutinį šilumos srautą, ašinį šilumos srauto pasiskirstymą, įeinančio srauto temperatūrą ir etaloninį fluideo slėgį tam kad būtų galima iširti termo-hidraulinį fluideo elgseną supaprastintame kuro rinklės modelyje.

Remiantis literatūros šaltiniu [1], debitas tekantis per reaktoriaus aktyviają zoną yra lygus 52,2 Mkg/h. Iš čia nesunku rasti koks debitas tekės pro vieną kuro rinklę:

$$G_{k.r.} = \frac{G_{a.z.}}{n} = \frac{52.2Mkg/h}{972} = 59.86t/h; \quad (4)$$

Čia $G_{k.r.}$ -debitas tekantis per vieną kuro rinklę, $G_{a.z.}$ - debitas tekantis per reaktoriaus aktyviają zoną, n – kuro rinklių skaičius.

Tačiau toks debitas būna reaktoriaus normalios eksploatacijos metu. Šiame darbe bus nagrinėjamas atvejis, kuomet reaktorius yra pilnai sustabdytas ir po jo sustabdymo yra praėjusios 24 h. Tokiu atveju reaktoriaus aktyviojoje zonoje išsiskiria tik vadinamoji „likutinė“ šiluma. Reaktorių sustabdžius, jo aktyviojoje zonoje išsiskirianti šiluma staigiai sumažėja ir siekia 5- 6 % nuo pradinės galios. Bėgant laikui likutinės šilumos išsiskyrimas ir toliau mažėja. Jos priklausomybę nuo laiko galima rasti įvairioje literatūroje pateiktuose grafikuose arba kai reikia konkrečių reikšmių, galima pasinaudoti Way –Wigner formule ir rasti likutinės šilumos išsiskyrimo dydį po pasirinkto laiko intervalo. Way – Wigner formulė atrodo taip:

$$W_{liek.} = 0.064 \cdot W_0 \cdot [t_1^{-0.2} - (t_1 + t_2)^{-0.2}]; \quad (5)$$

Čia t_1 – laikas po reaktoriaus sustabdymo (s), t_2 – laikas, kurį reaktorius dirbo iki sustabdymo (s), W_0 – reaktoriaus, kuro rinklės ar kuro tabletės (priklausomai nuo to kas skaičiuojama) galia prieš sustabdant. Pradinį šilumos srautą, kuris išsiskiria viename kuro modulyje, galima rasti bendrą pilno ir dalinio ilgio ŠIEL'ų (šiluminių elementų) ilgių sumą padauginus iš vidutinio šilumos išsiskyrimo tankio.

Apytiksliai žinant, kiek šilumos išsiskirs reaktoriaus aktyviojoje zonoje, galima numatyti ir parinkti optimalesnę šilumnešio debitą, nes jis nuo pradinio gali skirtis dešimtimis ar net šimtus kartų, priklausomai nuo to, kiek laiko praėjo nuo reaktoriaus sustabdymo.

Optimalesnę šilumnešio debitą galima rasti išsireiškus šį dydį iš šilumos masių balanso lygties žinant norimos nuvesti šilumos kiekį, savitąją aušalo temperatūrą bei įtekančio ir ištekančio aušalo temperatūras. Galutinė lygties išraiška atrodo taip:

$$G = \frac{N}{c_p(T_1 - T_2)}; \quad (6)$$

Čia G – šilumnešio debitas kg/s, N – šiluminė galia W, c_p – savitoji izobarinė šiluma kJ/kg, T_1 ir T_2 - atitinkamai ištekančio ir įtekančio fluideo temperatūros °C.

Temperatūra T_1 yra parenkama vadovaujantis tokiu principu, kad ji užtikrinus reikiamą šilumnešio debitą būtų 10 % žemesnė už vandens soties temperatūra prie tų pačių parametų. Tai garantuos, kad šilumnešis tekėdamas pro kuro modulį neužvirs ir efektyviai aušins kuro rinklę. Temperatūra T_2 yra parenkama tokia pati kaip ir maitinančio vandens temperatūra normalios eksploatacijos metu t.y. 215 °C.

Tarpinio skaičiavimo rezultatai ir šilumnešio debitas kuro moduliu bei atitinkamai jo pusei pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė
Likutinės šilumos ir debito skaičiavimo tarpiniai rezultatai

Parametras	Kuro modulis	1/2 Kuro modulio	1/4 Kuro modulio
Pilno ilgio ŠIEL'ai, vnt.	312	156	78
Dalinio ilgio ŠIEL'ai, vnt.	56	28	14
Pilno ilgio ŠIEL'o ilgis, m.	3,689	3,689	3,689
Dalinio ilgio ŠIEL'o ilgis, m.	2,134	2,134	2,134
Šielų užimamas plotas, m ²	39,893	19,947	9,973
Vidutinis šilumos išsiskyrimo tankis kW/m	13,6	13,6	13,6
Pradinė galia, MW	17,279	8,639	4,320
Pradinė galia, MW/m ²	0,433	0,433	0,433
Laikas, kurį reaktorius dirbo iki sustabdymo (s)	6,31E+07	6,31E+07	6,31E+07
Laikas po reaktoriaus sustabdymo (s)	86400	86400	86400
Likutinė šiluma, W ₀ , kW	83,412	41,706	20,853
Likutinė šiluma W ₀ , kW/m ²	2,0909	2,0909	2,0909
W_{liek}/W_0	0,005	0,005	0,005
W_0/W_{liek}	207,146	207,146	207,146
Vidutinis šilumos išsiskyrimo tankis po sustabdymo kW/m	0,066	0,066	0,066
Valdymo strypo likutinė šiluma, kW/m ²	0,371	0,185	0,093
Savitoji izobarinė šiluma, kJ/kgK	4,612	4,612	4,612
Įtekančio aušalo temperatūra, K	488,2	488,2	488,2
Ištekančio aušalo temperatūra, K	509,6	509,6	509,6
Slėgis, bar	71,7	71,7	71,7
T _{sot} , K	560,6	560,6	560,6
Nuvedamos šilumos atsargos koeficientas	1,1	1,1	1,1
Debitas, kg/s	0,841	0,421	0,210

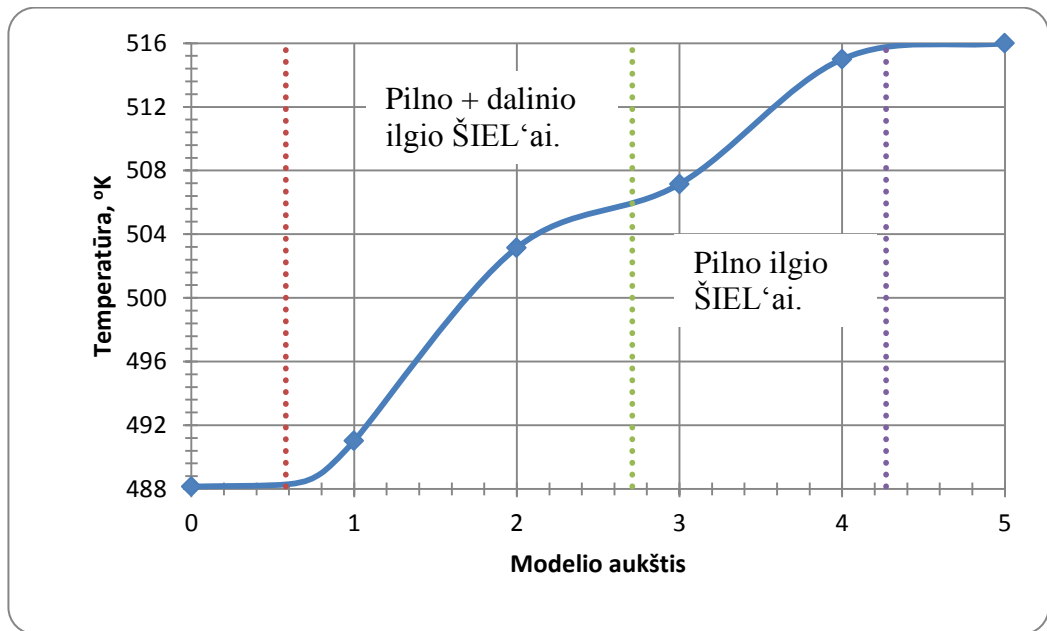
Modeliuojant tekėjimą galima naudoti ir fluideo įtekėjimo greitį (m/s), tačiau rezultatas nuo to neturėtų keistis. Turbulencijos modeliu buvo pasirinktas k-omega modelis

5. Modeliavimo rezultatai

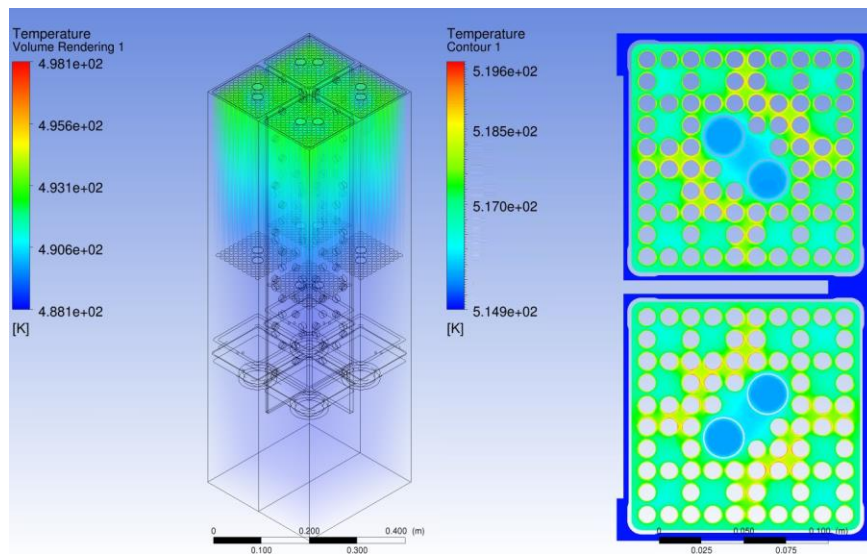
Skaičiavimo rezultatai parodė, kad šilumnešis tekėdamas per kuro modulį pašilo nuo 488 iki 516 K (žr. 3 ir 4 pav.) t.y. šilumnešio temperatūra pakilo 28 K, kuomet T_{sot}=560,6 K. Galima teigti, kad likutinės šilumos nuvedimas yra pilnai užtikrinamas.

Debito skaičiavimuose ištekančio šilumnešio temperatūra buvo priimta 509,6 K ir nuo apskaičiuotosios skyrėsi 7 K ir tai sudaro 1,37 % paklaidą. Tokia paklaida galėjo atsirasti dėl netinkamai imituojamos vandens strypų aušinimo funkcijos. Tikroje kuro rinklėje vandens strypai yra porėti ir tekėdamas šilumnešis juose maišosi taip suintensyvindamas šilumos nuvedimą iš centrinės kuro rinklės. Tačiau siekiant supaprastinti modelį, vandens strypai buvo sumodeliuoti kaip

tuščiaviduriai strypai. Skaičiavimų netikslumui taip pat įtakos galėjo turėti ir tinkelio kokybės trūkumas.



3 pav. Šilumnešio temperatūros kitimas per visą modelio aukštį



4 pav. Šilumnešio temperatūros pasiskirstymas pirmos dalies tūryje ir paskutinės dalies išėjime

6. Išvados

1. Gauti rezultatai parodė, kad apskaičiuotas šilumnešio debitas pilnai užtikrina likutinės šilumos nuvedimą;
2. Gauta šilumnešio temperatūra išėjime yra 7 K didesnė nei buvo priimta debito, reikalingo nuvesti likutiniai šilumai, skaičiavimuose;
3. Modelis apytiksliams skaičiavimams yra tinkamas, tačiau reikalingi patikslinimai norint gauti tikslesnes tarpines reikšmes.

Literatūra

1. ABWR Plant General Description, General Electric, 2006, Prieiga per internetą: <http://www.fornuclear.org/images/stories/recursos/zona-descarga/Descripcion_general_ABWR_GE.pdf> [žiūrėta 2015-04-12]
2. Jonas Gylys. Pasirinkta naujosios Visagino AE technologija – itin saugi, 2011-11-28, Prieiga per internetą: <http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-22913/straipsnis/Jonas-Gylys-Pasirinkta-naujosios-Visagino-AE-technologija--itin-saugi-?l=2&p=1> [žiūrėta 2015-04-12]
3. Ketvirtoji JEK paskaita: ABWR technologijos, 2008-07-01, Prieiga per internetą: <http://www.jek.lt/2011/11/ketvirtoji-jek-paskaita-abwr_01.html> [žiūrėta 2015-04-12]