



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

**Audrius Graževičius**

**BWR REAKTORIAUS PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO  
IŠLAIKYMO BASEINO TERMOHIDRAULINIŲ PROCESŲ  
STUDIJA**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Asist. Linas Paukštaitis

**KAUNAS, 2015**

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

TVIRTINU  
Katedros vedėjas  
Doc. dr. Egidijus Puida

**BWR REAKTORIAUS PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO**  
**IŠLAIKYMO BASEINO TERMOHIDRAULINIŲ PROCESŲ**  
**STUDIJA**

Baigiamasis magistro projektas  
Branduolinė energetika (kodas 621E32001)

**Vadovas**  
Asist. Linas Paukštaitis  
2015.05.27

**Konsultantas**  
Doc. dr. Arvydas Adomavičius  
2015.05.29

**Recenzentas**  
Doc. dr. Algimantas Balčius  
2015.05.29

**Projektą atliko**  
Audrius Graževičius  
2015.05.27

**KAUNAS, 2015**

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

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

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)  
Doc. dr. E. Puida  
\_\_\_\_\_  
(vardas, pavardė)

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

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

1. Darbo tema: „**BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino termohidraulinių procesų studija**“, „**Study of thermal-hydraulic processes in the spent nuclear fuel storage of the BWR reactor**“ .....

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

2. Darbo tikslas: **panaudojant ANSYS Fluent programinį paketą ištirti procesus, vykstančius panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine.** .....

3. Darbo struktūra: **procesų BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine analizė, esminės problemos; aušinimo poreikio, kitų ribinių sąlygų apibrėžimas, uždavinio algoritmo, modelio ir skaičiavimų programos formulavimas; vandens judėjimo bei sluoksniavimosi analizė, branduolinio kuro aušimo analizė, išvados ir rekomendacijos.** .

4. Reikalavimai ir sąlygos **ruošiant darbą vadovautis norminiais LR dokumentais, baigiamųjų darbų rengimo reikalavimais.** .....

5. Užbaigto darbo pateikimo terminas: **2015 m. birželio mėn. 03 d.**

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui ..... **Audriui Graževičiui**

Užduotį gavau **Audrius Graževičius** ..... **2014.02.17**  
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas **Asist. Linas Paukštaitis** ..... **2014.02.17**  
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

(Fakultetas)

**Audrius Graževičius**

(Studento vardas, pavardė)

**Branduolinė energetika (kodas 621E32001)**

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino termohidraulinių procesų studija“

**AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. birželio mėn. 01 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Audriaus Graževičiaus** baigiamasis projektas tema „**BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino termohidraulinių procesų studija**“ 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)

Graževičius, A. Study of thermal-hydraulic processes in the spent nuclear fuel storage of the BWR reactor. *Nuclear energy (code 621E32001)* final project / leader dr. Linas Paukštaitis / consultant doc. dr. Arvydas Adomavičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Thermal and Nuclear Energy.

Kaunas, 2015. 62 psl.

## **SUMMARY**

Due to the safety issues arising from the Fukushima accident, it is necessary to investigate the BWR 4 spent fuel pool in the Mark I type containment. Water circulation and spent fuel cooling phenomena are predicted using computational fluid dynamics (CFD). This study has reviewed the specifics of spent fuel pool, software packages for the modelling of thermal hydraulic processes in the spent fuel pool. Moreover, a typical BWR 4 spent fuel pool model was created in Ansys Fluent software. This model are more accurate than the models in the others studies of spent fuel pool. The pool is filled 3828 bundles of various ages in high and low – density racking. Thermal power of spent fuel pool for low – density racking is 2526 and 3143 kW, for high – density racking is 2952 and 3567 kW. And the most important accident (cooling and cleaning system accident) was modeled with 6688 kW thermal power. The initial cooling water temperature is 31°C. The study showed that in the worst scenario cooling water to boil-up at 18 hour after cooling and cleaning system accident, the spent nuclear fuel to uncover after 106 hours. Also, in this study was investigated the natural circulation phenomena in the spent fuel pool then him is loaded various age and thermal power spent fuel bundles.

## **Turinys**

ĮVADAS.....	10
1. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO IŠLAIKYMO BASEINŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....	11
2. „ANSYS FLUENT“ PROGRAMINIS PAKETAS.....	14
3. TIRIAMASIS OBJEKTAS .....	15
4. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO BASEINO SAUGOS PROBLEMOS.....	20
4.1. Pagrindinės baseino avarijos .....	21
4.2. Pagrindinės saugos funkcijos baseinui .....	22
4.3. Avarijų pasėkmių sušvelninimas.....	23
5. REZULTATAI .....	24
5.1. Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1 ir ciklas Nr. 2).....	27
5.2. Minimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1 ir ciklas Nr. 2) .....	32
5.3. Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 3) su iškrautomis panaudoto branduolinio kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos.....	35
5.4. Panaudoto branduolinio kuro atsidengimas.....	38
IŠVADOS.....	42
LITERATŪRA.....	44
PRIEDAS A. Didelio našumo paskirstytų skaičiavimų klasteris.....	46
Priedas B. Publikacijų kopijos .....	48
B1. Publikacija moksliniame žurnale „Pramonės inžinerija ir dizainas 2014“.....	48
B2. Publikacija moksliniame žurnale „Šilumos energetika ir technologijos 2015“.....	53
B3. Publikacija moksliniame žurnale „Pramonės inžinerija 2015“.....	60

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1. pav. Baseino modeliai programiniuose paketuose. ....	12
1.2. pav. Baseino modelis RELAP5 programiniame pakete. ....	13
1.3. pav. Supaprastinti baseino modeliai. ....	13
2.1. pav. Uždavinio sprendimo principas. ....	14
2.2. pav. CFD sprendimo metodai. ....	15
3.1. pav. BWR 4 Mark I pagrindinio pastato pjūvis. ....	16
3.2. pav. Principinė šilumnešio cirkuliacijos ir jo valymo sistemos schema. ....	18
3.3. pav. Konteinerio pjūvis. ....	19
3.4. pav. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ ir šiluminio elemento schema. ....	19
3.5. pav. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ brėžinys. ....	20
4.1. pav. Kritinio lygio riba. ....	21
4.2. pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių išdėstymo principai. ....	23
5.1. pav. Baseino modelis. ....	25
5.2. pav. Rinklių išsidėstymas maksimaliai pakrautame baseine. ....	28
5.3. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	30
5.4. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	31
5.5. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 30 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	31
5.6. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 30 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	32
5.7. pav. Rinklių išsidėstymas minimaliai pakrautame baseine. ....	32
5.8. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	34
5.9. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	34
5.10. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 36 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	35
5.11. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 36 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	35
5.12. pav. Maksimaliai užpildytas baseinas (ciklas Nr. 3) su iškrautomis panaudoto branduolinio kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos. ....	36
5.13. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 5 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	37
5.14. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 5 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	37
5.15. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 17 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	38
5.16. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 17 val. po aušinimo sistemos gedimo. ....	38
5.17. pav. Šilumnešio užvirimo laikas. ....	40
5.18. pav. Šilumnešio lygio pokytis baseine per 72 valandas. ....	41
5.19. pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių atsidengimas. ....	41

## **LENTELIŲ SĄRAŠAS**

3.1. lentelė. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ dimensijos.....	20
4.1. lentelė. Priimtino kriterijai išlaikymo baseinui. ....	23
5.1. lentelė. Pagrindinės techninės charakteristikos reaktoriui ir maksimaliai bei minimaliai pakrautam baseinui.....	26
5.2. lentelė. Baseino darbo ciklą trukmė kampanijos metu. ....	27
5.3. lentelė. Kuro rinklių šiluminė galia maksimaliai pakrautame baseine.....	28
5.4. lentelė. Liekamosios šilumos perskaičiavimas į tūrinę liekamąją šilumą – maksimalus baseino pakrovimas. ....	29
5.5. lentelė. Kuro rinklių šiluminė galia minimaliai pakrautame išlaikymo baseine. ....	33
5.6. lentelė. Liekamosios šilumos perskaičiavimas į tūrinę liekamąją šilumą – minimalus baseino pakrovimas. ....	33
5.7. lentelė. Liekamosios šilumos perskaičiavimas į tūrinę liekamąją šilumą – maksimaliai užpildytas baseinas (ciklas Nr. 3) su iškrautomis kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos.....	36
5.8. lentelė. Šilumnešio garavimo charakteristikos.....	39



## **MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS**

1. Audrius Graževičius. Įvadas į verdančio vandens reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino modeliavimą Fluent aplinkoje. // Mokslinis leidinys „Pramonės inžinerija 2014” p. 38. Kaunas, Lietuva. 2014.
2. Audrius Graževičius, Arvydas Adomavičius, Linas Paukštaitis. BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino termohidraulinių procesų studija. // Mokslinis leidinys „Šilumos energetika ir technologijos 2015”. Kaunas, Lietuva. 2015.
3. Audrius Graževičius, Arvydas Adomavičius, Linas Paukštaitis. Natūralios konvekcijos panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine tyrimas. // Mokslinis leidinys „Pramonės inžinerija 2015”. Kaunas, Lietuva. 2015.

## IVADAS

Per branduolinės energetikos dešimtmečius pasaulyje susikaupė tūkstančiai tonų panaudoto branduolinio kuro, kurio ženkli dalis pagal priimtas technologijas gan ilgai saugoma panaudoto kuro saugojimo baseinuose. Suprantama, kad dideli kiekiai radioaktyvių medžiagų turi būti saugomi taip, kad užtikrinti tarptautinės bendruomenės keliamus radiacinės saugos reikalavimus. Užtikrinant branduolinės energetikos objektų saugą, analizės ir tyrimai, vykdomi skaitinio modeliavimo pagrindu, užima esminę vietą [1-2].

Verdančiojo vandens reaktorius – potencialai galimas Lietuvos pasirinkimas būsimai Visagino AE, todėl BWR 4 (verdančiojo vandens) reaktorius ir jo sistemos – aktualus objektas tyrimams.

Šio darbo tikslas – ištirti termohidraulinius procesus vykstančius BWR 4 reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine. Uždaviai: apžvelgti panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseinų termohidraulines studijas, programinius paketus, skirtus modeliuoti termohidraulinius procesus ir išsirinkti vieną iš jų. Išanalizuoti tiriamąjį objektą, atlikti termohidraulinių procesų analizę, panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseinui, kai visiškai sugenda aušinimo sistema. Ištirti šilumnešio užvirimo laiko ir panaudoto branduolinio kuro rinklių atsidengimo priklausomybę nuo (esant patiems didžiausiems liekamosios šilumos išsiskyrimams) panaudoto branduolinio kuro rinklių išdėstymo.

## 1. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO IŠLAIKYMO BASEINŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Branduoliniame reaktoriuje atidirbęs branduolinis kuras, talpinamas į baseinus, kuriuose turi būti laikomas ne mažiau, kaip  $5 \div 10$  metų tam, kad sumažėtų liekamosios šilumos išsiskyrimas. Sumažėjus liekamosios šilumos išsiskyrimui, kuras perkeliamas į ilgalaikio saugojimo saugyklas arba vežamas į perdirbimo gamyklas. Dėl įvairių priežasčių (politinių, ilgalaikių saugyklų neįrengimo, netinkamos strategijos vykdymo ir kt.) kuro kiekiai baseinuose didėja. Baseinai gali būti įvairaus dizaino, skirti vienam ar keliems reaktoriams. Juose talpinamas įvairus panaudoto branduolinio kuro rinklių kiekis, kuris gali būti nuo 500 iki 8000 vienetų. Kuro rinklės talpinamos konteineriuose, kurie įrengti ant baseino grindų. Maksimaliai pakrovus baseiną išauga avarijų tikimybė, t.y. aušinimo vanduo (šilumnešis), kuris aušina panaudoto branduolinio kuro rinkles, gali užvirtti žymiai greičiau, pradėti intensyviau garuoti, taip pat padidėja sienų trūkio tikimybė [3].

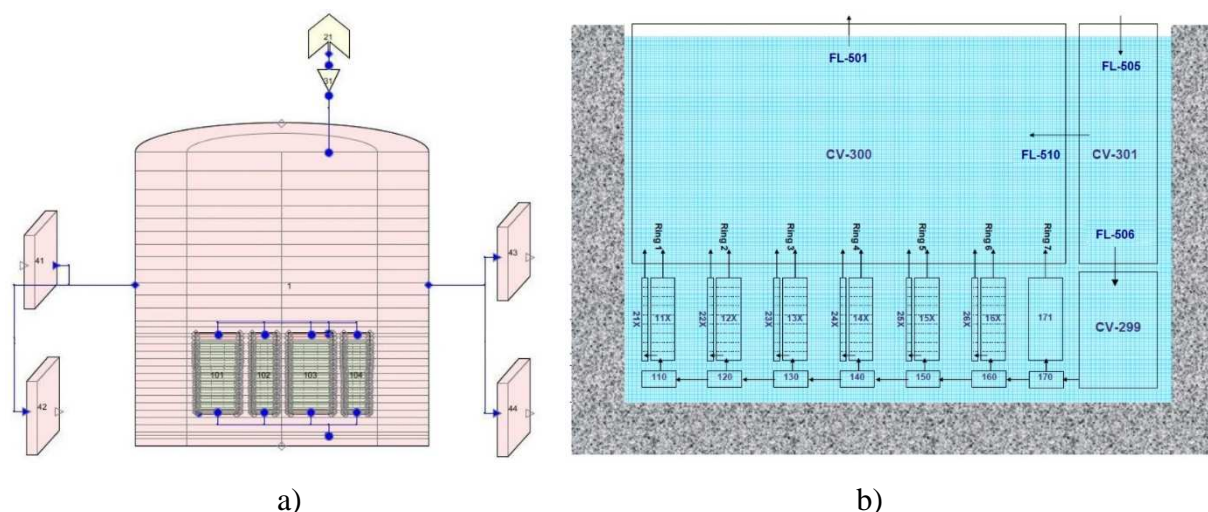
Mokslininkai atlikto nemažai saugos analizių, įvairių reaktorių baseinams, naudodami platų programinių paketų spektrą. Mokslinėje studijoje „Predictions of Spent Fuel Heatup After a Complete Loss of Spent Fuel Pool Coolant“ atliekama, verdančiojo vandens reaktoriaus baseine esančio kuro, aušinimo analizė [4]. Šioje analizėje naudojamas konservatyvus modeliavimo metodas, t.y. analizuojama kuro elgsena, kai prarandamas visas šilumnešis ir kuras aušinamas pasitelkiant orą, patenkantį per patalpos, esančios virš baseino, ventiliacijos angas. Didžiausias dėmesys skirtas termohidraulinių procesų, vykstančių ne tik baseine, bet ir patalpoje, esančioje virš baseino, tyrimams. Neseniai pakrautos kuro rinklės iš reaktoriaus į baseiną, talpinamos koncentruotai į vieną vietą. Baseino modelis suskaidomas į 675000 kontrolinių tūrių. Skaitiniui modeliavimui atlikti naudojamas ANSYS Fluent 5 programinis paketas, kuris šiai dienai yra pakankamai senas. Įvertinę modeliavimo metodą, kraštines sąlygas, programinės įrangos naujumą ir nagrinėjamą modelį galime teigti, kad būtina iš naujo atlikti termohidraulinę analizę baseinui.

JAV radiacinės saugos tarnybos atliktoje, verdančiojo vandens reaktoriaus, baseino saugos analizėje „Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor“, analizuojami ne tik termohidrauliniai procesai (MELCOR programinis paketas), tačiau atliekama ir stipruminė, baseino konstrukcijų (LS-DYNA programinis paketas), analizė [5]. Po Japonijoje įvykusios Fukushima Daiichi avarijos buvo atlikta ketvirto bloko baseino termohidraulinė analizė „Fukushima Daiichi Accident Study“ tuo pačiu MELCOR programiniu paketu. Naudojant šį programinį paketą, gautų rezultatų tikslumas abejonių nekelia, tačiau šis programinis paketas nesuteikia galimybės vizualiai (dvimatėje arba trimatėje erdvėje) pažvelgti į termohidraulinius procesus.

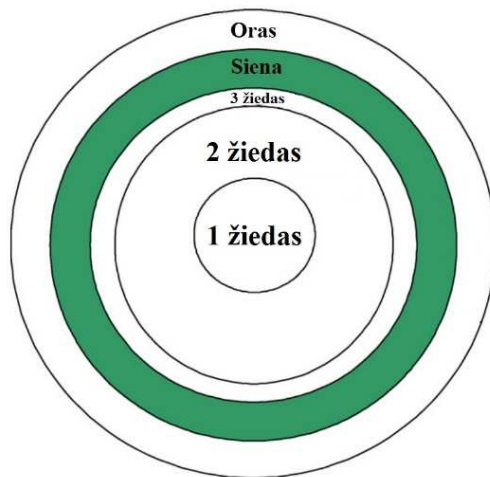
Apžvelgiant ne tik verdančiojo, bet ir suslėgtojo vandens reaktorių baseinų analizes, pvz. „The design and simulation of a new spent fuel pool passive cooling system“, pastebime

nepateiktus duomenis apie modelių suskaidymą į kontrolinius tūrius, tikslumą trūkumą (nenurodyti šilumnešio įtekėjimo ir ištekėjimo vamzdžiai ir kt.) [6].

Baseinuose vykstančios avarijos skirstomos į projektines ir neprojektines. Projektinė avarija – avarija, kurios eiga ir pasekmės yra numatytos projektuojant branduolinę elektrinę. Tokioms avarijoms parengti veiklos planai, kuriais vadovaujantis, branduolinės elektrinės aptarnaujantysis personalas turi visiškai sustabdyti avariją arba sumažinti jos sukeltas pasekmes. Neprojektinė avarija – tai avarija, įvykusi dėl nenumatytų projektinės avarijos pradinių įvykių arba lydima dar kitų, nenumatytų projektinėse avarijose saugos sistemų gedimų, esant ne tik vieniniam gedimui ar klaidingiems personalo veiksams [7]. Projektinės avarijos gali būti: cirkuliacinių siurblių ir/arba šilumokaičių gedimas, šilumnešio užvirimas, gaisras, šilumnešio nuotėkis, mechaninis šiluminio apvalkalo pažeidimas, šiluminio apvalkalo suirimas dėl aukštos temperatūros, vandenilio susidarymas, elektros energijos praradimas ir kt. Šias avarijas modeliuoti yra sukurtas platus spektras programinių paketų. Dažniausiai naudojami vienmačiai programiniai paketai tokie, kaip TRACE, MELCOR, ATHLET, ASTEC, Relap/SCDAPSM, MAAP, SOCRAT, COMSOL, COBRA-SFS ir kiti (labiausiai paplitę: MELCOR, TRACE, RELAP5, ASTEC ir ATHLET) [8]. Baseino modeliai TRACE ir MELCOR programiniuose paketuose pateikti 1.1. paveiksle, o RELAP5 modelis pateikstas 1.2. paveiksle. Šie programiniai paketai pakankamai greitai atlieka skaičiavimus ir pateikia rezultatus, tačiau esminė vienmačių programinių paketų problema – paprastumas. Norint modeliuoti įvairius procesus baseinuose, priimama daug supaprastinimų: geometriniai supaprastinimai, kuro rinklės sujungiamos į homogeninę struktūrą (visai struktūrai užduodama bendra šiluminė galia) ir kt.

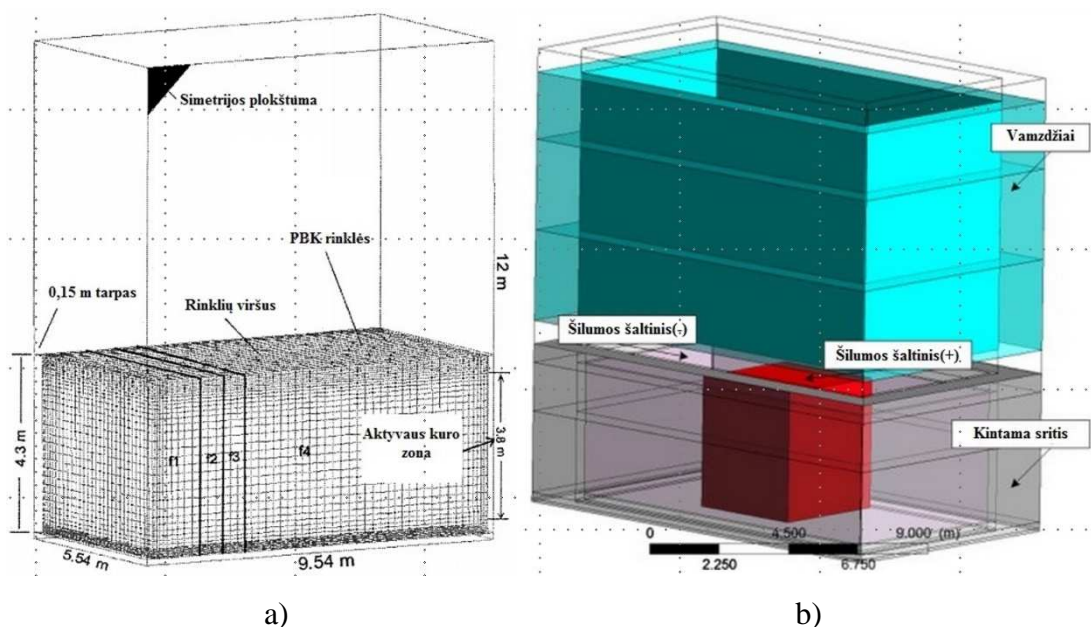


1.1. pav. Baseino modeliai programiniuose paketuose: a) TRACE [9]; b) MELCOR [5].



1.2. pav. Baseino modelis RELAP5 programiniame pakete [10].

Vienmačių programinių paketų aplinkoje įrenginiai atvaizduojami, kaip eilė kontrolinių tūrių, kuriuose nustatomos apibendrintos (integralios) charakteristikos. Dvimačiai programiniai paketai leidžia nustatyti charakteristikų pasiskirstymą įrenginio ar jo elemento pjūvyje. Trimačiuose programiniuose paketuose gaunamas pilnas parametrų pasiskirstymo visame modelio tūryje vaizdas. Baseino modeliai ANSYS Fluent aplinkoje pateikti 1.3. paveiksle. Nors trimačių programinių paketų nėra tiek daug, kiek vienmačių ar dvimačių, tačiau šiuo metu, termohidrauliniams procesams modeliuoti, labai plačiai naudojami trimačiai programų paketai tokie, kaip NEPTUNE CFD, SHARP, SFUEL, ANSYS Fluent, STAR-CCM+ ir kt.



1.3. pav. Supaprastinti baseino modeliai: a) ANSYS Fluent 5.0 versija [4]; b) ANSYS Fluent 13.0 versija [6].

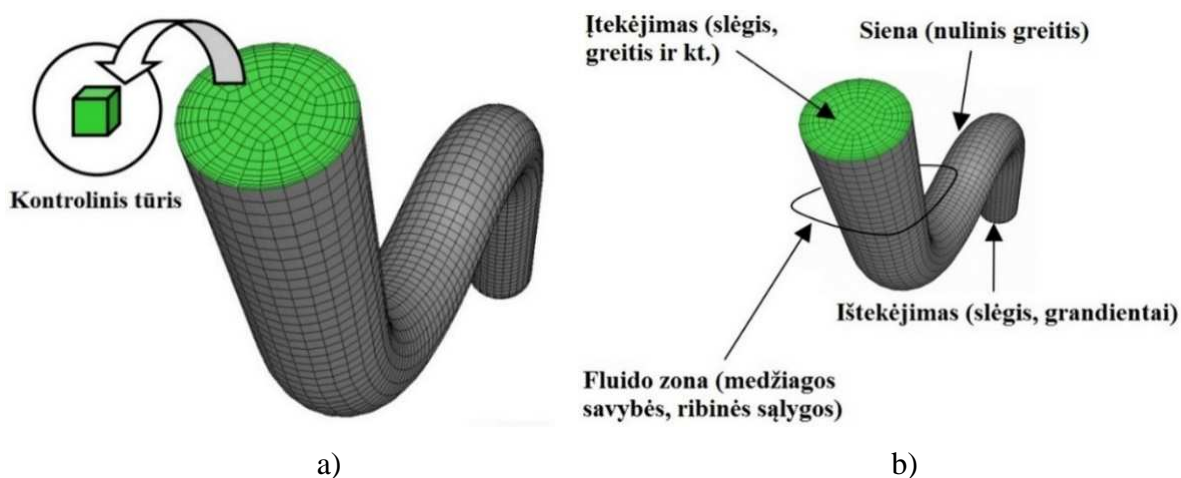
Iš minėtųjų trimačių programinių paketų, didžiausią patirtį termohidraulikos ir termodinamikos srityse turi ANSYS Fluent. Šis programinis paketas labai plačiai taikomas

branduolinės energetikos sektoriuje, pramonėje, aviacijoje ir kitose sferose [11]. Taip pat jis yra pripažintas tarptautinių mokslo ir pramonės įstaigų tokių, kaip JAV radiacinės saugos tarnyba. Šio programinio paketo pateikiami rezultatai koreliuoja su eksperimentų rezultatais. Dėl ribotų kompiuterinių resursų ANSYS Fluent 5.0 ir 14.0 versijose daugeliui baseinų modelių pritaikyta grubi nodalizacija (1.3. pav. a). Grubi nodalizacija ir kiti supaprastinimai gali daryti esminę įtaką rezultatų tikslumui, todėl patobulėjus trimačiams programiniams paketams ir žinant, kad branduolinė sauga yra aukščiausiam lygmenyje, būtina atnaujinti daugybę, branduoliniams įrenginiams (tarp jų ir baseinams) skirtų termohidraulinių tyrimų. Baseino ir kuro rinklių jame modeliavimui bei termohidraulinių procesų tyrimui pasirenkame ANSYS Fluent 14.0 versiją.

Atlikus baseinų tyrimų apžvalgą, matome, kad sisteminiai programų paketai, naudojantys grubų modelių skaidymą į kontrolinius tūrius, neatskleidžia visų termohidraulinių procesų vykstančių baseine. Priimti baseino modelio supaprastinimai, netinkamos kraštinės sąlygos ir kiti aspektai, leidžia paviršutiniškai atkartoti termohidraulinius procesus, baseino normalios eksploatacijos metu ir įvykus avarinei situacijai. Dauguma tyrimų atlikta naudojant vienmačius programinius paketus, kurie nesuteikia galimybės termohidraulinius procesus, vizualiai nagrinėti pasirinktuose grafiniuose kontūruose. Vienmačiuose programiniuose paketuose rezultatai pateikiami, tik grafikų pavidalu.

## 2. „ANSYS FLUENT“ PROGRAMINIS PAKETAS

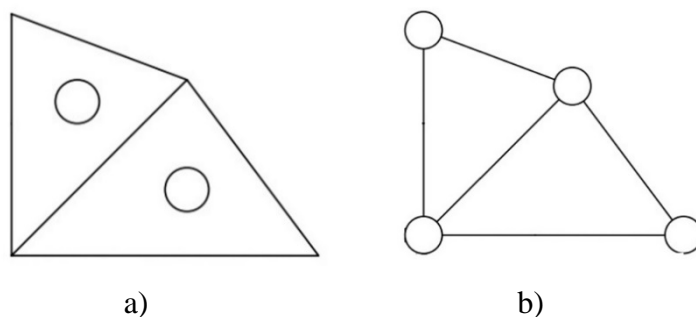
ANSYS Fluent – vienas iš CFD (skaičiuojamosios skysčių dinamikos) programinių paketų. Šis paketas naudojamas sprendžiant fizikines srauto, turbulencijos, šilumos mainų ir cheminių reakcijų problemas [12]. Naudojant pažangias kompiuterines technologijas, CFD programiniai paketai tampa pagrindiniu įrankiu projektavimo, mokslinių tyrimų, technologinės plėtros ir procesų optimizavimo srityse. Tiriamojo modelio suskirstymas į kontrolinius tūrius ir pagrindinių lygčių sprendimo principas pateiktas 2.1. paveiksle.



2.1. pav. Uždavinio sprendimo principas [12]: a) modelio suskirstymas į kontrolinius tūrius; b) pagrindinių lygčių sprendimo principas.

Pagrindinė ANSYS Fluent programinio paketo paskirtis – termohidraulinių ir termodinaminių procesų tyrimas įvairiose terpėse, pvz. reaktoriuose, garo generatoriuose, šilumokaičiuose ir kituose įrenginiuose. Šiuo programiniu paketu gali būti modeliuojamos cheminės reakcijos, degalų degimas, vienfazis ar dvifazis tekėjimas, šilumokaita, turbulencija ir kiti šiluminiai reiškiniai. Programinė įranga turi sąsajas su populiariausiomis inžinerinėmis programomis (SolidWorks, IronCAD, AutoCAD, CFX, GAMBIT ir kt.), kurių pagalba galima importuoti arba eksportuoti modelių geometrijos, suskaidymo į kontrolinius tūrius arba sprendimo bylas. Tokie palengvinimai padeda greičiau ir tiksliau gauti sprendžiamos problemos rezultatus. Taip pat programinis paketas suteikia galimybę spręsti problemas dvimatėje arba trimatėje erdvėje. Modeliuojant dvimatį modelį (2D), kontroliniai tūriai gali būti: trikampio arba kvadrato formų. Modeliuojant trimatį modelį (3D), kontroliniai tūriai gali būti skirstomi į šias geometrines figūras: ketursienės, šešiasienės, prizmės, piraminės ir daugiasienės figūros. Kontrolinių tūrių forma priklauso nuo pasirinkto modelio smulkinimo metodo, t.y. gali būti tik ketursienės, šešiasienės ir kitos figūros arba sugrupuotos figūros – ketursienės ir šešiasienės, arba kitokios kombinacijos [13].

Vienmačiai programiniai paketai, lygtis integruoja pasirinktuose taškuose, esančiuose tiesėje. Dvimačiai ir trimačiai programiniai paketai, modelį suskaido į kontrolinius tūrius (jų skaičių ir geometriją nustato tyrėjas) pasirinktoje Dekarto koordinačių sistemoje. Dvimačiai ir trimačiai programiniai paketai lygtis integruoja kontroliniuose tūriuose, baigtinių tūrių arba baigtinių elementų metodais. Skirtumai tarp baigtinių tūrių ir baigtinių elementų sprendimo principų pateikti 2.2. paveiksle.



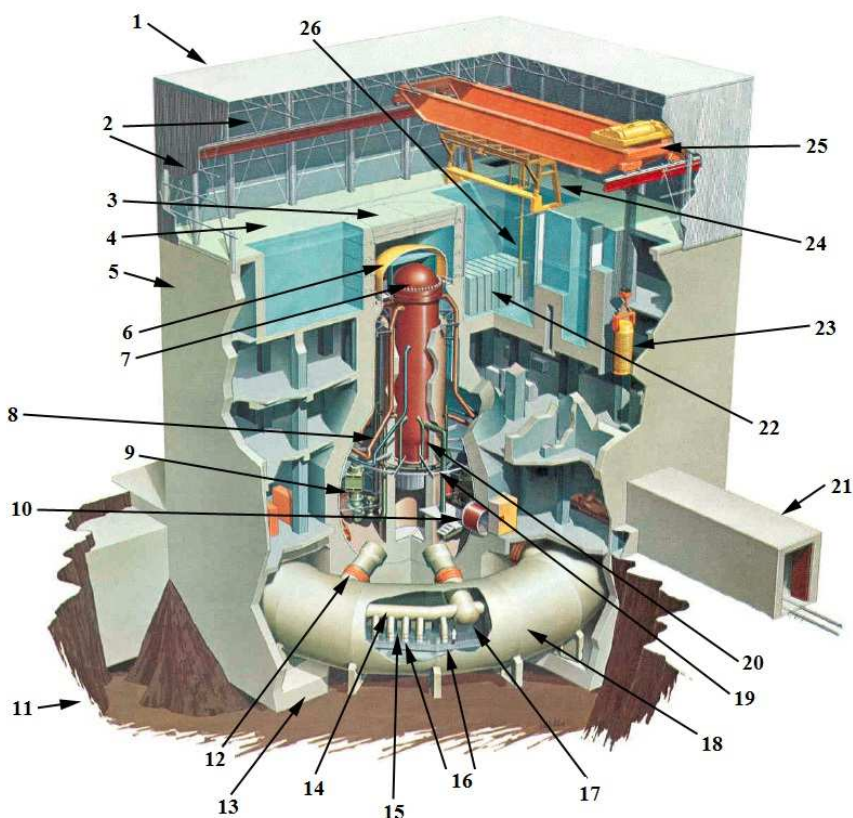
2.2. pav. CFD sprendimo metodai [14]: a) baigtinių tūrių, b) baigtinių elementų.

### 3. TIRIAMASIS OBJEKTAS

Įprastai baseinai būna specialiai suprojektuoti pagal reaktoriaus tipą ir naudojamą branduolinį kurą. Visi baseinai esantys šalia reaktoriaus – priverstinės cirkuliacijos ir tik šiuolaikinėse branduolinėse elektrinėse, pereinama prie savaiminės cirkuliacijos baseinų. Nors baseinų būna įvairaus dizaino, tačiau jie turi vieną charakteristiką, t.y. beveik visi baseinai yra išorinėje didelio slėgio korpuso pusėje [15-20]. Baseinas esantis išorinėje didelio slėgio korpuso pusėje pavaizduotas 3.1. paveiksle. Jų konstrukcija yra pakankamai atspari gamtos stichijoms,

tačiau silpnoji pagrindinio branduolinės elektrinės pastato vieta – pastatas esantis virš didelio slėgio korpuso (Fukushima Daiichi branduolinės avarijos metu ciunamis nugriovė šį pastatą). Dėl tokios pagrindinio pastato konstrukcijos, branduolinė elektrinė gali būti pasirinkta, kaip teroristų atakos taikynys. Po įvairių branduolinių avarijų (pvz. Černobylio ir Fukushima Daiichi), didelis dėmesys pradėtas kreipti į branduolinę saugą, ypač daug dėmesio skiriama gelžbetonio korpuso stipruminei, reaktoriaus, baseino, įvairių aušinimo sistemų termohidraulinėms ir tikimybinėms analizėms [5, 15].

Analizei pasirenkame plačiausiai paplitusį (tarp verdančiojo vandens reaktorių) BWR 4 reaktoriaus baseiną, kuris yra „Mark I“ tipo didelio slėgio korpuso išorinėje pusėje. JAV yra net 22 BWR reaktoriai, esantys „Mark I“ tipo didelio slėgio korpusuose, kiti 23 BWR reaktoriai yra kitokiuose didelio slėgio korpusuose „Mark II“ ir „Mark III“ (vieninteliame „Mark III“ tipo didelio slėgio korpuso baseinas yra ir išorinėje ir vidinėje pusėje) [20].



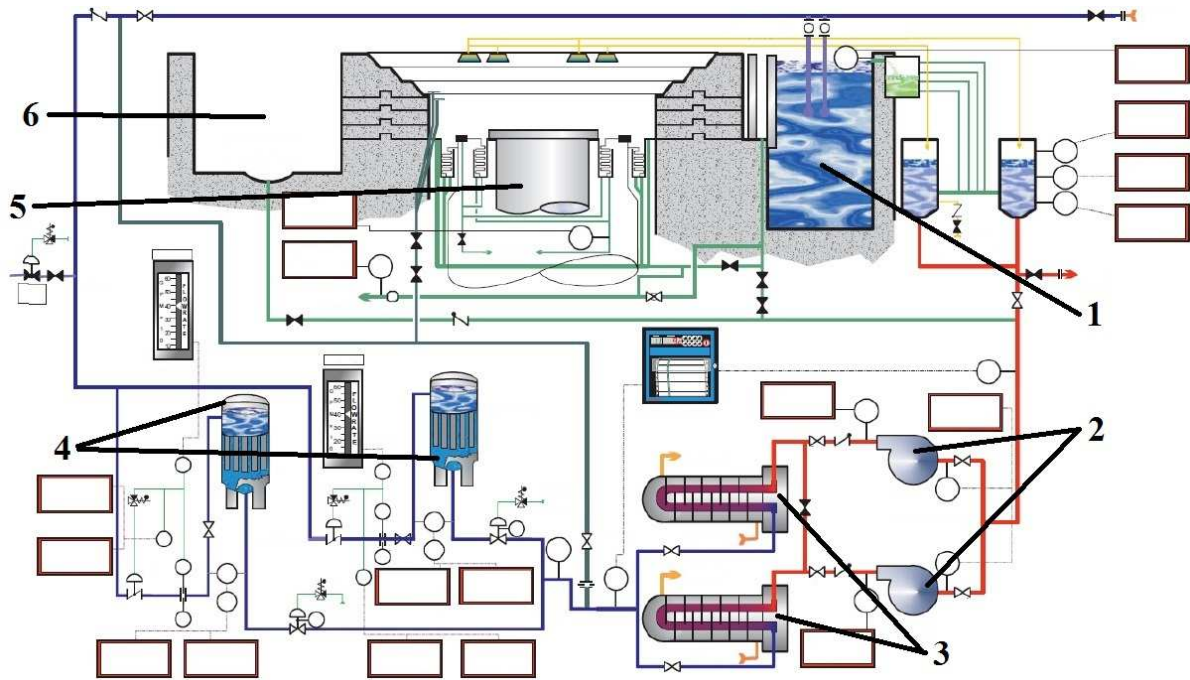
3.1. pav. BWR 4 Mark I pagrindinio pastato pjūvis [16]: 1 – darbinės patalpos; 2 – taršos plokštės; 3 – perkrovimo kaištis; 4 – naujojo branduolinio kuro vieta, perkrovos metu; 5 – didelio slėgio korpusas; 6 – apsauginis dangtis; 7 – reaktoriaus dangtis; 8 – pagrindinė garo linija; 9 – cirkuliacijos siurbliai; 10 – komunikacijų angos; 11 – sutankintas gruntas; 12 – išsiplečiančios jungtys; 13 – pagrindinės korpuso grindys; 14 – vandens stabilizacijos ruožas; 15 – vandens lygio ribos; 16 – vandens tekėjimo vamzdžiai; 17 – vandens ištekėjimo angos iš didelio slėgio korpuso į slopinimo kamerą; 18 – slopinimo kamera; 19 – reaktoriaus laikantysis žiedas; 20 – vandens tiekimo vamzdžiai; 21 – traukinio ar autotransporto platforma; 22 – panaudotas branduolinis kuras išlaikymo baseine; 23 – panaudoto branduolinio kuro konteineris; 24 – perkrovimo tiltelis; 25 – kranas; 26 – rinklė.



BWR 4 reaktoriaus baseinas turi 3819 specialių vietų panaudoto branduolinio kuro rinklių saugojimui, iš jų 764 vietos rezervuojamos avariniui reaktoriaus iškrovimo atvejui (visų 764 kuro rinklių esančių aktyviojoje zonoje). Maksimaliai pakrovus baseiną, jame 3055 vietas užima senos kuro rinklės, kurios yra iškrautos iš reaktoriaus, periodiniu kuro iškrovimo metu. Dažniausiai periodiniai iškrovimai vyksta, kas  $12 \div 18$  mėnesių, iškraunant trečdalį aktyviosios zonos centre esančių panaudoto branduolinio kuro rinklių, tačiau dauguma branduolinių elektrinių didina branduolinio kuro išdegimo laipsnį, tokiu būdu ilgindami laiko tarpą tarp periodinių iškrovimų (iki 23 mėnesių). Aktyviosios zonos centre neutronų koncentracija didžiausia, todėl rinklių išdegimo laipsnis – didesnis negu periferijoje esančių rinklių, todėl kiekvieną kartą iš aktyviosios zonos centro iškraunamos 254 rinklės. Šios rinklės iš reaktoriaus į baseiną perkeliamos vandens kanalu tam, kad užtikrinti rinklės aušinimą ir radiacija nepaveiktų aptarnaujančiojo personalo. Baseinas pilnai užpildomas per maždaug 11 iškrovimų nuo reaktoriaus eksploatacijos pradžios. Kuro rinklės saugomos ne mažiau, kaip 5 metus, tačiau dėl anksčiau minėtų priežasčių, saugojimo laikotarpis gali prailgėti iki 30 metų. Kiekvieną kartą iškraunant trečdalį reaktoriuje esančio kuro į baseiną, toks pats seniausio ir mažiausiai liekamosios šilumos išskiriančio kuro kiekis turi būti iškrautas iš baseino, jeigu baseinas maksimaliai pakrautas kuro rinklėmis. Iš jo iškrautas kuras gabenamas į kuro pastatą, kuriame jis tvarkomas pagal vyriausybės vygdomą radioaktyviųjų atliekų tvarkymo strategiją, t.y. saugomas sauso tipo saugyklose, vežamas į geologines saugyklas arba perdirbimo gamyklas [5, 19].

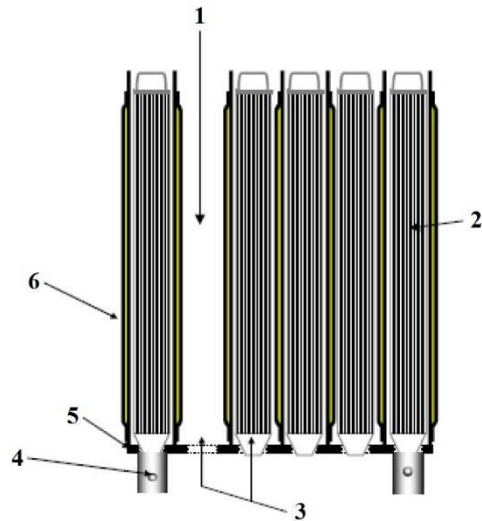
Baseino pagrindiniai geometriniai parametrai: plotis – 12,2 m, ilgis – 10,8 m, gylis – 11,8 m, šilumnešio kiekis yra ~1,51 mln. litrų (lygis nuo baseino grindų – 11,0 m). Šilumnešio lygio perkrytis tarp lygio baseine ir lygio virš rinklių yra 7,0 m, šis šilumnešio kiekis – lyg apsauginis skydas, kuris apsaugo branduolinės elektrinės personalą nuo radiacijos poveikio. Baseino sienos pagamintos iš gelžbetonio, kurio storis nuo 1,2 iki 2,4 m, jose esančių plieninių strypų skermuo nuo 6 iki 13 mm. Virš baseino yra plieninės konstrukcijos, kurios naudojamos krano operacijoms atlikti, t.y. perkelti reaktoriaus korpuso dangtį, garo separatorių, panaudoto branduolinio kuro rinkles, statines su panaudoto kuro rinklėmis ir kitus įrenginius [4].

Nepertraukiamą šilumos šalinimą ir šilumnešio valymą užtikrina aušinimo ir valymo sistema, kurios principinė schema pavaizduota 3.2. paveiksle. Ji susideda iš dviejų cirkuliacinių siurblių ir dviejų šilumokaičių. Įprastiniu darbinio režimu cirkuliaciniai siurbliai ir šilumokaičiai dirba naudodami tik pusę savo pajėgumo tam, kad įvykus šilumokaičio arba/ir cirkuliacinio siurblio avarijai, būtų užtikrintas tinkamas aušinimo vandens srautas ir liekamosios šilumos šalinimas [15, 21]. Pagrindinės šilumnešio funkcijos: 1 – atlikti saugos funkciją, t.y. apsaugoti aptarnaujantįjį personalą nuo radiacijos; 2 – šalinti šilumą, išsiskiriančią radioaktyviai yrant kure esantiems nuklidams [5, 20].



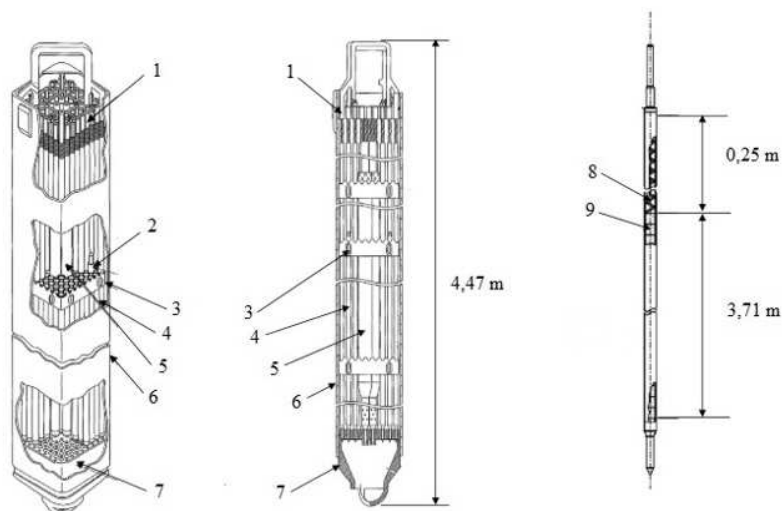
3.2. pav. Principinė šilumnešio cirkuliacijos ir jo valymo sistemos schema [15]: 1 – baseinas, 2 – cirkuliaciniai siurbiai, 3 – šilumokaičiai, 4 – valymo įrenginiai, 5 – reaktorius, 6 – garo separatoriaus ir džiovintuvo baseinas.

Panaudoto branduolinio kuro rinklės, vertikalioje padėtyje, talpinamos į konteinerius, esančius ant baseino grindų. Šių konteinerių eksploatacijos laikas 30 – 40 metų. Konteinerių sienelėse yra neutronų absorberio „Bisco Boraflex“ arba kitaip vadinamas „Boro karbidas“ ( $B_4C$ ), kuris ženkliai sumažina kritiškumo koeficientą [5]. Suslėgto vandens reaktorių baseinuose dažniausiai naudojami ne tik neutronų absorberiai, bet ir boruotas vanduo, tačiau verdančiojo vandens reaktorių baseinuose dažniausiai naudojami tik boro absorberiai, o šilumnešyje boro nėra. Konteinerių tipai gali būti įvairūs: su tarpais tarp rinklių arba be jų, pritaikyti vertikaliai arba horizontaliai tekančiam šilumnešiu. Tipas pasirenkamas pagal reaktoriaus šiluminę galią, naudojas kuro rinkles, baseino talpą, kuro rinklių išdėstymo konfigūraciją ir kitus kriterijus. Dažniausiai naudojamas didelio tankio konteineris, kuris suteikia galimybę baseine talpinti žymiai didesnius kuro rinklių kiekius. Didelio tankio konteinerio pjūvis su jame esančiomis kuro rinklėmis pavaizduotas 3.3. paveiksle. Tarpai tarp rinklių gali būti nuo 1,00 cm iki žymiai didesnių atstumų, kiekvienas konteineris turi keturias kojas, kurios išdėstytos kampuose. Konteineriai turi būti pakelti virš baseino grindų tam, kad į kuro rinkles įtekėtų šilumnešis ir būtų užtikrintas aušinimas (dažniausiai konteineriai pakeliami į 15,0 ÷ 30,0 cm aukštį) [5, 21].

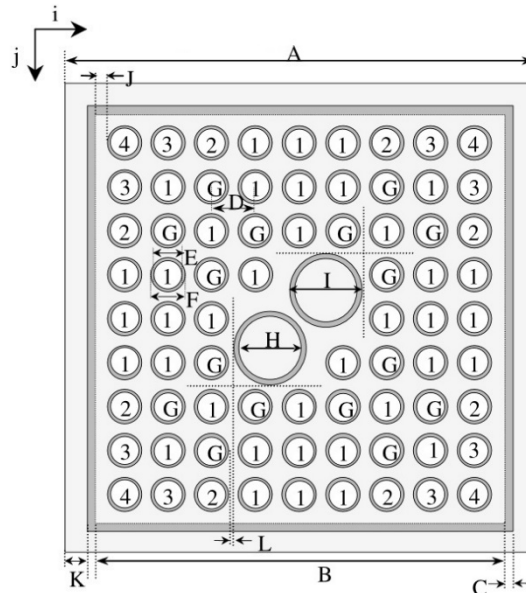


3.3. pav. Konteinerio pjūvis [5]: 1 – tuščia vieta; 2 – panaudoto branduolinio kuro rinklė; 3 – šilumnešio įtekėjimo angos; 4 – šilumnešio įtekėjimo anga į konteinerį laikinąją koją; 5 – atraminė plokštė; 6 – sienelė užpildyta neutronų absorberiu „Bisco Boraflex“.

Dažniausiai šiuose konteineriuose talpinamos „GE13 Step IIIA“ kuro rinklės, kurios susideda iš 9x9 šiluminių elementų kombinacijos, tačiau gali būti ir kitų kuro rinklių, kurių šiluminių elementų kombinacija: 6x6, 7x7, 8x8, 10x10 ir 11x11. Vienos „GE13 Step IIIA“ rinklės svoris apie 230 kg (gamtinio urano svoris ~170 kg), rinklė susideda iš 74 šiluminių elementų, dviejų vandens strypų ir aštuonių nešančiųjų strypų. Šiluminiai elementai pagaminti iš nerūdijančio 316 markės plieno arba iš cirkonio, kurio lydymosi temperatūra yra ~1845 °C [19, 22-26]. Branduolinio kuro rinklė pavaizduota 3.4. ir 3.5. paveiksluose, o jos geometrijos parametrai pateikti 3.1. lentelėje [22].



3.4. pav. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ ir šiluminio elemento schema [25]: 1 – viršutinė tvirtinimo ploštelė; 2 – dalinio ilgio kuro strypas; 3 – tarpinis strypų fiksatorius; 4 – šiluminis elementas; 5 – vandens strypas; 6 – rinklės gaubtas; 7 – apatinė tvirtinimo ploštelė; 8 – spyruoklė; 9-10 – branduolinio kuro piliulė (suprestuota  $UO_2$  tabletė).



3.5. pav. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ brėžinys [26].

3.1. lentelė. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ dimensijos.

Žymėjimas	Apibūdinimas	Reikšmė, cm
A	Rinklės žingsnis	15,24
B	Rinklės gaubtas	13,40
C	Rinklės gaubto storis	0,25
D	Šiluminio elemento žingsnis	1,44
E	Kuro tabletės skersmuo	0,98
F	Apvalkalo išorinis skersmuo	1,12
H	Vandens strypo vidinis skersmuo	2,35
I	Vandens strypo išorinis skersmuo	2,49
J	Atstumas tarp vidinės gaubto sienelės iki apvalkalo išorės	0,38
K	½ vandens tarpo tarp rinklių	0,67
L	Atstumas tarp vandens strypo ir apvalkalo paviršių	0,16

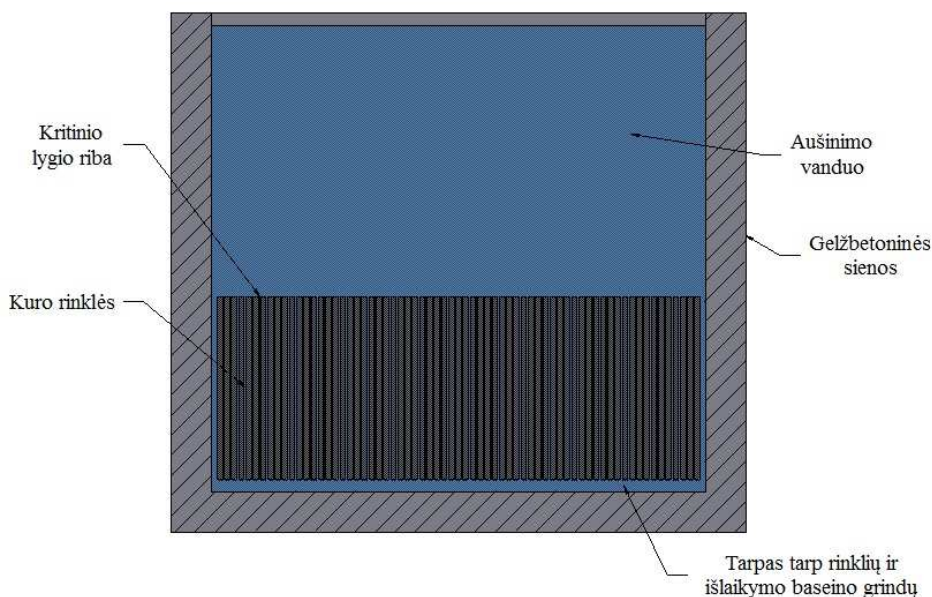
#### 4. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO BASEINO SAUGOS PROBLEMOS

Dėl anksčiau minėtų priežasčių dauguma baseinų yra maksimaliai pakrauti kuro rinklėmis, todėl avarių tikimybė ženkliai išauga, tačiau ji vistiek nėra didelė –  $10^{-6}$ . Siekiant išvengti įvairių avarių, baseinuose instaliuota daug apsaugos priemonių: konteinerių sienelėse yra neutronų absorberio, kai kuriais atvejais į šilumnešį įmaišoma boro, aušinimo sistemoje įrengta po 2 ÷ 3 cirkuliacijos siurblius ir šilumokaičius, šilumnešio papildymo ir purškimo sistemos bei daug kitų apsaugos priemonių. Įvertinus visus rizikos faktorius ir saugos sistemų gausą, baseinuose

leidžiama kuro rinkles laikyti viena šalia kitos, laikantis „sienelė prie sienelės“ principu, t.y. vieną prie pat kitos (1,00 ÷ 2,00 cm tarpas tarp kuro rinklų). Iki šiol, rimtų avarijų baseinuose nėra buvę, žinomi tik keli atvejai, kai šilumnešio lygis baseine, buvo nukritęs apie 30,0 cm arba temperatūra padidėjusi ne daugiau, kaip 20°C. Siekiant apsaugoti panaudotą branduolinį kurą nuo perkaitimo, šilumnešis aušinimo sistemos pagalba priverstinai cirkuliuoja baseine. Cirkuliacijos greitis nėra didelis – per parą, visas šilumnešis esantis baseine, cirkuliaciniu kontūru, prateka du kartus [21]. Labiausiai tikėtinos baseino avarijos yra dvi: šilumnešio nuotėkis arba aušinimo sistemos gedimas.

#### 4.1. Pagrindinės baseino avarijos

Visi baseinai per kuro perkrovimo kanalus ar vamzdžių sistemas yra sujungti su patalpomis esančiomis virš reaktoriaus slėginio indo. Dėl žemės drebėjimų, kurių metu atsirastų trūkiai baseino sienose, nesėkmingai užsidarius perkrovimo vartams, orlaiviui atsitrenkus į gelžbetoninį korpusą, teroristinio išpuolio metu ar neteisingai įtvirtinus sandariklius, skirtus užsandarinti ertmes tarp reaktoriaus slėginio indo ir gelžbetoninio korpuso – galimas šilumnešio nuotėkis. Esant baseino sienų trūkiams, šilumnešis patenka į gelžbetoninių sienų viduje esančius drenažinius kanalus, kuriais gražinamas į pagrindinę aušinimo sistemą, o trūkiai – pašalinami. Šilumnešio lygiui negalima leisti nukristi žemiau kritinio lygio riba (4,0 m), t.y. rinklės negali kontaktuoti su oru arba kitaip kalbant „atsidengti“. Kritinio lygio riba pavaizduota 4.1. paveiksle. Jeigu šilumnešio lygis nukrenta žemiau kritinio lygio riba („atsidengia“ kuro rinklės), tada  $\gamma$  spinduliuotės dozė išauga ir kyla didelis pavojus aptarnaujančiajam personalui. Jeigu nuotėkis įvyktų per iškrovimo vartus, šilumnešio lygis nukristu iki 7,05 m.



4.1. pav. Kritinio lygio riba.

Atsiradus 11,4 cm skersmens trūkiui baseino grindyse, šilumnešis nuo 11,0 m iki kritinio lygio ribos – 4,0 m nukristų per ~6 val., o pilnai ištekėtų per ~9 valandas. Įvykus tokio tipo avarijai galime teigti, kad atsiradus tokio skersmens trūkiui šilumnešis greitai ištekėtų iš baseino, šiluminiai apvalkalai staiga įkaistų ir pasiektų lydymosi temperatūrą. Esant lydymosi temperatūrai, suyra šiluminis apvalkalas ir aplinka užteršiama skilimo produktais: *Ba*, *Sr*, *Cs I*, *Kr*, *Xe*, lengvosiomis ir sunkiosiomis skeveldromis, vandeniliu, išspinduliuojami  $\gamma$  kvantai,  $\beta$  dalelės ir kt. Taip pat aplinka užsiterštų apvalkalą pažeidus mechaniniu būdu [21]. Įvykus šilumnešio nuotekiui panaudotas branduolinis kuras aušinamas dviejų avarinių sistemų pagalba:

1. Šilumnešio papildymo sistema.
2. Šilumnešio purškimo sistema.

Šilumnešio papildymo sistema įjungžiama, kai fiksuojamas šilumnešio lygio mažėjimas. Šios sistemos našumas yra ~32 kg/s, todėl tokio debito į baseiną pilnai pakanka, greitai atstatyti jo lygį, esant nedideliems trūkiams (~4,5 cm skersmens). Šilumnešis papildomas per vamzdžius esančius baseino viršuje. Papildymo sistema įjungžiama, kai šilumnešio lygis baseine yra ne mažesnis, kaip 0,9 m virš kuro rinklių. Kai šilumnešio lygis mažesnis, kaip 0,9 m virš rinklių, tuomet įjungžiama šilumnešio purškimo sistema. Šios sistemos purkštukai išsidėstė aplink kuro rinkles, kad išpurškiamas šilumnešis tolygiai apiplautų kuro rinkles. Šilumnešio purškimo sistemos našumas yra ~13 kg/s.

Kita galima avarija – aušinimo sistemos gedimas. Laiku neatnaujinus aušinimo sistemos darbo, šilumnešis gali užvirti ir išgaruoti. Išgaravęs šilumnešis atidengia kuro rinkles, o tokios avarijos padariniai bus tokie patys, kaip ir avarijos, kilusios dėl šilumnešio nuotėkio.

Įvykus vienai iš šių avarijų galimi ir kiti avarijos sustabdymo būdai tokie, kaip: 1) kuro rinklių išdėstymas šachmatine tvarka; 2) senų rinklių iškrovimas iš baseino – tuščios kuro rinklių vietos, gali skatinti natūralią oro cirkuliaciją, taip gerinant esamų kuro rinklių aušinimą; 3) įvykus baseino avarijai kuro rinklių perkrovimo metu iš reaktoriaus į baseiną, būtina apriboti kuro rinklių iškrovimą. Įvykus šilumnešio praradimo atvejui arba užvirus šilumnešiui ir jam išgaravimus, gali būti sunku užtikrinti šių priemonių veikimą dėl padidėjusio radiacijos fono [27-28].

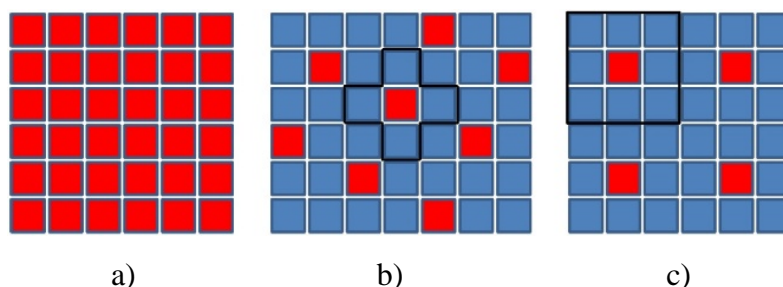
#### **4.2. Pagrindinės saugos funkcijos baseinui**

Baseino projektinės avarijos gali būti: cirkuliacinių siurblių ir/arba šilumokaičių gedimas, šilumnešio užvirimas, gaisras, šilumnešio nuotėkis, mechaninis šiluminio apvalkalo pažeidimas, šiluminio apvalkalo suirimas dėl aukštos temperatūros, elektros energijos praradimas ir kt. Todėl yra nustatyti priimtini kriterijai baseinui, kurie pateikti 4.1. lentelėje. Pagrindinės baseino saugos funkcijos – užtikrinti žemą kritiškumo koeficiento reikšmę, stabilų šilumnešio lygį ir temperatūrą bei nepertraukiamai šalinant išsiskiriančią liekamąją šilumą.

#### 4.1. lentelė. Priimtimumo kriterijai išlaikymo baseinui.

Reaktyvumo koeficientas	Ne didesnis, kai 95%
Šilumnešio temperatūra	Ne didesnė, kaip 50 °C
Šilumnešio lygis virš rinklių	Ne mažiau, kaip 3 m
Šiluminio apvalkalo temperatūra	Ne didesnė, kaip 700 °C
Vandenilio koncentracija	Ne didesnė, kaip 4 % patalpos tūrio
Radiacijos poveikis projektinių avarių metu	Ne didesnis, kaip 10 mSv

Kritiškumo koeficiento reikšmė neturi siekti 1, todėl panaudoto branduolinio kuro rinklės išdėstomos 1x1, 1x4 arba 1x8 principu (dažniausiai naudojamas 1x4 principas) [5, 20]. Išdėstymo principų skirtumai pavaizduoti 4.2. paveiksle. Kitas faktorius, ribojantis kritiškumo koeficientą – didelės galios neutronų absorberis „Bisco Boraflex“ esantis konteinerių sienelėse [5].



4.2. pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių išdėstymo principai [5]: a) 1x1; b) 1x4; c) 1x8. Perkrovimo metu į baseiną patalpintos naujos kuro rinklės pažymėtos raudonai, „senos“ – mėlynai.

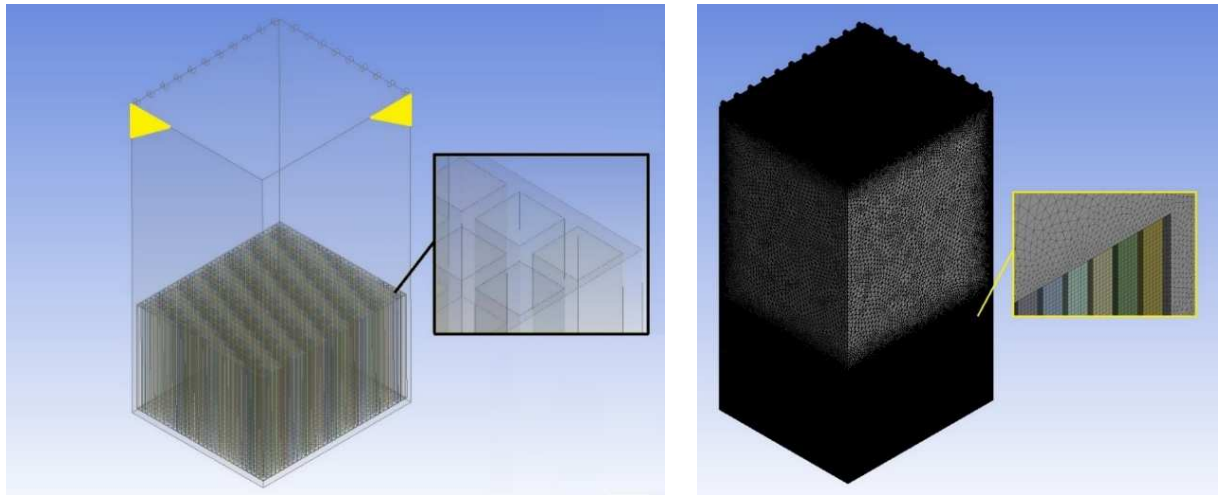
#### 4.3. Avarių pasekmių sušvelninimas

Apsaugoti branduolinius įrenginius nuo avarių ir avarių pasekmės sušvelninti branduolinėje elektrinėje turi būti ne tik daugybė įvairių saugos sistemų, tačiau būtinas iš anksto parengtas veiksmų planas, kuriuo būtina vadovautis įvykus avarijai. Vadovaujantis šiais veiksmų planais, turi būti užkirstas kelias tolimesnei avarijos eigai (ji turi būti suvaldyta) arba sušvelnintos avarijos pasekmės visuomenei ir aplinkai, pvz. radioaktyvių medžiagų pasklidimas iš baseino į branduolinės elektrinės patalpas arba į aplinką. Veiksmų planuose aprašyti evakuacijos planai, avarinis branduolinės elektrinės (ar įrenginio) eksploatavimas ir sunkių avarių valdymas. Šie planai išdėstyti įvairiose branduolinės elektrinės vietose. Branduolinės elektrinės darbuotojams periodiškai turi būti rengiami mokymai – pratybos tam, kad būtų tinkamai reaguojama į susiklosčiusią situaciją. Kiekvienas pratybas turėtų stebėti inspektoriai iš įvairių saugos institucijų [5].

## 5. REZULTATAI

Skaitiniams tyrimams atlikti, buvo sukurtas baseino modelis (1/4 pagal simetrijos plokštumas – pažymėta geltonai). Kaip matyti iš 5.1. paveikslo, priešingai, negu kitų mokslininkų sukurti baseino modeliai, kurie pavaizduoti 1.1.–1.3. paveiksluose, šis modelis pasižymi detalumu. Literatūros apžvalgoje aptarėme, kad ankstesniuose baseinų modeliuose, visas kuro rinklės imituoja paprastas, homogeninis, stačiakampis gretasienis. Nors sukurtame baseino modelyje kiekviena rinklė taip pat supaprastinta (stačiakampis gretasienis), tačiau kiekviena rinklė yra individuali. Tokiu būdu galima priartėti prie realaus baseino modelio su realiu kuro rinklių išdėstymu, detaliau analizuoti šilumnešio cirkuliaciją, esant įvairiems kuro rinklių išdėstymams. Baseino modelis suskaidytas į 10,2 mln kontrolinių tūrių, kurie susideda iš kelių kontrolinių tūrių tipų: rinklės į kvadratinius kontrolinius tūrius, o baseinas į trikampes prizmes. Sukurtame modelyje esančias kuro rinkles imituoja stačiakampiai gretasieniai, kuriems pritaikyta „Porous media“ funkcija [29]. Ši funkcija naudojama tada, kai geometrinėje figūroje yra daug, žymiai sudėtingesnių geometrinių figūrų, dėl kurių neįmanoma viso modelio suskaidyti į kontrolinius tūrius ir atlikti termohidraulinę analizę. Funkcija „Porous media“ leidžia sudėtingos geometrinės formos figūroms priskirti apibendrintas hidraulinių nuostolių susidarymo charakteristikas [4]. Taikomas  $k - \varepsilon$  tekėjimo modelis, kuris skirtas uždaviniams, turintiems mažus slėgio griadientus. Pradinė šilumnešio temperatūra 28°C, įvertintos menamos baseino sienos, kurių storis 2,0 m, šilumos laidumo koef.  $\lambda = 2,5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Šilumnešio nuotekis, vartų nesandarumas, rinklių ar konteinerių pažeidimai šioje mokslinėje studijoje nevertinami. Konteineriai nemodeliuojami, nes priešingu atveju uždavinys taptų labai sudėtingas ir neišsprendžiamas. Dėl pasirinktos geometrijos priimamos prielaidos, kad baseine gali būti talpinamos 3828 kuro rinklės. Tarpai tarp panaudoto branduolinio kuro rinklių 40 mm, rinklės pakeltos į 26 cm aukštį nuo baseino grindų. Nevertinama liekamosios šilumos mažėjimo priklausomybė nuo laiko. Skaičiavimams atlikti naudojamas didelio našumo paskirstytų skaičiavimų kompiuteris „SGI Altix ICE4800“ apie kurį detalai aprašyta PRIEDE A. Baseine tiriama termohidrauliniai procesai, kai visiškai sugenda aušinimo sistema – nėra priverstinės šilumnešio cirkuliacijos.





a)

b)

5.1. pav. Baseino modelis: a) 1/4 pagal simetrijos plokštumas – simetrijos plokštumos pažymėtos geltonai; b) suskaidymas į kontrolinius tūrius.

Kaip matyti 5.1. lentelėje, maksimaliai pakrautame baseine, kai reaktorius nėra avarinės būklės ir visos kuro rinklės jame, yra 3055 kuro rinklės, kurios susideda iš neseniai ir seniai pakrautų kuro rinklių. Minimaliai pakrautame baseine laikomos 852 kuro rinklės, t.y. trys paskutiniai pakrovimai iš reaktoriaus. Branduolinio kuro kampanija trunka 23 mėnesius. Per dvi dienas, kai reaktorius buvo sustabdytas, nuimamos pagrindinės patalpos grindys esančios virš reaktoriaus, reaktoriaus korpuso dangtis, garo džiovintuvas ir separatorius. Šie įrenginiai talpinami būtent jiems skirtame baseine. Kai panaudotas branduolinis kuras paruoštas iškrovimui iš reaktoriaus (2 diena nuo reaktoriaus sustabdymo), atidaromi reaktorių ir baseiną jungiančio perkrovimo kanalo vartai – pradedamas panaudoto branduolinio kuro perkrovimas iš reaktoriaus į baseiną. Per šešias dienas (8 diena) kuras pilnai iškraunamas iš reaktoriaus – baseine didžiausias šilumos išsiskyrimas. Nuo 14 iki 20 dienos į reaktorių pakraunamas naujo branduolinio kuro rinklės. Dvidešimtą dieną uždaromi jungiamojo kanalo vartai ir iki 25 dienos reaktorius paruošiamas tolimesniam darbui. Panaudoto branduolinio kuro perkrovimas užtrunka 25 dienas, jeigu nėra nesklandumų.

5.1. lentelė. Pagrindinės techninės charakteristikos reaktoriui ir maksimaliai bei minimaliai pakrautam baseinui [5].

	Maksimaliai	Minimaliai
Branduolinio kuro kampanija	23 mėnesiai (725 dienos)	
Konteinerių kojų aukštis	26 cm	
Tarpai tarp rinklių baseine <sup>1</sup>	20 mm	
Konteinerių tipas	Uždaras	
Rinklėms laikyti skirtas vietų skaičius <sup>2</sup>	3819	
Minimalus rinklių skaičius <sup>3</sup>	2771	568
Maksimalus rinklių skaičius <sup>4</sup>	3055	852
Panaudoto branduolinio kuro rinklių tipai	9x9	
Panaudoto branduolinio kuro išdėstymo principas	1x4	
Jungiamojo kanalo vartų atidarymas	2 diena <sup>5</sup>	
Panaudoto branduolinio kuro rinklių iškrovimo iš reaktoriaus pradžia	2 diena <sup>6</sup>	
Panaudoto branduolinio kuro rinklių iškrovimo iš reaktoriaus pabaiga	8 diena <sup>7</sup>	
Naujo branduolinio kuro rinklių pakrovimo į reaktorių pradžia	14 diena <sup>8</sup>	
Naujo branduolinio kuro rinklių pakrovimo į reaktorių pabaiga	20 diena <sup>9</sup>	
Jungiamojo kanalo vartų uždarymas	20 diena <sup>10</sup>	
Reaktoriaus prastovos laiko pabaiga	25 diena <sup>11</sup>	

<sup>1</sup> – sukurtame baseino modelyje dėl tolygaus kuro rinklių pasiskirstymo baseine, tarpai tarp rinklių yra 40 mm.

<sup>2</sup> – sukurtame modelyje priimama, kad baseine yra 3828 vietos rinklėms.

<sup>3</sup> – minimalus kuro rinklių kiekis baseine, kai iškraunamos visos arba dalis senų rinklių tinkamų sausam saugojimui (maksimalus arba minimalus baseino užpildymas).

<sup>4</sup> – maksimalus kuro rinklių kiekis esantis baseine maksimalaus arba minimalaus pakrovimo metu.

<sup>5-11</sup> – šis laikas skaičiuojamas nuo momento, kai reaktorius sustabdomas.

Kaip matyti iš 5.2. lentelės, baseino eksploataciją būtina suskirstyti į ciklus. Suskirstymas reikalingas tam, kad nustatyti liekamosios šilumos išsiskyrimą ir kuro rinklių kiekį baseine, visos kampanijos metu. Priima prielaida, kad 254 kuro rinklės iš baseino į sauso tipo statines pakraunamos prieš pat naujų kuro rinklių pakrovimą.

5.2. lentelė. Baseino darbo ciklų trukmė kampanijos metu [5].

Ciklo Nr.	Ciklo apibūdinimas	Laikas <sup>10</sup> , d.	Laikas, %	Baseino-reaktoriaus sąryšis
1	Panaudoto branduolinio kuro rinklių iškrovimas iš reaktoriaus (254 kuro rinklės)	2-8	0,9	Vartai atidaryti
2	Reaktoriaus inspekcija, likusių rinklių iškrovimas ir paleidimas	8-25	2,4	Vartai atidaryti
3	Didžiausia liekamosios šilumos išsiskyrimas ne prastovos metu	25-60	5	Vartai uždaryti
4	Kitas didžiausias liekamosios šilumos išsiskyrimas ne prastovos metu	60-240	25,7	Vartai uždaryti
5	Kampanijos pabaiga	240-725	66	Vartai uždaryti

<sup>10</sup> – Laikas skaičiuojamas nuo reaktoriaus sustabdymo.

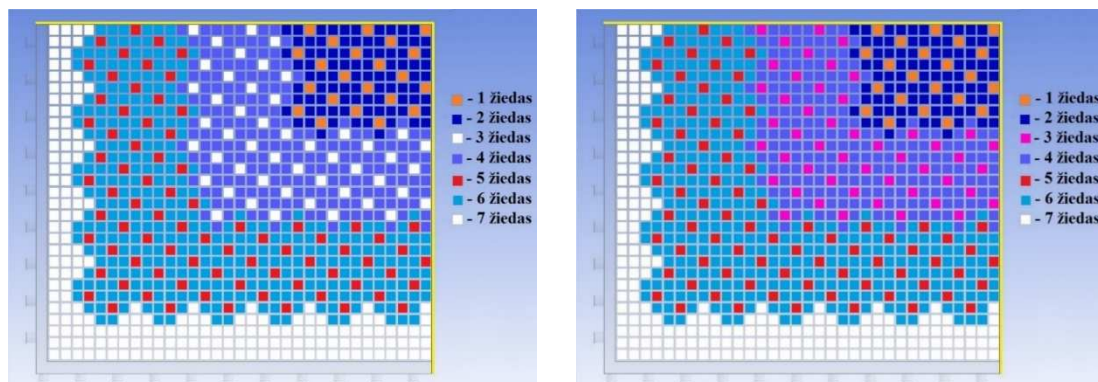
Daroma prielaida, kad bet kokia baseino avarija turi būti sustabdyta per 72 valandas, nuo avarijos pradžios. Avarijos kontrolės laikas suskirstomas į tokius etapus:

1. Per 24 valandas privalo atvykti išorinės (ne branduolinės elektrinės) avarinės pagalbos tarnybos.
2. Per 48 valandas turi būti parengtas planas, kaip sukontroliuoti avariją ir pasirūpinta reikiama avarijos likvidavimo įranga.
3. Po 48 valandų, jeigu panaudotas branduolinis kuras nėra atsidengęs (šilumnešis nėra nukritęs žemiau, negu kritinio lygio riba ir yra galimybė patekti į pagrindinę patalpą), galima papildyti aušalo kiekį esantį baseine, panaudojant papildymo sistemą.
4. Privaloma per 72 valandas atnaujinti aušinimo sistemos darbą.

### 5.1. Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1 ir ciklas Nr. 2)

Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1 ir ciklas Nr. 2), kai kuro rinklės išdėstomos žiedine tvarka, pavaizduotas 5.2. paveiksle. Pirmas ir trečias žiedai – skirti naujai pakrautoms kuro rinklėms (daugiausiai liekamosios šilumos išskiriančioms rinklėms). Šie žiedai – išsidėstę baseino centre. Taip pat prieš pakraunant kuro rinkles į baseiną, pirmas ir trečias žiedai turi būti tušti, nes jie skirti būtent 254 kuro rinklėms iš reaktoriaus. Penktame žiede talpinamos rinklės iš prieš tai buvusio kuro iškrovimo. Antrame, ketvirtame ir šeštame žieduose saugomas seniai iškrautas kuras. Septintas žiedas – tuščias, jis skirtas avarinei reaktoriaus situacijai, kuomet visas kuras

iškraunamas iš reaktoriaus į baseiną. Simetrijos plokštumos pažymėtos geltonai. Maksimaliai pakrauto baseino šiluminės charakteristikos pateiktos 5.3. lentelėje.



a)

b)

5.2. pav. Rinklių išsidėstymas maksimaliai pakrautame baseine: a) ciklas Nr. 1; b) ciklas Nr. 2.

5.3. lentelė. Kuro rinklių šiluminė galia maksimaliai pakrautame baseine [5].

Ciklo Nr.	Reaktoriuje likusių rinklių šiluminė galia, kW	Laikas, d.	Baseino šiluminė galia, kW						Iš viso (2859)
			1 žiedas (88)*	2 žiedas (352)	3 žiedas (0)	4 žiedas (784)	5 žiedas (315)	6 žiedas (1320)	
1	10216	3,6	1927	80	-	179	465	301	2952
	9915	3,9	1867	80	-	179	452	301	2878
	9006	5,0	1690	80	-	178	417	300	2666
	7406	8,0	1403	80	-	178	358	300	2320
	6710	10,0	1282	80	-	178	334	300	2174
		Dienos	1 (88)	2 (352)	3 (196)	4 (784)	5 (315)	6 (1320)	Bendras (3055)
2	4395	13,1	1144	80	1533	178	332	300	3567
	4117	15,0	1077	80	1444	178	330	299	3409
	3530	20,0	957	79	1294	176	318	296	3120
		Dienos	1 (88)	2 (352)	3 (196)	4 (784)	5 (315)	6 (1320)	Bendras 3055
3		37	720	79	973	177	324	298	2571
4		107	422	78	602	173	301	292	1868
5		383	191	73	315	162	230	273	1245

\*- panaudoto branduolinio kuro rinklių skaičius esantis žiede.

Didelio našumo paskirstyti skaičiavimai trunka labai ilgai, todėl nėra galimybės sumodeliuoti visus 5 ciklus tiek pilnai, tiek minimaliai pakrautam baseinui. Priimama prielaida, kad baseino aušinimo sistemos veikla visiškai sutrinka esant ciklui Nr. 1 ir ciklui Nr. 2 (esant didžiausiam liekamosios šilumos kiekiui baseine), todėl tiriami termohidrauliniai procesai maksimaliai ir minimaliai pakrautam baseinui esant šiems ciklams.

Vienos panaudoto branduolinio kuro rinklės šiluminė galia apskaičiuojama:

$$Q_r = \frac{Q_z}{k_r} = \frac{1144}{88} = 13 \text{ kW}; \quad (5.1)$$

čia:  $Q_r$  – vienos kuro rinklės išskiriamas šilumos kiekis, kW;  $k_r$  – rinklių kiekis žiede;  $Q_z$  – žiedo šiluminė galia, kW.

Priimama, kad kiekvienoje kuro rinklėje išsiskiria tūrinė liekamoji šiluma, kuri apskaičiuojama:

$$Q_v = \frac{Q_r}{V} = \frac{13000}{0,07168} = 181359,31 \text{ W/m}^3. \quad (5.2)$$

čia:  $V$  – supaprastintos kuro rinklės tūris,  $m^3$ .

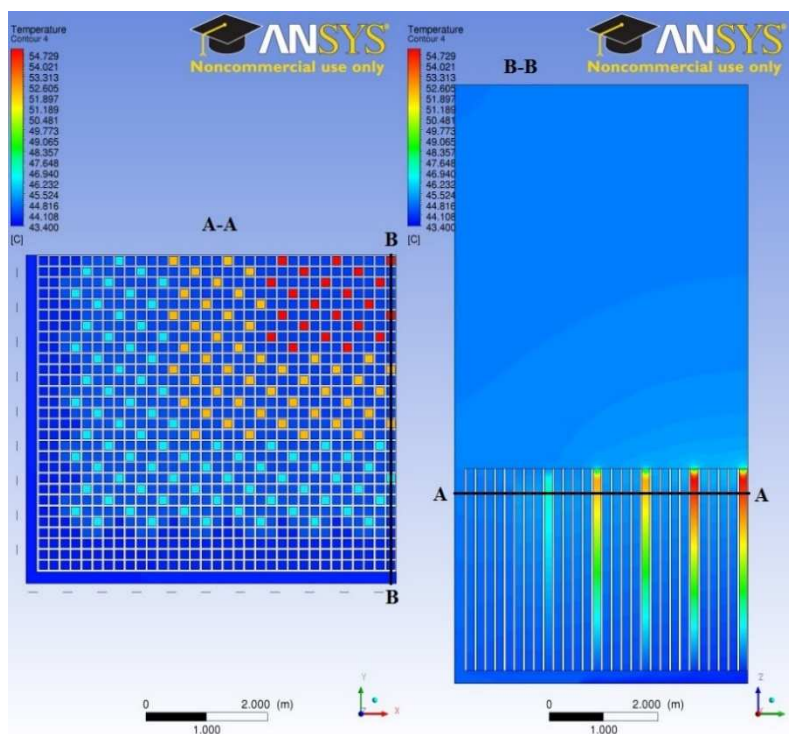
5.4. lentelė. Liekamosios šilumos perskaičiavimas į tūrinę liekamąją šilumą – maksimalus baseino pakrovimas.

	Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1)	
	Vienos rinklės šiluminė galia, W	Vienos rinklės tūrinė šiluminė galia, W/m <sup>3</sup>
1 žiedas	21897,73	305488,97
2 žiedas	227,27	3170,58
4 žiedas	228,32	3185,23
5 žiedas	1476,19	20593,91
6 žiedas	228,03	3181,18
	Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 2)	
	Vienos rinklės šiluminė galia, W	Vienos rinklės tūrinė šiluminė galia, W/m <sup>3</sup>
1 žiedas	13000,00	181359,31
2 žiedas	227,27	3170,58
3 žiedas	7821,43	109114,55
4 žiedas	227,04	3167,37
5 žiedas	1053,97	14703,64
6 žiedas	227,27	3170,58

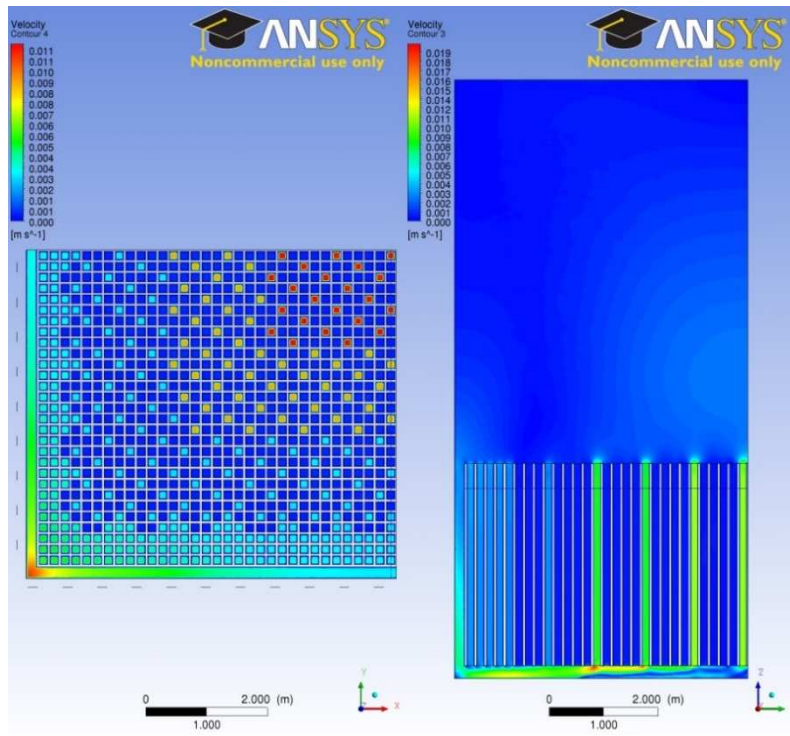
Paveiksluose 5.3.–5.6. pateikti modeliavimo rezultatai, visiškai sugedus baseino aušinimo sistemai. Visi rezultatai atvaizduoti dviejuose baseino pjūviuose A-A ir B-B.

Praėjus 10 valandų po aušimo sistemos gedimo, vidutinė baseino temperatūra pakyla nuo 28°C iki 43,7°C. Iškart po aušinimo sistemos gedimo, veikiant termogravitacinėms jėgoms, baseine įsivyrąja natūrali konvekcija. Šilumnešis įtekėjęs į karščiausias rinkles, jų viršuje, sušyla iki 54°C. Šilumnešio greitis karščiausiose kuro rinklėse (1 žiede) yra 0,006 m/s, o senose, mažą šilumos kiekį išskiriančiose rinklėse, šilumnešio greitis labai mažas. Po 30 valandų šilumnešis, karščiausių rinklių viršuje, pasiekia virimo temperatūrą, šilumnešio greitis 0,022 m/s. Praėjus 35 val. po aušinimo sistemos gedimo, baseine esančio šilumnešio temperatūra lygi šimtui laipsnių – šilumnešis verda. Abiem atvejais, kai baseinas maksimaliai ir minimaliai pakrautas, šilumnešis veikiamas termogravitacinių jėgų per karščiausias rinkles kyla į baseino viršų, viršuje šiek tiek atvėjęs, ties baseino sienomis (tarpu tarp 7 žiedo ir sienos bei pačiu 7 žiedu) leidžiasi žemyn ir nuteka po rinkėmis.

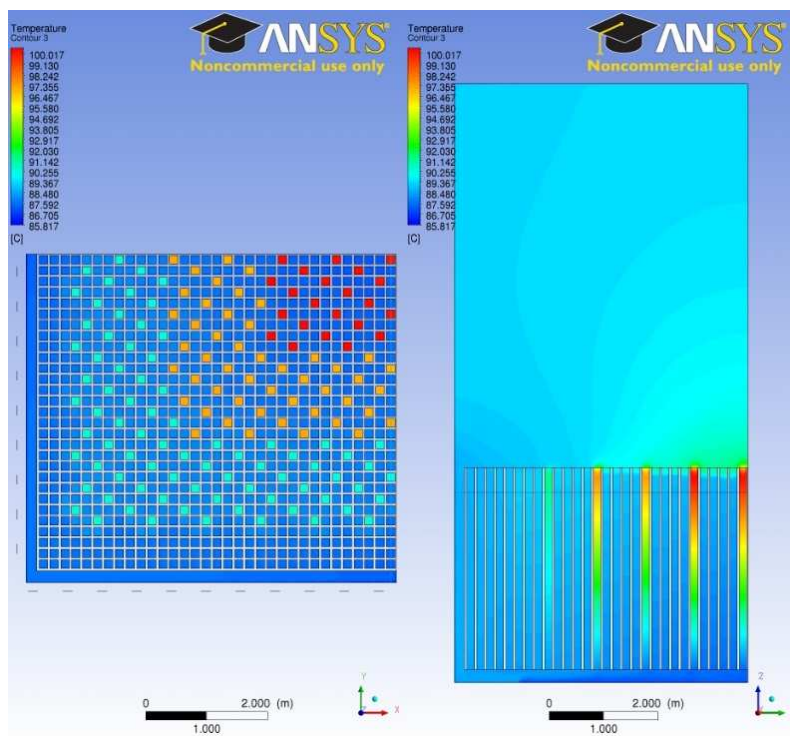
Šiame skaitiniame modelyje nėra vertinamas šilumnešio garinimas, todėl garinimas apskaičiuojamas rankiniu būdu ir kuro rinklių atsidengimo grafikai pateikti 5.18.–5.19. paveiksluose.



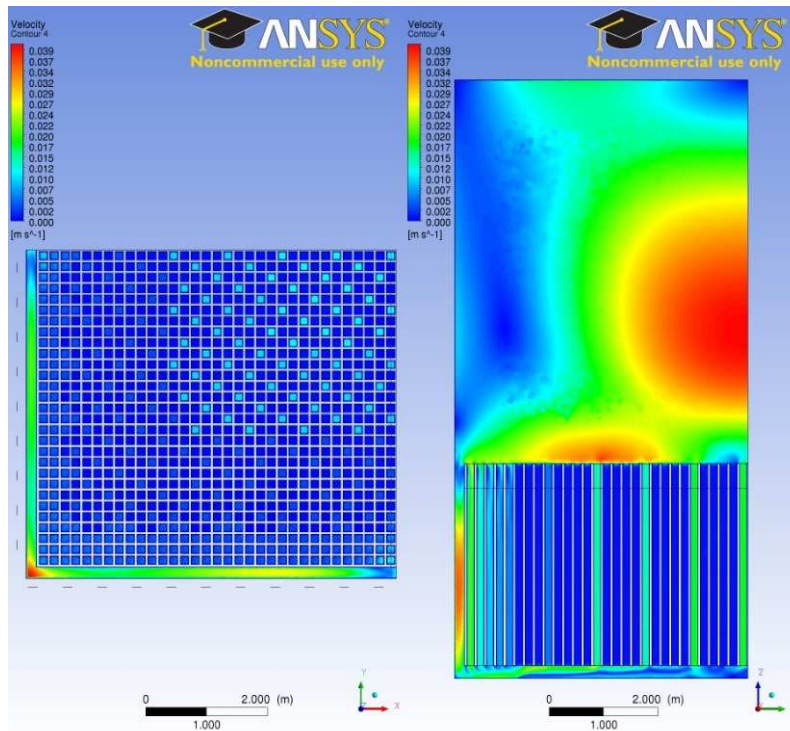
5.3. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.4. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo.



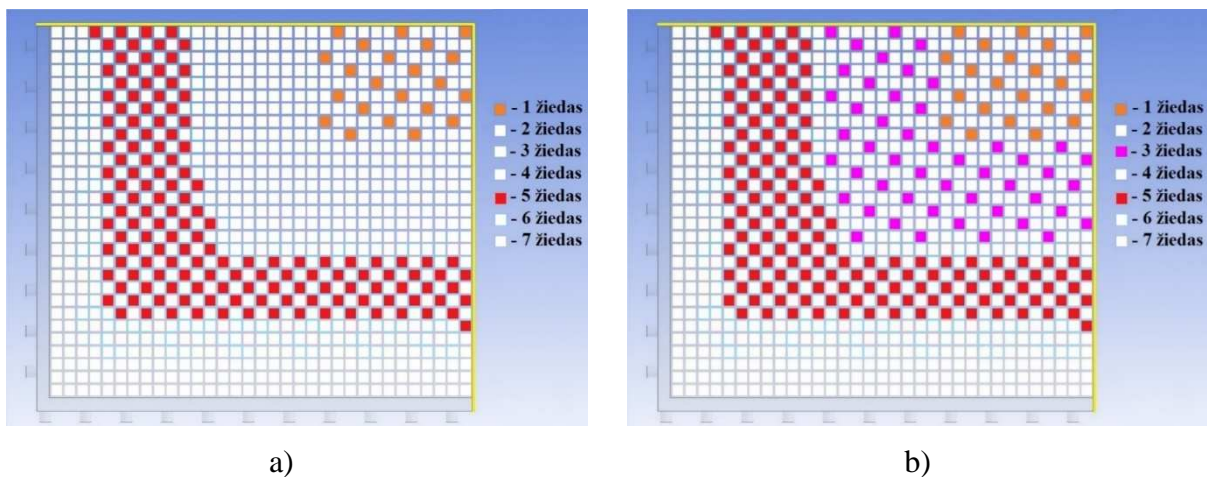
5.5. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 30 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.6. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 30 val. po aušinimo sistemos gedimo.

## 5.2. Minimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1 ir ciklas Nr. 2)

Minimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1 ir ciklas Nr. 2) pavaizduotas 5.7. paveiksluose. Minimaliai pakrautame baseine talpinamas tik paskutinių trijų iškrovimų metu iškrautos kuro rinklės. Rinklių išdėstymo principas toks pats, kaip ir pilnai pakrautame baseine, tačiau 5 žiede kuro rinklės talpinamos arčiau viena kitos, dėl vietos trūkumo, nes jas išdėsčius 1x4 metodu, joms reikėtų 2840 vietų (kuro rinklės būtinai turi būti išdėstomos laikantis išduotos licencijos taisyklių). Minimaliai pakrauto baseino šiluminės charakteristikos pateiktos 5.5. lentelėje, o visų žiedų turinės šilumos charakteristikos pateiktos 5.6. lentelėje.



5.7. pav. Rinklių išsidėstymas minimaliai pakrautame baseine: a) ciklas Nr. 1; b) ciklas Nr. 2.



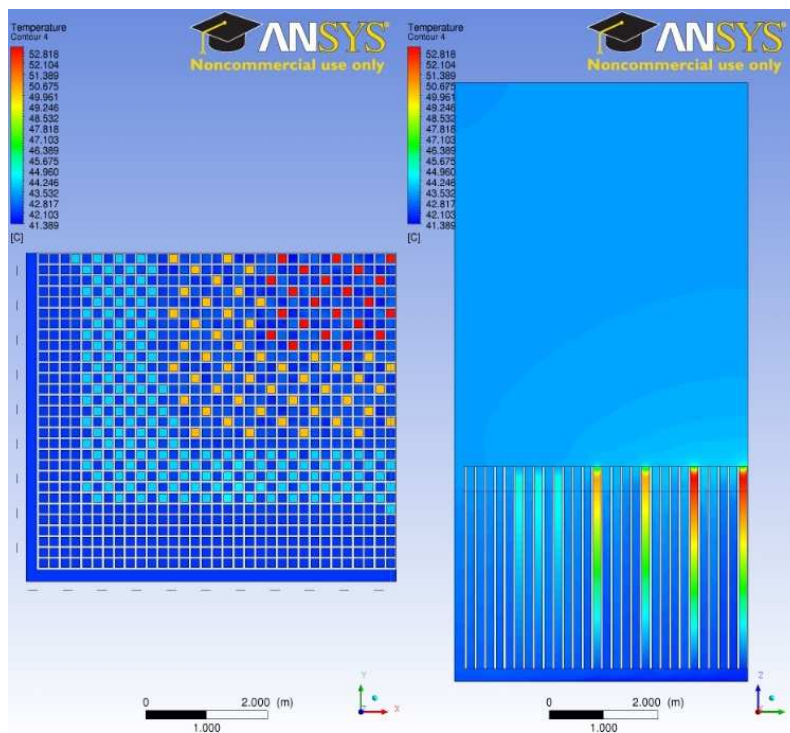
5.5. lentelė. Kuro rinklių šiluminė galia minimaliai pakrautame išlaikymo baseine [5].

Ciklo Nr.	Reaktoriuje likusių rinklių šiluminė galia, kW	Baseino šiluminė galia, kW							
		Laikas, d.	1 žiedas (88)	2 žiedas (0)	3 žiedas (0)	4 žiedas (0)	5 žiedas (568)	6 žiedas (1320)	Bendras (656)
1	10216	3,6	1927	-	-	-	599	-	2526
	9915	3,9	1867	-	-	-	587	-	2454
	9006	5,0	1690	-	-	-	551	-	2241
	7406	8,0	1403	-	-	-	492	-	1895
	6710	10,0	1282	-	-	-	468	-	1750
		Dienos	1 (88)	2 (0)	3 (196)	4 (0)	5 (568)	6 (0)	Bendras (852)
2	4395	13,1	1144	-	1533	-	466	-	3143
	4117	15,0	1077	-	1444	-	464	-	2985
	3530	20,0	957	-	1294	-	448	-	2699
		Dienos	1 (88)	2 (0)	3 (196)	4 (0)	5 (568)	6 (0)	Bendras (852)
3		37	720	-	973	-	455	-	2149
4		107	422	-	602	-	427	-	1451
5		383	191	-	315	-	339	-	845

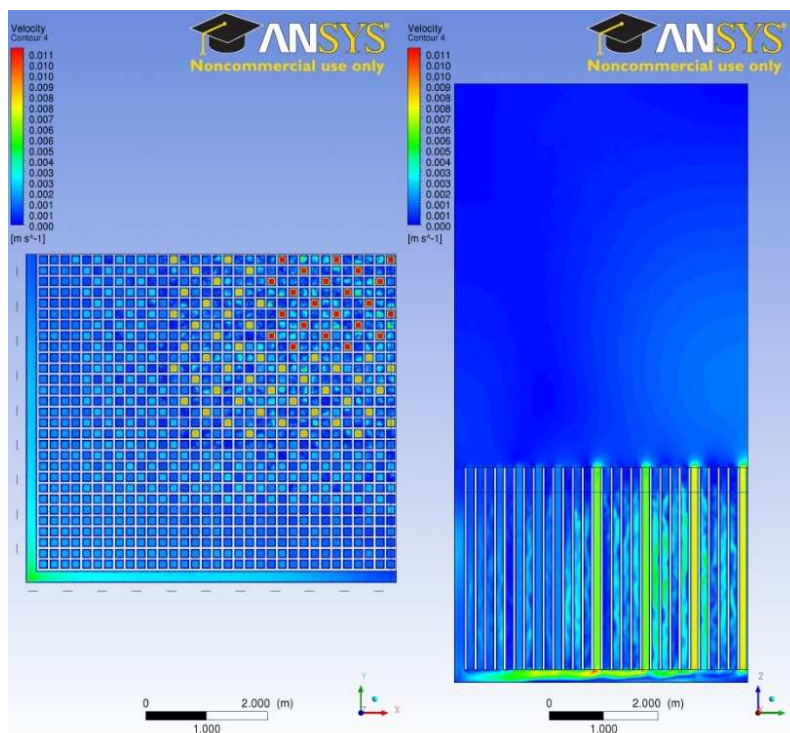
5.6. lentelė. Liekamosios šilumos perskaičiavimas į tūrinę liekamąją šilumą – minimalus baseino pakrovimas.

	Minimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 1)	
	Vienos rinklės šiluminė galia, W	Vienos rinklės tūrinė šiluminė galia, W/m <sup>3</sup>
1 žiedas	21897,73	305488,97
5 žiedas	1054,58	14712,15
	Minimaliai užpildytas išlaikymo baseinas (ciklas Nr. 2)	
	Vienos rinklės šiluminė galia, W	Vienos rinklės tūrinė šiluminė galia, W/m <sup>3</sup>
1 žiedas	13000,00	181359,31
3 žiedas	7821,43	109114,55
5 žiedas	820,42	11445,45

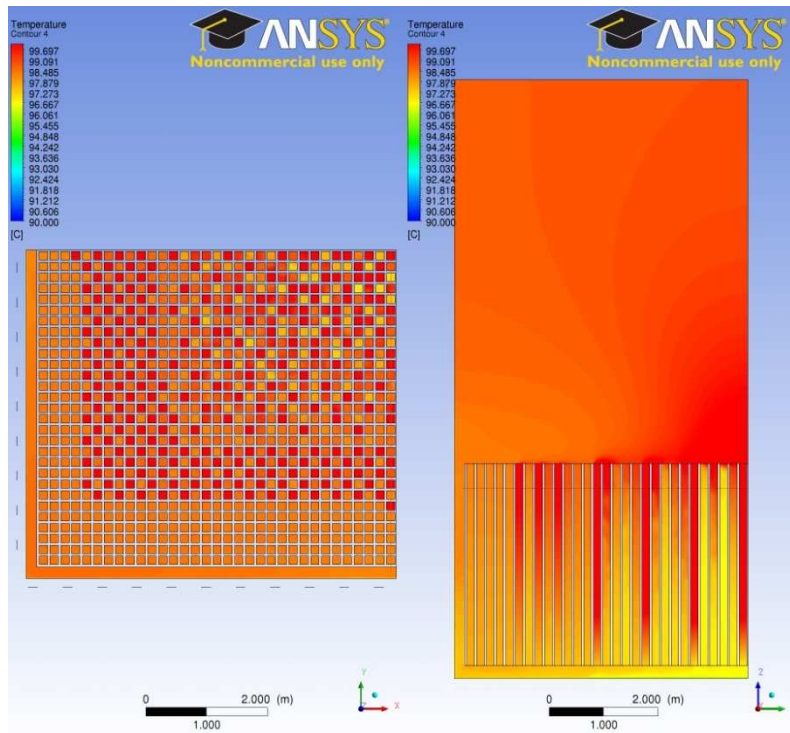
Kaip matyti iš 5. 8. – 5.11. paveikslų, minimaliai pakrautame baseine, praėjus 10 valandų po aušimo sistemos gedimo, vidutinė baseino temperatūra pakyla nuo iki 42°C. Šilumnešio greitis karščiausiose kuro rinklėse (1 žiede) yra 0,0068 m/s. Praėjus 36 valandoms po aušinimo sistemos gedimo, beveik šilumnešio temperatūra lygi šimtui laipsnių, šilumnešio greitis karščiausiose rinklėse yra 0,020 m/s. Šilumnesis užvirs praėjus 37 valandoms nuo avarijos pradžios.



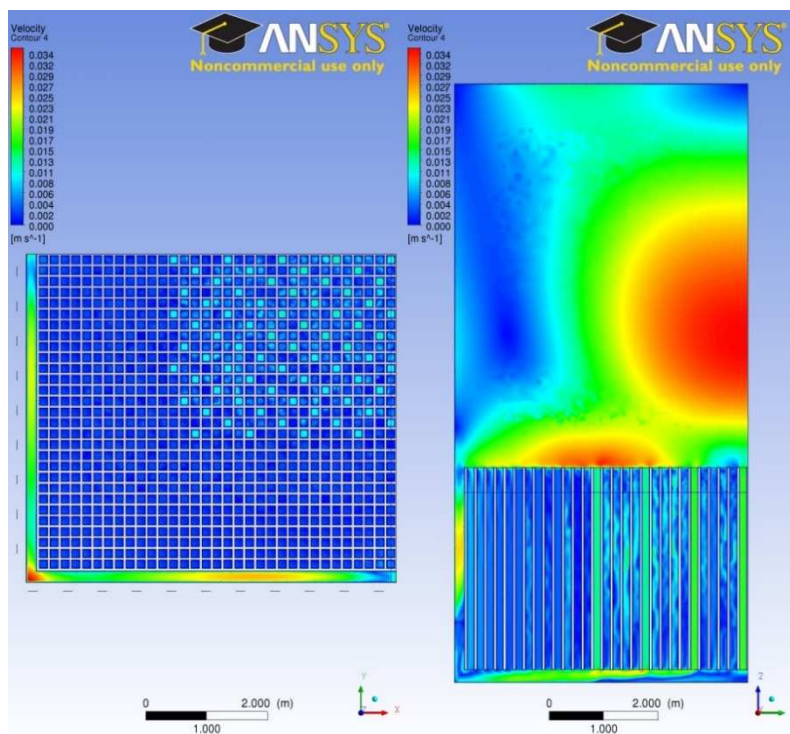
5.8. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.9. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 10 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.10. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 36 val. po aušinimo sistemos gedimo.

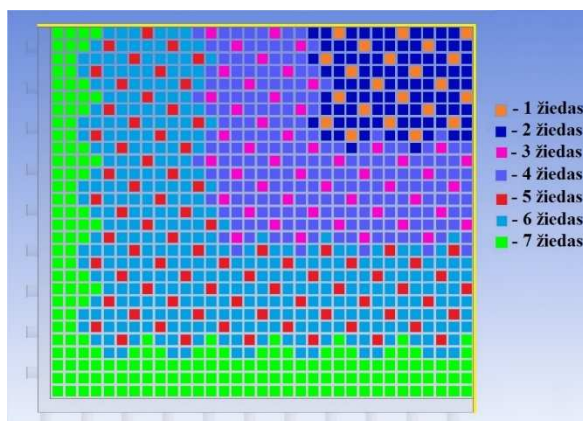


5.11. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 36 val. po aušinimo sistemos gedimo.

### 5.3. Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 3) su iškrautomis panaudoto branduolinio kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos

Priimama konservatyvi prielaida, kad baseinas pakraunamas maksimaliai, t.y. 3055 kuro rinklės, kurios išskiria 2571 kW šilumos (5.3. lentelė, ciklas Nr. 3) ir staiga įvyksta reaktoriaus gedimas, dėl kurio į baseiną (septintą žiedą) iškraunamos visos branduolinio kuro rinklės, ešančios

aktyviojoje zonoje. Priimama, kad kuro rinklės iš reaktoriaus į baseiną iškraunamos per 15 dienų, po reaktoriaus sustabdymo, tuomet kuro rinklių iš aktyviosios zonos šiluminė galia yra 4117 kW. Suminė baseino šiluminė galia 6688 kW. Maksimaliai pakrautas baseinas su naujai iškrautomis rinklėmis į septintą žiedą pavaizduotas 5.12. paveiksle. Visų žiedų liekamosios šilumos charakteristikos pateiktos 5.7. lentelėje. Kai baseinas pilnai užpildomas, priimama prielaida, kad visiškai sugedo baseino aušinimo sistema – toks reaktoriaus ir baseino aušinimo sistemos gedimas vienu metu labai mažai tikėtinas, tačiau įvykus tokiai gedimų sekai, baseine būtų pats didžiausias rinklių skaičius ir didžiausias šilumos išsiskyrimas, koks tik gali būti.

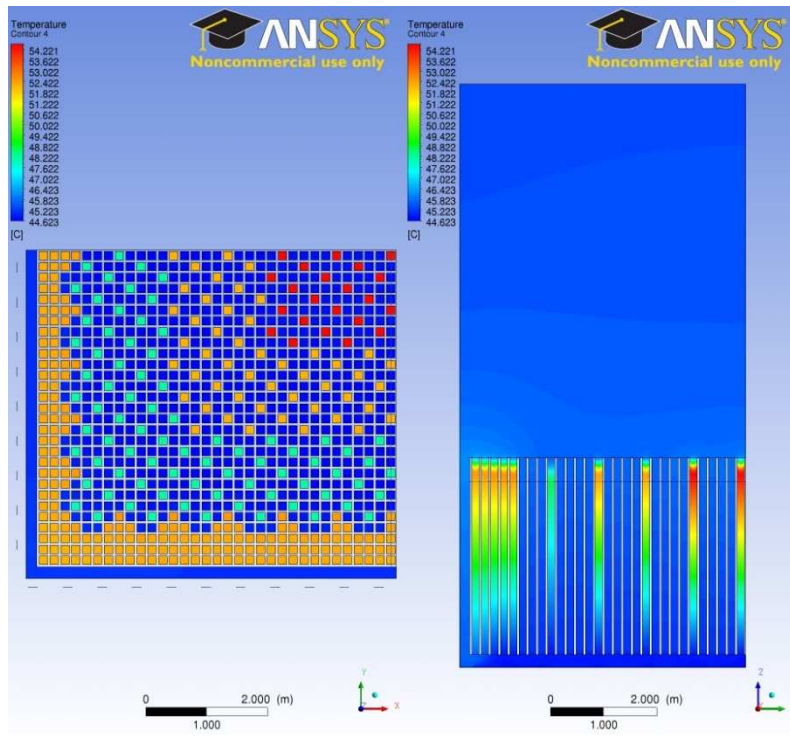


5.12. pav. Maksimaliai užpildytas baseinas (ciklas Nr. 3) su iškrautomis panaudoto branduolinio kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos.

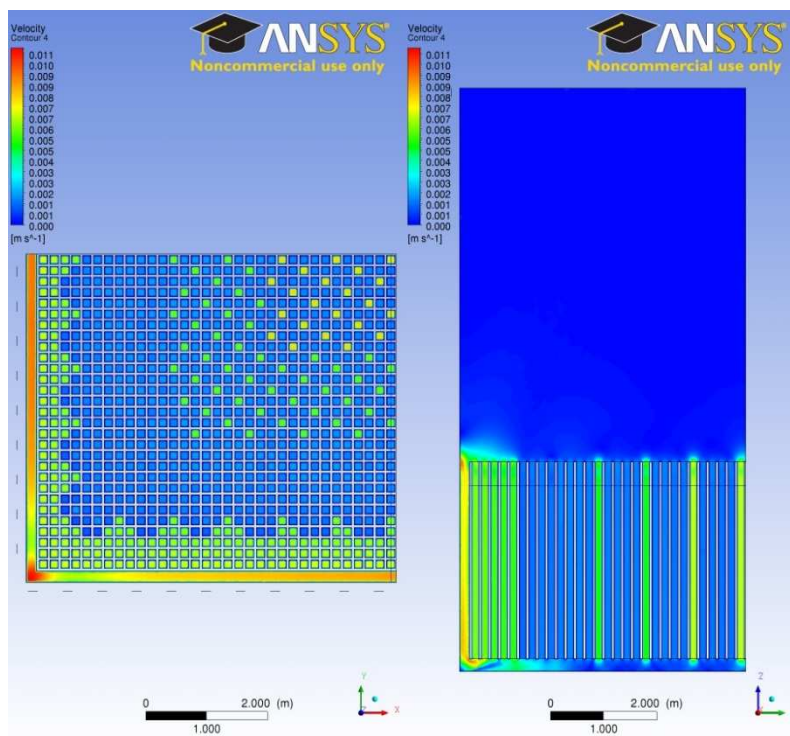
5.7. lentelė. Liekamosios šilumos perskaičiavimas į tūrinę liekamąją šilumą – maksimaliai užpildytas baseinas (ciklas Nr. 3) su iškrautomis kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos.

	Maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 3) su neseniai iškrautomis panaudoto branduolinio kuro rinklėmis iš aktyviosios zonos	
	Vienos rinklės šiluminė galia, W	Vienos rinklės tūrinė šiluminė galia, W/m <sup>3</sup>
1 žiedas	8181,82	114142,25
2 žiedas	224,43	3130,96
3 žiedas	4964,29	69255,40
4 žiedas	225,77	3149,65
5 žiedas	1028,57	14349,29
6 žiedas	225,76	3149,52
7 žiedas	5388,74	75176,83

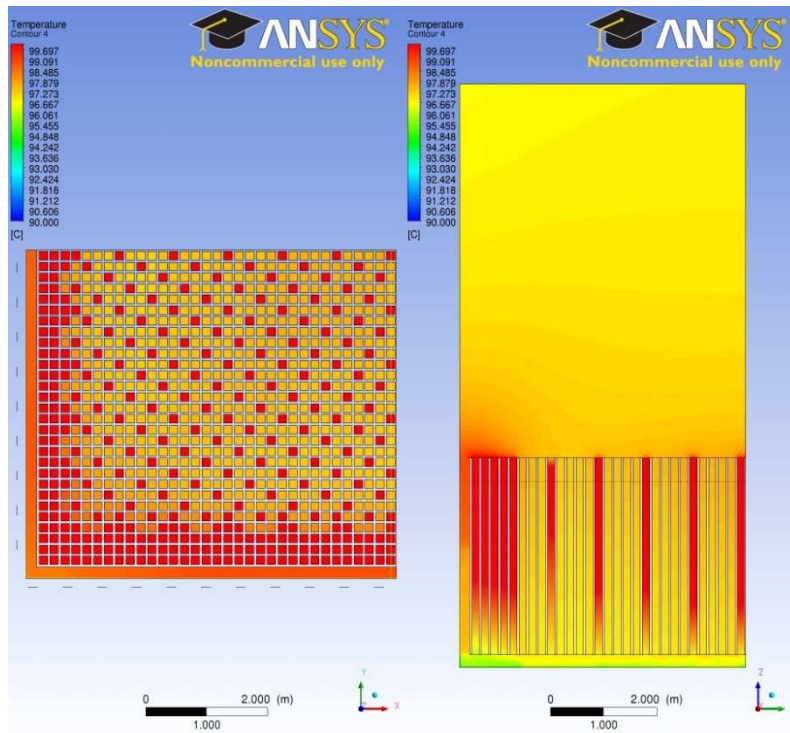
Kaip matyti iš paveikslų 5.13. – 5.16. praėjus 5 valandoms po baseino aušinimo sistemos gedimo, šilumnešis įkaistų iki 44,6°C, o jo greitis karščiausiose rinklėse ~0,006 m/s. Praėjus 15 valandų šilumnešio temperatūra – 88,5°C, greitis karščiausiose rinklėse ~0,01 m/s. Šilumnešis užverda 18 valandą, po aušinimo sistemos gedimo.



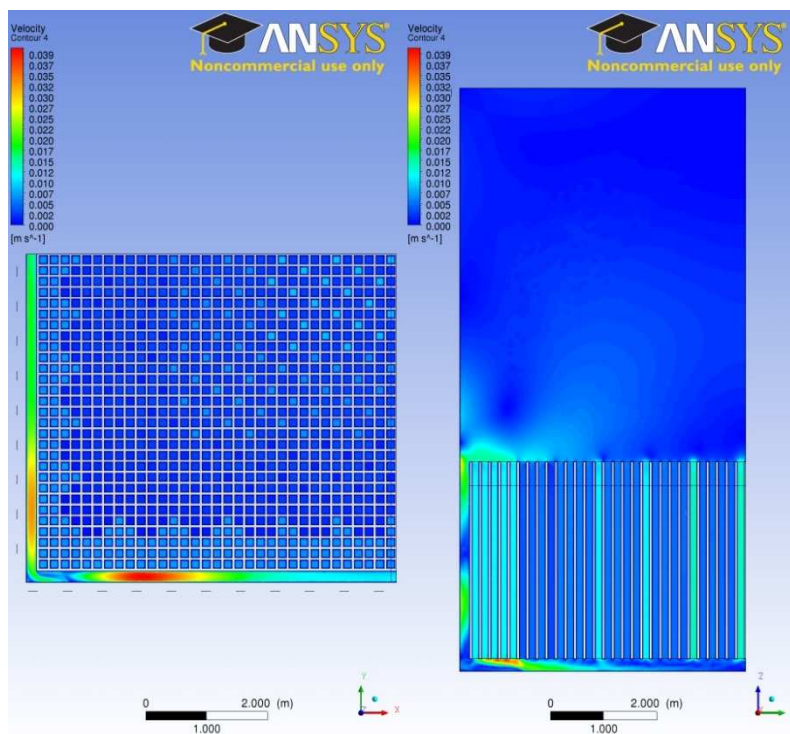
5.13. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 5 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.14. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 5 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.15. pav. Šilumnešio temperatūra baseine praėjus 17 val. po aušinimo sistemos gedimo.



5.16. pav. Šilumnešio greitis baseine praėjus 17 val. po aušinimo sistemos gedimo.

#### 5.4. Panaudoto branduolinio kuro atsidengimas

Didžiausias pavojus darbuotojams, visuomenei ir aplinkai kyla tuomet, kai radioaktyvios medžiagos pasklinda branduolinės elektrinės patalpose arba už jos ribų. Radioaktyvios medžiagos intensyviai pasklinda aplinkoje, kai šilumnešis esantis baseine atidengia kuro rinkles. Kuro rinklės

atsidengti gali dėl dviejų priežasčių: 1 – trūkio baseino grindyse; 2 – garinimo (verdant šilumnešiu). Šioje mokslinėje studijoje vertinamas kuro rinklių atsidengimas dėl šilumnešio išgaravimo [30]. Šilumnešio garavimo intensyvumas, pavaizduotas 5.8. lentelėje. Šilumnešio užvirimo laikas (nesant šilumos laidumui per baseino sienas) gali būti apskaičiuojamas naudojant formulę:

$$t_b = \frac{V \cdot (h_b - h_i)}{Q \cdot v'} = \frac{1265,4 \cdot (419000 - 125700)}{3567000 \cdot 0,001} = 28,9 \text{ val.}; \quad (5.3)$$

čia:  $V$  – šilumnešio kiekis,  $m^3$ ;  $h_b$  – 100°C vandens entalpija, J/kg;  $h_i$  – 28°C vandens entalpija, J/kg;  $Q$  – baseino šiluminė galia (maksimaliai pakrautas baseinas – ciklas Nr. 2),  $W$ ;  $v'$  – specifinis vandens tūris,  $m^3/kg$ .

Šilumnešio garinimo greitis jam užvirus (maksimalus baseino pakrovimas – ciklas Nr. 2):

$$w_s = \frac{Q}{h_s - h_b} = \frac{3567000}{2676000 - 419000} = 1,58 \text{ kg/s}; \quad (5.4)$$

čia:  $h_s$  – sočiųjų garų entalpija ties 1 bar, J/kg.

Kuro rinklių „atsidengimas“ (maksimalus baseino pakrovimas – ciklas Nr. 2) apskaičiuojamas:

$$t_u = \frac{\Delta V}{v' \cdot w_s} = \frac{928,92}{0,001 \cdot 1,58} = 163,27 \text{ val.} \quad (5.5)$$

čia:  $\Delta V$  – aušalo kiekis, esantis virš kritinio lygo ribos,  $m^3$ .

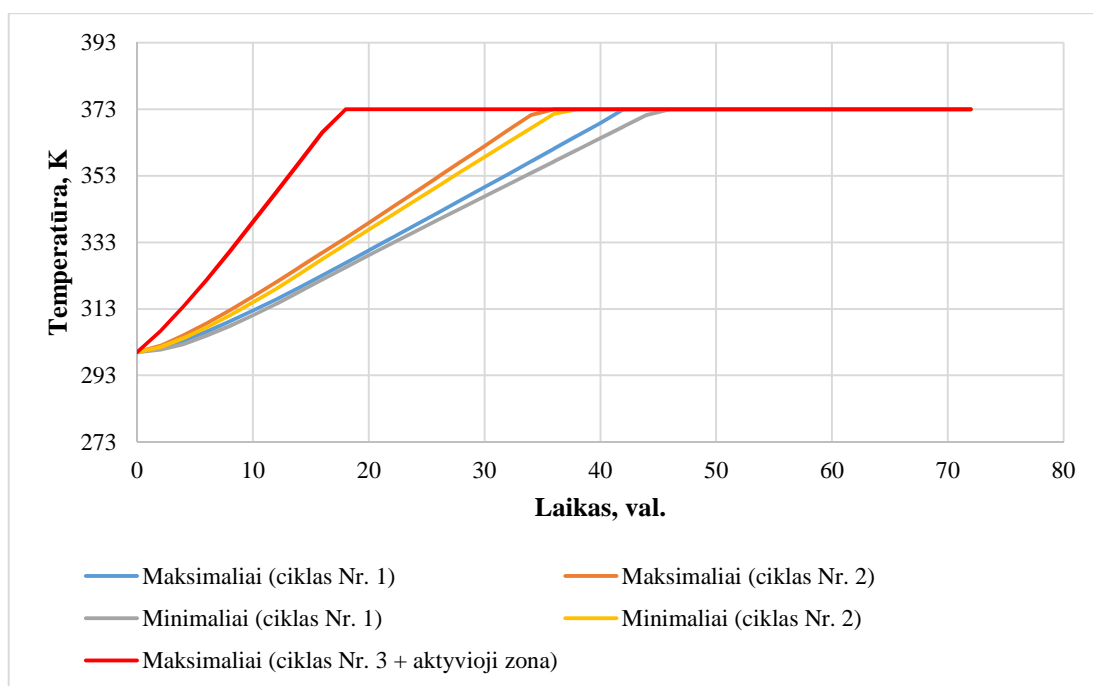
5.8. lentelė. Šilumnešio garavimo charakteristikos.

Ciklo Nr.	Maksimaliai pakrautas baseinas	
	Garavimo intensyvumas, kg/s	Atsidengimas, val.*
1	1,308	197,284
2	1,581	163,269
	Minimaliai pakrautas baseinas	
	Garavimo intensyvumas, kg/s	Atsidengimas, val.
1	1,119	230,555
2	1,393	185,295
	Maksimaliai pakrautas baseinas + aktyvioji zona	
	Garavimo intensyvumas, kg/s	Atsidengimas, val.
1	2,963	87,079

\* - skaičiuojamas po šilumnešio užvirimo.

Kaip matome iš 5.17. paveikslo, šilumnešis greičiausiai užvirs esant maksimaliai pakrautam baseinui (ciklas Nr. 3) su kuro rinklėmis pakrautomis iš aktyviosios zonos (reaktoriaus ir baseino aušinimo sistemos gedimas), kai po aušinimo sistemos gedimo praeis 18 valandų.

Vertinant gautus rezultatus visiškai sugedus baseino aušinimo sistemai be reaktoriaus gedimo, gauname, kad maksimaliai pakrautame baseine (ciklas Nr. 2) šilumnešis užvirs po 36 valandų, o minimaliai pakrautame baseine (ciklas Nr. 2) po 38 valandų. Maksimaliai ir minimaliai (ciklas Nr. 1) užpildyto baseino užvirimo laikas taip pat labai panašus, t.y. maksimaliai užpildytas baseinas užvirs per 42 valandas, o minimaliai per 46 valandas. Analizuodami šiuos rezultatus, galime teigti, kad užvirimo laikai ciklams Nr. 3-4 bus labai panašus, tačiau atsižvelgdami į 5.3. lentelėse pateiktus duomenis ir vertindami liekamosios šilumos mažėjimą didelė tikimybė, kad esant ciklui Nr. 5 šilumnešis neužvirs avarijos atveju. Lygindami maksimaliai ir minimaliai pakrauto baseino (ciklas Nr. 2) užvirimo laikus, galime teigti, kad senas kuras užvirimo laikui daug įtakos neturi, t.y. jo įtaka užvirimo laikui yra ~5,5%. Esant tokiai mažai įtakai, jeigu yra galimybė, seną kurą patartina iškrauti iš baseino dėl nereikalingo svorio, kuris padidina baseino sienų trūkio tikimybę. Taip pat pašalinę seną kurą, padidiname šilumnešio kiekį, todėl užvirimo laikas taptų ilgesnis.

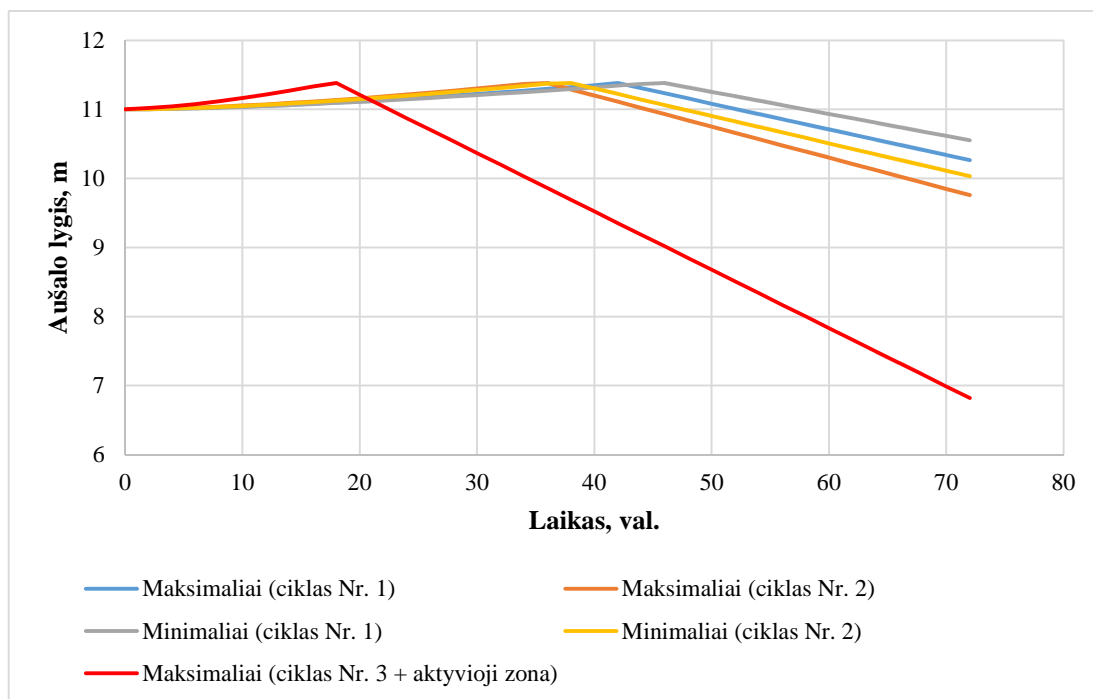


5.17. pav. Šilumnešio užvirimo laikas.

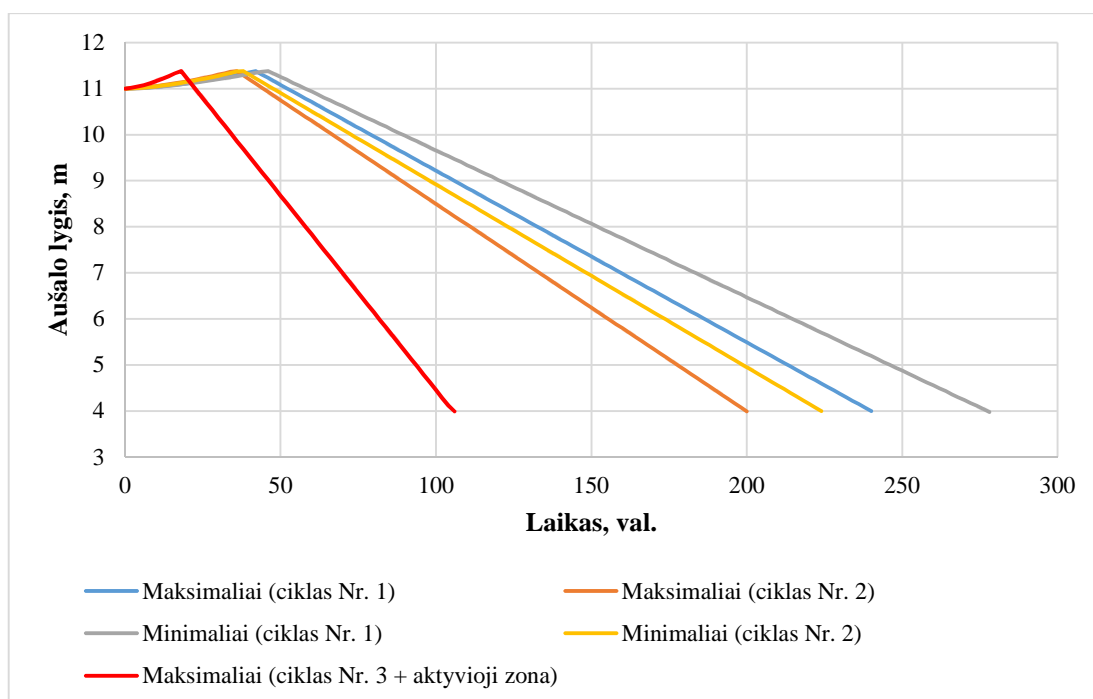
Sugedus aušinimo sistemai, šilumnešio tankis keičiasi, mažiausias tankis fiksuojamas verdant šilumnešiui. Šilumnešio intensyvus garavimas skaičiuojamas, kai jis pradeda virti. Šilumnešio lygio ir garavimo (atsidengimo) priklausomybė nuo laiko pateikta 5.18. ir 5.19. paveiksluose. Aušinimo sistemai dirbant darbinio režimu šilumnešio lygis baseine – 11,0 m, kai aušinimo sistema sugenda, šilumnešio tankis mažėja – šilumnešio lygis baseine didėja. Verdančio šilumnešio tankis mažiausias, todėl jo lygis baseine padidėja iki 11,38 cm (baseino gylis 11,8). Iš grafiko kreivių matome, kad vadovaujantis 72-jų valandų avarijos suvaldymo scenarijumi, kuro rinklės neatsidengs po 72 valandų, didžiausias galimas šilumnešio lygio nukritimas iki 6,82 m.



Todėl pagrindinėje sąlyje būtų galimybė vygdyti avarijos likvidavimo veiksmus. Esant didžiausiam liekamosios šilumos išsiskyrimui (maksimaliai pakrautas baseinas (ciklas Nr. 3) ir kuro rinklės iš aktyviosios zonos reaktoriaus gedimo atveju), kuro rinklės atsidengtų po 106 valandų, po aušinimo sistemos gedimo, t.y. po maždaug 4,4 dienos. Įvykus gamtinei stichijai (pvz. Fukushima Daiichi) ar kitam panašiam incidentui, tai būtų pakankamas laiko tarpas atnaujinti aušinimo sistemos darbą, mobilių siurblių pagalba pasitelkti priešgaisrinių rezervuarų, upės, ežero ar jūros vandenį, ir papildyti baseiną.



5.18. pav. Šilumnešio lygio pokytis baseine per 72 valandas.



5.19. pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių atsidengimas.

## IŠVADOS

Šiame magistriniame darbe panaudojant ANSYS Fluent programinį paketą, trimatėje erdvėje tirti, BWR 4 reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine, vykstantys termohidrauliniai procesai, kai visiškai sugenda šilumos šalinimo sistema. Skaitinių tyrimų metu:

1. Sukurtas detalus branduolinio kuro išlaikymo baseino modelis (1/4 pagal simetrijos plokštumas).
2. Trimačių termohidraulinių procesų modeliavimui parinktas  $k - \epsilon$  tekėjimo modelis, kuris skirtas uždaviniams, turintiems mažus slėgio griadientus. Išlaikymo baseino modelį sudaro hibridinis baigtinių tūrių skaičiavimo tinklelis (trikampių prizmių ir kvadratinės formos baigtinių tūrių elementai).
3. Įvykus šilumos šalinimo sistemos gedimui pastebime, kad:
  - a. veikiant termogravitacinėms jėgoms, baseine įsivysto natūrali cirkuliacija. Didžiausias šilumnešio greitis panaudoto branduolinio kuro rinklėse, kai šilumnešis verda yra  $\sim 0,022$  m/s;
  - b. maksimaliai pakrautame baseine (ciklas Nr. 2) šilumnešis užvirs 36 valandą, o kuro rinklės atsidengs po 200 valandų;
  - c. minimaliai pakrautame baseine (ciklas Nr. 2) šilumnešis užvirs 38 valandą, o kuro rinklės atsidengs po 224 valandų;
  - d. lyginant maksimaliai ir minimaliai pakrautą (ciklas Nr.2) baseiną pastebime, kad užvirimo ir kuro rinklių atsidengimo laikai labai panašūs (šilumos išsiskyrimas minimaliai pakrautame išlaikymo baseine yra  $\sim 5,5\%$  mažesnis negu maksimaliai pakrautame), todėl esant galimybėms, rekomenduotina senas kuro rinkles iškrauti iš baseino, taip sumažinant baseinų sienų trūkio tikimybę dėl svorio.
4. Vertinant pačią blogiausią gedimų seką galime teigti, kad:
  - a. įvykus reaktoriaus gedimui ir iš jo iškrovus visas kuro rinkles į baseiną (ciklas Nr. 3) bei sugedus baseino aušinimo sistemai, šilumnešis užvirs po 18 valandų, o panaudoto branduolinio kuro rinklės atsidengs po 106 valandų.
  - b. net ir pačiu blogiausiu atveju, vykdant 72 valandų avarijos suvaldymo planą, būtų pakankamas laiko tarpas tam, kad išvengti kuro rinklių atsidengimo.
  - c. pastebėtas atbulinis šilumnešio tekėjimas per senas kuro rinkles, t.y. 7 žiedu šilumnešis kyla iš apačios į viršų, o ištekėjęs iš rinklių apsisuka ir per senas

rinkles leidžiasi žemyn. Šis reiškinys nėra užfiksuotas jokioje mokslinėje studijoje.

5. Gauti rezultatai praplečia žinias apie termohidraulinius procesus, vykstančius BWR 4 reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine.

## LITERATŪRA

1. World Nuclear Association. Prieiga per internetą:  
<<http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/World-Energy-Needs-and-Nuclear-Power/>> [žiūrėta 2014-01-12].
2. International atomic energy agency. Prieiga per internetą:  
<<http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>> [žiūrėta 2014-01-14].
3. International atomic energy agency. Prieiga per internetą:  
< [http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1433\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1433_web.pdf)> [žiūrėta 2014-01-17].
4. Predictions of Spent Fuel Heatup After a Complete Loss of Spent Fuel Pool Coolant. Prieiga per internetą:  
<<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003727905.pdf>> [žiūrėta 2014-02-01].
5. United States Nuclear Regulatory Commission. Prieiga per internetą:  
<<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1425/ML14255A365.pdf>> [žiūrėta 2014-02-01].
6. Science Direct. Prieiga per internetą:  
<[http://ac.els-cdn.com/S0306454913001308/1-s2.0-S0306454913001308-main.pdf?\\_tid=f2a46e02-048f-11e5-8740-00000aabb0f27&acdnat=1432745380\\_67a14d777ffe07764a7f6cdb6e1c937c](http://ac.els-cdn.com/S0306454913001308/1-s2.0-S0306454913001308-main.pdf?_tid=f2a46e02-048f-11e5-8740-00000aabb0f27&acdnat=1432745380_67a14d777ffe07764a7f6cdb6e1c937c)> [žiūrėta 2014-02-10].
7. VATESI. Prieiga per internetą:  
<[http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine\\_informacija/projektai/Bendrieji\\_AE\\_saugos\\_uztikrinimo\\_reikalavimai.pdf](http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine_informacija/projektai/Bendrieji_AE_saugos_uztikrinimo_reikalavimai.pdf)> [žiūrėta 2015-01-05].
8. United States Nuclear Regulatory Commission. Prieiga per internetą:  
<<http://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/research/safetycodes.html>> [žiūrėta 2014-04-15].
9. Scientific.net. Prieiga per internetą:  
<<http://www.scientific.net/AMM.145.78>> [žiūrėta 2014-04-21].
10. Science Direct. Prieiga per internetą:  
<[http://ac.els-cdn.com/S0029549310000129/1-s2.0-S0029549310000129-main.pdf?\\_tid=15246aee-0496-11e5-9db7-00000aacb35f&acdnat=1432748015\\_413e22570e14b61015117821da4c44e8](http://ac.els-cdn.com/S0029549310000129/1-s2.0-S0029549310000129-main.pdf?_tid=15246aee-0496-11e5-9db7-00000aacb35f&acdnat=1432748015_413e22570e14b61015117821da4c44e8)> [žiūrėta 2014-03-25].
11. ANSYS. Prieiga per internetą:  
<<http://www.ansys.com/trustedcfd>>. [žiūrėta 2014-09-02].
12. ANSYS. Prieiga per internetą:  
<<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent/>> [žiūrėta 2014-09-02].
13. ANSYS. Prieiga per internetą:  
<<http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Fluent%20Getting%20Started%20Guide.pdf>> [žiūrėta 2014-10-17].
14. ANSYS Customer Portal. Prieiga per internetą:  
<<http://libback.uqu.edu.sa/hipres/indu/indu10725.pdf>> [žiūrėta 2014-11-02].
15. Electronic Power Research Institute. Prieiga per internetą:  
<<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002000498&Mode=download>> [žiūrėta 2014-11-15].
16. Boiling Water Reactor Systems. Prieiga per internetą:  
<<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>> [žiūrėta 2014-12-02].
17. International Atomic Energy Agency. Prieiga per internetą:  
<[http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te\\_1025\\_prn.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1025_prn.pdf)> [žiūrėta 2015-01-23].

18. Containment Structures. Prieiga per internetą:  
<<http://www.atominform.ru/files/fukus/containmentstructures.pdf>> [žiūrėta 2015-01-23].
19. Atomica. Prieiga per internetą:  
<<http://atominform.ru/files/fukus/npp2.pdf>> [žiūrėta 2015-03-09].
20. Spent Fuel Pool Storage. Prieiga per internetą:  
<<https://www.nirs.org/reactorwatch/security/nasrptsfp5.pdf>> [žiūrėta 2015-03-09].
21. Reducing the Hazards from Stored Spent Power – Reactor Fuel in the United States. Prieiga per internetą:  
<[https://www.princeton.edu/sgs/publications/sgs/pdf/11\\_1Alvarez.pdf](https://www.princeton.edu/sgs/publications/sgs/pdf/11_1Alvarez.pdf)> [žiūrėta 2014-06-26].
22. Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. Prieiga per internetą:  
<[http://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/report/report1/LWR-benchmark/Publication/39\\_900-912.pdf](http://rpg.jaea.go.jp/else/rpd/report/report1/LWR-benchmark/Publication/39_900-912.pdf)> [žiūrėta 2014-08-13].
23. General electric Fuel Bundle Designs. Prieiga per internetą:  
<<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003734886.pdf>> [žiūrėta 2014-05-09].
24. **Greiner M., Araya P. E.** Two-dimensional simulations of natural convection/radiation heat transfer for BWR assembly within isothermal enclosure. – Reno, Nevada, USA: W. S. Maney & Son Ltd, 2007.
25. **Tokyo institute of technology, Hitachi Ltd, Kaunas university of technology.** Nuclear engineering intensive course 2013. – Kaunas: 2013.
26. **Strasser A., Rudling P.** Fuel fabrication process handbook. – Sweden, 2005.
27. Decay Heat Concerns in Used Nuclear Fuel. Prieiga per internetą:  
<[http://www.spsu.edu/nuclearstudies/SYE4503\\_CLASS\\_PRESENTATIONS.pdf](http://www.spsu.edu/nuclearstudies/SYE4503_CLASS_PRESENTATIONS.pdf)> [žiūrėta 2015-04-08].
28. U.S. NRC. Spent Fuel Decay Heat Measurements Performed at the Swedish Central Interim Storage Facility. Prieiga per internetą:  
<<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6971/cr6971.pdf>> [žiūrėta 2015-05-01].
29. Porous media. Prieiga per internetą:  
[http://www.arc.vt.edu/ansys\\_help/flu\\_ug/flu\\_ug\\_sec\\_bc\\_porous\\_media.html](http://www.arc.vt.edu/ansys_help/flu_ug/flu_ug_sec_bc_porous_media.html)> [žiūrėta 2015-05-17].
30. International atomic energy agency. Prieiga per internetą:  
<[https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:42044395](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:42044395)> [žiūrėta 2015-03-18].

## **PRIEDAS A. Didelio našumo paskirstytų skaičiavimų klasteris**

Modeliavimo darbams naudojamas didelio našumo paskirstytų skaičiavimų „klasterį“ „SGI Altix ICE4800“.



A.1. pav. Klasteris „SGI Altix ICE4800“.

Pagrindiniai klasterio techniniai parametrai:

1. OS:

*Suse Linux Enterprise Server 11*

2. adminenode:

*CPU Xeon E5620 2.40 GHz x 8 (1 CPU x 4 core x 2 threads)*

*RAM 6 GB*

*HDD 500 GB*

3. r1lead:

*CPU Xeon E5506 2.13 GHz x 4 (1 CPU x 4 core)*

*RAM 6 GB*

*HDD 250 GB*

4. storage node:

*CPU Xeon E5620 2.40 GHz x 16 (2 CPU x 4 core x 2 threads)*

*RAM 24 GB*

*HDD 300 GB*

*IS400 4.4 TB*

5. service0 nodas:

*CPU Xeon X5680 3.33 GHz x 24 (2 CPU x 6 core x 2 threads)*

*RAM 48 GB*

*HDD 200 GB*

6. rli\*n\* nodas (viso – 19 nodų):

*CPU Xeon X5680 3.33 GHz x 24 (2 CPU x 6 core x 2 threads)*

*RAM 48 GB*

**ĮVADAS Į VERDANČIOJO VANDENS REAKTORIAUS PANAUDOTO  
BRANDUOLINIO KURO IŠLAIKYMO BASEINO MODELIAVIMĄ FLUENT  
APLINKOJE**

**Audrius Graževičius**

Lietuvos energetikos institutas, branduolinių įrenginių saugos laboratorija, Breslaujos g. 3, el. paštas: [Audrius.Grazevicius@lei.lt](mailto:Audrius.Grazevicius@lei.lt)

**Raktiniai žodžiai:** verdančiojo vandens reaktorius, rinklė, išlaikymo baseinas, ANSYS FLUENT.

**ĮVADAS**

Įvertinus organinio kuro naudojimo tempus, branduolinis kuras tampa vis didesne alternatyva organiniam kurui, todėl rytų ir vakarų šalyse branduolinė energetika plėtojama, ypač sparčiai. Augant elektros energijos poreikiui, branduoliniai reaktoriai taps vis svarbesniais energijos šaltiniais [1].

Remiantis tarptautinės branduolinės energetikos agentūros „TATENA“ duomenimis, pasaulyje lyderiauja suslėgto vandens reaktoriai, antri pagal populiarumą – verdančiojo vandens reaktoriai [2]. Veikiant šiems reaktoriams, per metus susidaro dideli panaudoto branduolinio kuro kiekiai, kurie po iškrovimo iš reaktoriaus, mažiausiai penkis metus, talpinami išlaikymo baseinuose. Pagrindinė problema – panaudoto branduolinio kuro susidarymo kiekiai, bei jų sandėliavimas, šilumos išsiskyrimas iš panaudoto branduolinio kuro ir avarijos galinčios įvykti aušinant kurą. Taigi darbe sprendžiamas aušinimo poreikis, baseino ir panaudoto branduolinio kuro rinklių modelio formulavimas skaičiavimams, modelio geometrijos detalumas ir tinklelio tankio nustatymas.

**1. APŽVALGINĖ DALIS**

Šiuo metu pasaulyje veikia 435 reaktoriai. Didžiausią veikiančių reaktorių skaičių turi šios valstybės: JAV – 100 reaktorių, Prancūzija – 58 reaktorius, Japonija – 48 reaktorius, Rusija – 33 reaktorius [2].

Verdančiojo tipo reaktoriai dirba vienu kontūru, vanduo tuo pačiu metu yra ir lėtiklis, ir šilumnešis, naudingumo koeficientas siekia  $33 \div 34$  %. Šilumnešio slėgis 6,0 – 7,0 MPa, temperatūra – 285 °C.



Suslėgto ir verdančiojo vandens reaktoriai skiriasi tuo, kad verdančiojo vandens reaktoruje, vanduo užverda ir garas generuojamas tiesiai aktyvioje zonoje. Verdančio vandens kritinės šilumos apkrovos nedidelės, todėl verdančiojo reaktoriaus aktyviojoje zonoje negali išsiskirti daugiau kaip 50 – 60 MW/m<sup>3</sup> energijos. Šio tipo reaktoriuose sudėtinga suvienodinti energijos išsiskyrimą, ne tik pagal aktyviosios zonos aukštį, bet ir pagal spindulį.

Tobulinant reaktorius, buvo sukurti 1356 MW ir didesnės elektrinės galios reaktoriai, kurių beveik visa pirmojo kontūro įranga išsidėsčiusi korpuse.

Verdančiojo vandens reaktoriaus charakteristikų tobulėjimas pateiktas pirmoje lentelėje [3]:

1. lentelė. Pagrindinių verdančiojo vandens reaktoriaus charakteristikų tobulėjimas

Charakteristika	BWR-3	BWR-4	BWR-5	ABWR
Šiluminė galia, MW	1380	2436	3293	3926
Elektrinė galia, MW	460	840	1100	1356
Aktyviosios zonos skersmuo, m	3,44	4,07	4,75	5,16
Aktyviosios zonos aukštis, m	3,66	3,71	3,71	3,71
Valdymo strypų skaičius, vnt.	97	137	185	205
Branduolinio kuro rinklių skaičius, vnt.	400	560	764	872

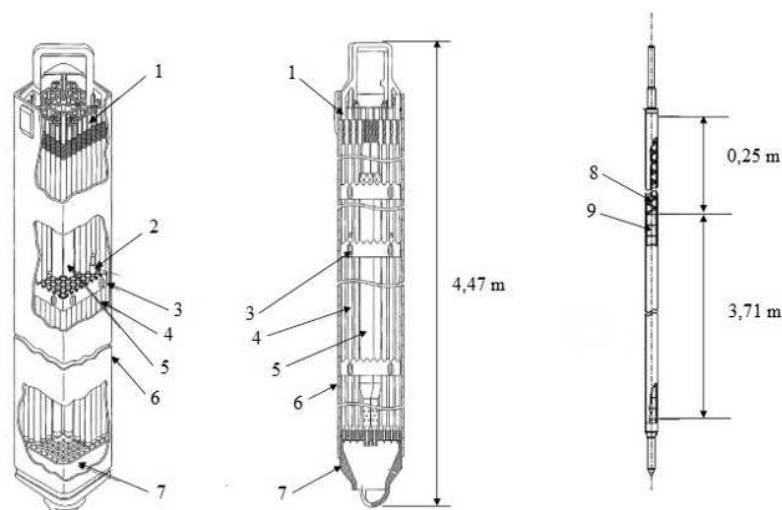
Tobulėjant reaktoriams, tobulėjo ir naudojamo branduolinio kuro rinklių konstrukcija. Pirmųjų verdančiojo vandens reaktorių branduolinio kuro rinklės konstrukcija buvo sudaryta iš 6x6 šiluminių elementų kombinacijos. Šių dienų branduolinio kuro rinklė susidaro iš 11x11 šiluminių elementų kombinacijos.

Projektuojant branduolinio kuro rinkles, būtina atsižvelgti į parametrus, kurie tiesiogiai įtakoja rinklę: kintamas darbo sąlygas, kintamas temperatūras, vibracijas ir radiaciją. Viena iš svarbiausių sąlygų – neviršyti cirkalojaus lydymosi temperatūros – 1572 °C. Verdančiojo vandens reaktoriai dirba tokios kombinacijos branduolinio kuro rinklėmis: 6x6, 7x7, 8x8, 9x9, 10x10 ir 11x11 [4]. Vienos iš dažniausiai naudojamų rinklių – 9x9 pavaizduota pirmame paveiksle [3, 5, 6, 7].

Penktos kartos reaktoriaus aktyviojoje zonoje talpinamos 764 branduolinio kuro rinklės. Vienos „General Electric“ GE13 Step IIIA rinklės svoris apie 230 kg. Rinklė susideda iš 74 šiluminių elementų, kuriuose yra apie 170 kg urano, dviejų vandens strypų ir aštuonių nešančiųjų strypų. Šiluminiai elementai gaminti iš nerūdijančio 316 markės plieno, arba iš cirkalojaus [7-8].

Verdančiojo vandens reaktoriuose naudojamas branduolinis kuras – gamtinis uranas. Gamtinį uraną sudaro du izotopai: U<sup>235</sup> ir U<sup>238</sup>. Urano sodrinimo tikslas yra gauti sodrintąjį uraną, kuriame U<sup>235</sup> dalis būtų didesnė negu gamtiniame urane, o atliekiniame urane jo liktų mažiau negu

gaminiame. Beveik visi pasaulyje eksploatuojami šiluminių neutronų reaktoriai veikia silpnai įsodrintu uranu t.y. iki 5%.



1 pav. Branduolinio kuro rinklės GE13 Step IIIA ir šiluminio elemento schema: 1 – viršutinė tvirtinimo ploštelė; 2 – dalinio ilgio kuro strypas; 3 – tarpinis strypų fiksuojantis; 4 – šiluminis elementas; 5 – vandens strypas; 6 – rinklės gaubtas; 7 – apatinė tvirtinimo ploštelė; 8 – spyruoklė; 9-10 – branduolinio kuro piliulė (suprestuota UO<sub>2</sub> tabletė).

Urano sodrinimo metodai: elektromagnetinis, dujų difuzijos, dujų centrifugavimo ir lazerinis.

Verdančiojo vandens reaktoriuose branduolinio kuro perkrovimas vyksta kartą per 12 arba 18 mėnesių, perkraunant ketvirtadalį ar trečdalį aktyviosios zonos. Aktyvioji zona pilnai perkraunama per 3 – 4,5 metų. Naujuose III ir III+ kartos verdančiojo vandens reaktoriuose pamažu pereinama prie 18 – 24 mėnesių kampanijų su pilnu pilnu kuro išdegimu per 4,5 – 6 metus, taip ženkliai didinant kuro išdegimą. Panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseinai talpina per 20 – 30 metų reaktoriaus eksploatavimo metų susidarančio kuro kiekį, arba apie 10 kartų didesnį, nei reaktoriaus aktyviosios zonos talpa. Todėl verdančiojo vandens reaktoriaus vienam blokui, kurio elektrinė galia 1100 kW, panaudoto branduolinio kuro kiekis ~25,0 t/m. Kuro, sukaupto per 30 metų, likutinis šilumos išsiskyrimas sieks ~1,5 MW [3].

Atlikus mokslinių straipsnių analizę, susijusių su išlaikymo baseinų modeliavimu, galime teigti, jog beveik visi modeliai yra labai supaprastinti.

Straipsnyje „The design and simulation of a new spent fuel pool passive cooling system“ [8], nepateiktas išlaikymo baseino tinkelio tankis, modelis supaprastintas, nepateikti išlaikymo baseino ir rinklių geometrijos brėžiniai, naudojamas tekėjimo režimas „porous medium“, todėl visi šie supaprastinimai leidžia preliminariai pažvelgti į procesus, vykstančius išlaikymo baseine.

Straipsnyje „Predictions of Spent Fuel Heatup After a Complete Loss of Spent Fuel Pool Coolant“ [9], pateiktas išlaikymo baseino ir patalpos virš išlaikymo baseino tinkelio tankis, kuris

siekia 675000 celių. Toks tinklelis globaliam uždaviniui yra per retas. Žvelgiant į išlaikymo baseine esančias panaudoto branduolinio kuro rinkles, matomas geometrinis supaprastinimas.

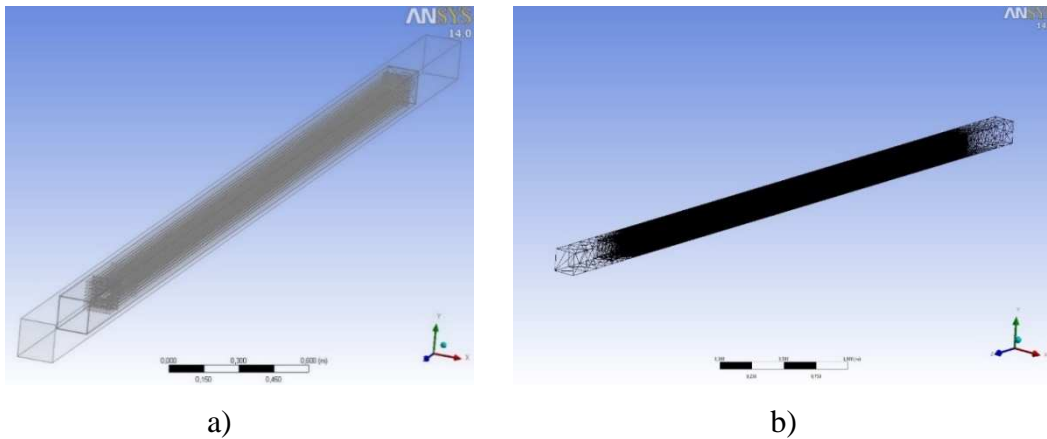
Įvertinus ne tik šiuos, bet ir kitus išlaikymo baseino modelius, galime daryti išvadą, kad sisteminiai programų paketai, naudojančys grubią nodalizaciją, neatskleidžia visų procesų, vykstančių išlaikymo baseine, bei leidžia preliminariai pažvelgti į realius procesus. Norint gauti kuo tikslesnius rezultatus, patartina naudoti ANSYS FLUENT programinį paketą, skirtą modeliuoti pramoniniams reiškiniams, našius skaičiavimo kompiuterius bei kuo mažiau paprastinti kuriamą išlaikymo baseino modelį ir rinklių geometrijas.

## **2. BASEINŲ MODELIAVIMAS FLUENT APLINKOJE**

Dauguma mokslinių tyrimų, susijusių su panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseinų modeliavimu, atlikti naudojantis ANSYS FLUENT programiniu paketu. Šis paketas įgalina ne tik dvimačį, bet ir trimatį modeliavimą, kuris leidžia detaliau ištirti ir suprasti procesus, vykstančius vienfaziuose ir dvifaziuose tekėjimo režimuose, šilumos mainus, turbulenciją bei kitus fizikinius procesus.

Prieš kuriant išlaikymo baseino modelį, būtina įvertinti programinio paketo bei kompiuterio pajėgumus, ir tik tuomet nustatyti panaudoto branduolinio kuro rinklės, ir išlaikymo baseino detalumo lygį. Būtina teisingai pasirinkti tinklelio tankį, iteracijų skaičių ir ribines sąlygas. Kuriant bet kokį modelį, patartina pradėti nuo mažo sudėtingumo modelio. Modelį kurti sudėtingesnį iki tol, kol pasiekama pusiausvyra tarp tinklelio tankio, gaunamų rezultatų ir uždavinio skaičiavimo trukmės. Branduolinio kuro rinklės „GE13 Step IIIA“ geometrija ir tinklelis ANSYS FLUENT aplinkoje pavaizduoti antrame ir trečiame paveiksluose.

Modeliuojant panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseiną, pagrindinės problemos kyla dėl mažų kompiuterio resursų globaliam modeliui. Tuomet panaudoto branduolinio kuro rinklių ir išlaikymo baseino modeliai labai supaprastinami, parenkamas mažas tinklelio tankis, ir naudojami įvairūs tekėjimo kūnu modeliai tokie, kaip „porous medium“. Įvedus daugelį supaprastinimų, sukurtas modelis neatitinka realių procesų, vykstančių išlaikymo baseine. Galima tik preliminariai įvertinti aušinimo vandens tekėjimo kryptis baseine, šilumos nuvedimą nuo panaudoto branduolinio kuro, slėgį ir aušinimo vandens temperatūrą.



2 pav. Branduolinio kuro rinklė: a) geometrija; b) suskaidymas į kontrolinius tūrius.

Norint gauti kuo tikslesnį išlaikymo baseino modelį ir jame vykstančius procesus, pirmas žingsnis link tikslių rezultatų gavimo - naudoti skaičiavimams skirtus našius kompiuterius, specialius programinius paketus, kurie įgalina detalesnį modeliavimą. Tik tuomet uždavinys tampa realistiškesnis, galima tiksliau atkartoti branduolinio kuro rinklių ir išlaikymo baseino geometrijas bei procesus vykstančius išlaikymo baseine.

## IŠVADOS

1. Literatūros analizės pagrindu įvertinta verdančiojo vandens reaktorių panaudoto branduolinio kuro susidarymo, saugojimo bei išlaikymo baseinų modeliavimo metodika.
2. Identifikuoti panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseinų modeliavimo trūkumai.
3. Detaliai analizei parinktas programinis paketas ANSYS FLUENT ir jo aplinkoje sudarytas preliminarus modelis tolimesniam skaitinio tyrimo planui sudaryti.

## LITERATŪRA

1. World Nuclear Association. Prieiga per internetą: <<http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/World-Energy-Needs-and-Nuclear-Power/>> [žiūrėta 2014-03-15].
2. International atomic energy agency. Prieiga per internetą: <<http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>> [žiūrėta 2014-03-15].
3. Atomica. Prieiga per internetą: <<http://atominformo.ru/files/fukus/npp2.pdf>> [žiūrėta 2014-03-16].
4. **Greiner M., Araya P. E.** Two-dimensional simulations of natural convection/radiation heat transfer for BWR assembly within isothermal enclosure. – Reno, Nevada, USA: W. S. Maney & Son Ltd, 2007.
5. **Tokyo institute of technology, Hitachi Ltd, Kaunas university of technology.** Nuclear engineering intensive course 2013. – Kaunas: 2013.
6. **Strasser A., Rudling P.** Fuel fabrication process handbook. – Sweden, 2005.
7. General electric. Prieiga per internetą: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003734886.pdf>> [žiūrėta 2014-03-18].
8. Science direct. Prieiga per internetą: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454913001308>> [žiūrėta 2014-03-28].
9. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Prieiga per internetą: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003727905.pdf>> [žiūrėta 2014-03-29].

**BWR reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseino termohidraulinių procesų studija**

Audrius Graževičius, Arvydas Adomavičius, Linas Paukštaitis

Kauno technologijos universitetas

**ĮVADAS**

Per branduolinės energetikos dešimtmečius pasaulyje susikaupė tūkstančiai tonų panaudoto branduolinio kuro, kurio ženkli dalis pagal priimtas technologijas gan ilgai saugoma panaudoto kuro saugojimo baseinuose. Suprantama, kad dideli kiekiai radioaktyvių medžiagų turi būti saugomi taip, kad užtikrinti tarptautinės bendruomenės keliamus radiacinės saugos reikalavimus. Užtikrinant branduolinės energetikos objektų saugą, analizės ir tyrimai, vykdomi skaitinio modeliavimo pagrindu, užima esminę vietą.

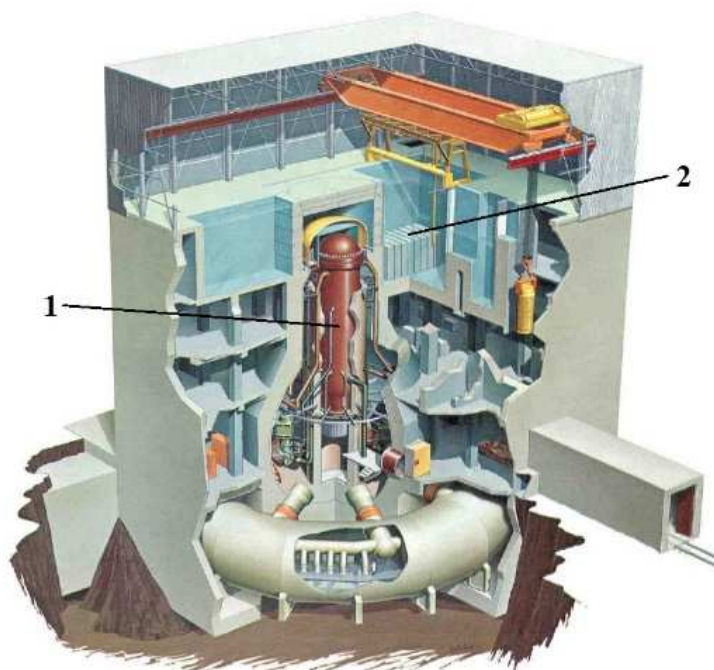
Verdančiojo vandens reaktorius – potencialai galimas Lietuvos pasirinkimas būsimai Visagino AE, todėl BWR 4 (verdančiojo vandens) reaktorius ir jo sistemos – aktualus objektas tyrimams.

Darbe keltas tikslas – išsirinkti programinį paketą tinkamą BWR 4 reaktoriaus baseino ir panaudoto kuro rinklių jame modeliavimui bei termohidraulinių procesų išlaikymo baseinuose tyrimui. Pirmajame tyrimų etape siekta ištirti termohidraulinius procesus panaudoto kuro išlaikymo baseine normalios eksploatacijos stacionaraus režimo sąlygose.

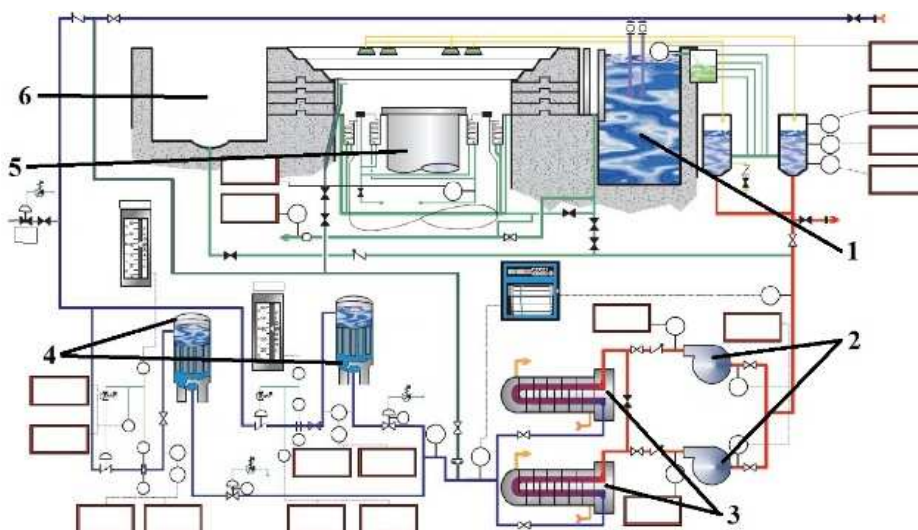
**1. PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO IŠLAIKYMO BASEINO SPECIFIKA**

BWR 4 reaktoriaus išlaikymo baseinas, esantis Mark I gelžbetoniniame korpuse, yra išorinėje korpuso pusėje. Bendra išlaikymo baseino talpa – 3819 vietų rinklėms, iš jų 764 vietos rezervuojamos reaktoriaus aktyviosios zonos visų 764 rinklių avarinio iškrovimo atvejui. Išlaikymo baseinas pavaizduotas 1 paveiksle [1]. Panaudoto kuro rinklės iš reaktoriaus į išlaikymo baseiną perkeliama vandens kanalais tam, kad užtikrinti rinklės aušinimą ir radiacija nepaveiktų aptarnaujančiojo personalo. Aktyviosios zonos centre neutronų koncentracija didžiausia, todėl rinklių išdegimo laipsnis – didesnis negu periferijoje esančių rinklių. Po 12 ÷ 18 mėnesių centrinės aktyviosios zonos dalies branduolinio kuro rinklės (trečdalis aktyviosios zonos, t.y. 254 vnt.), iškraunamos į išlaikymo baseiną [2]. Išlaikymo baseine panaudoto branduolinio kuro rinklės saugomos 5 metus, tačiau dėl įvairių priežasčių (valstybės pasirinktos panaudoto branduolinio kuro saugojimo strategijos, politinių, ekonominių ir kitų aplinkybių) saugojimo laikotarpis gali prailgėti iki 30 metų. Išlaikymo baseine rinklės talpinamos specialiuose konteineriuose, esančiuose ant išlaikymo baseino grindų [3].

Pagrindiniai baseino konstrukciniai parametrai: plotis – 12,2 m, ilgis – 10,8 m, gylis 11,8 m, aušinimo vandens kiekis apie 1,51 mln. litrų, aušinimo vandens lygis – 11,0 m nuo išlaikymo baseino grindų [2]. Sienos pagamintos iš gelžbetonio, kurio storis  $1,2 \div 2,4$  m, plieninių strypų skersmuo  $6 \div 13$  mm [4]. Išlaikymo baseinas – priverstinės cirkuliacijos, tačiau savaiminė cirkuliacija kylanti baseine, dalinai pagerina rinklių aušinimą ir gali kurį laiką užtikrinti saugos funkciją. Aušinimo vandens cirkuliacijos ir jo valymo sistemos schema pateikta 2 paveiksle [5].



1 pav. Pagrindinio pastato pjūvis: 1 – reaktorius, 2 – išlaikymo baseinas.

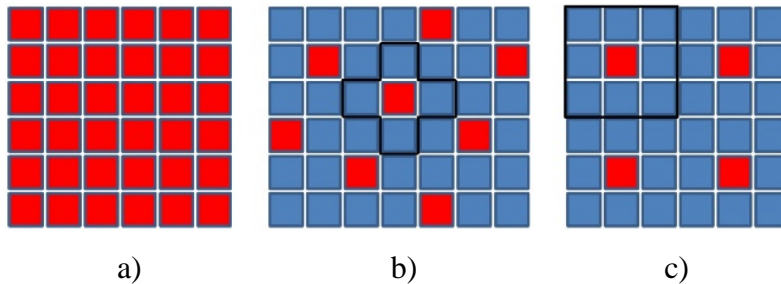


2 pav. Principinė aušinimo vandens cirkuliacijos ir jo valymo sistemos schema: 1 – išlaikymo baseinas, 2 – cirkuliaciniai siurbiai, 3 – šilumokaičiai, 4 – valymo įrenginiai, 5 – reaktorius, 6 – garo separatoriaus ir džiovintuvo baseinas.

## 2. PAGRINDINĖS SAUGOS FUNKCIJOS IŠLAIKYMO BASEINUI

Pagrindinės panaudoto kuro išlaikymo baseino saugos funkcijos – užtikrinti žemą kritiškumo koeficiento reikšmę, stabilų aušinimo vandens lygį ir temperatūrą, nepertraukiamai šalinant išsiskiriančią liekamąją šilumą.

Kritiškumo koeficiento reikšmė neturi siekti 1, todėl panaudoto branduolinio kuro rinklės išdėstomos 1x1, 1x4 arba 1x8 principu. Išdėstymo principų skirtumai pavaizduoti 3 paveiksle (dažniausiai naudojamas 1x4 principas). Kitas faktorius, ribojantis kritiškumo koeficientą – didelės galios neutronų absorberis „Boraflex“, esantis konteinerių sienelėse [2].



3 pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių išdėstymo principai: a) 1x1; b) 1x4; c) 1x8. Perkrovimo metu į baseiną patalpintos kuro rinklės pažymėtos raudonai, „senos“ – mėlynai.

Nepertraukiamą šilumos šalinimą užtikrina du cirkuliaciniai siurbliai ir du šilumokaičiai. Cirkuliaciniai siurbliai ir šilumokaičiai dirba naudodami tik pusę savo pajėgumo tam, kad įvykus šilumokaičio arba/ir cirkuliacinio siurblio avarijai, būtų užtikrintas tinkamas aušinimo vandens srautas ir liekamosios šilumos šalinimas.

Kitas veiksnys galintis sutrikdyti išlaikymo baseino darbą – svoris. Gelžbetoninėms sienoms senėjant ir pilnai pakrovus išlaikymo baseiną, didžiausia tikimybė, kad grindys praras vientisumą. Grindyse atsiradus 4,4 cm skersmens skylėi, per ją ištekėtų 16 kg/s aušinimo vandens ir vandens lygis nuo 11,0 m iki 10,0 m nukristų per 7 valandas. Tačiau įsijungus aušinimo vandens papildymo sistemai, kurios našumas apie 32 kg/s, aušinimo vandens lygis būtų greitai atstatytas [2]. Išlaikymo baseinams nustatyti priimtinumų kriterijai, kurie pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Priimtinumų kriterijai.

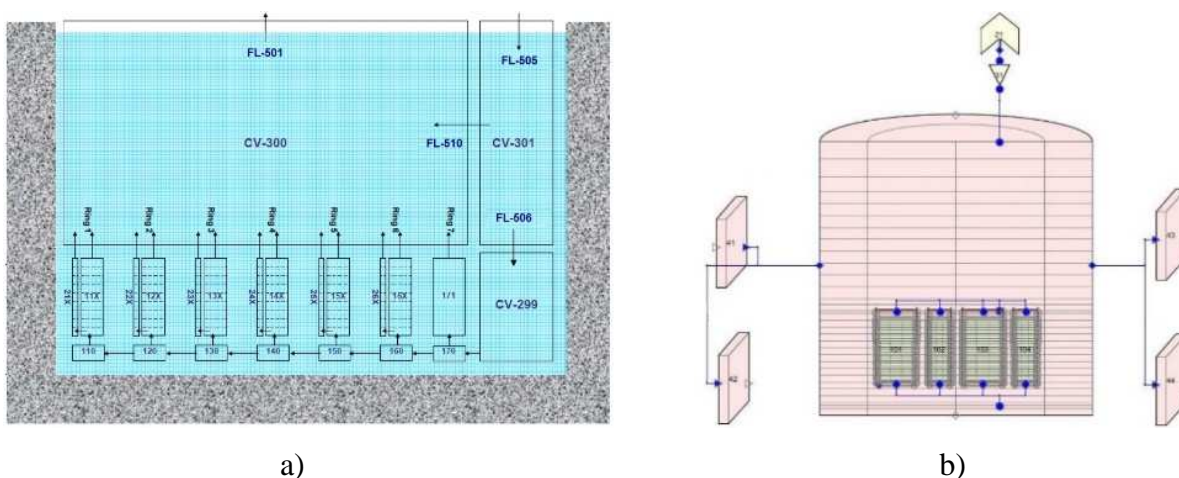
Reaktyvumo koeficientas	Ne didesnis, kaip 95%
Aušinimo vandens temperatūra	Ne didesnė, kaip 50 °C
Aušinimo vandens lygis virš rinklių	Ne mažiau, kaip 3 m
Šiluminio apvalkalo temperatūra	Ne didesnė, kaip 700 °C
Vandenilio koncentracija	Ne didesnė, kaip 4 % patalpos tūrio
Radiacijos poveikis projektinių avarijų metu	Ne didesnis, kaip 10 mSv

Avarijos skirstomos į projektines ir neprojektines. Projektinė avarija – avarija, kurios eiga ir pasekmės yra numatytos projektuojant branduolinę elektrinę. Tokioms avarijoms parengti

veiklos planai, kuriais vadovaujantis, branduolinės elektrinės aptarnaujantysis personalas turi visiškai sustabdyti avariją arba sumažinti jos sukeltas pasekmes. Neprojektinė avarija – tai avarija, įvykusi dėl nenumatytų projektinės avarijos pradinių įvykių arba lydima dar kitų, nenumatytų projektinėse avarijose saugos sistemų gedimų, esant ne tik vienetiniam gedimui ar klaidingiems personalo veiksams [6]. Projektinės avarijos gali būti: cirkuliacinių siurblių ir/arba šilumokaičių gedimas, aušinimo vandens užvirimas, gaisras, aušinimo vandens nuotėkis, mechaninis šiluminio apvalkalo pažeidimas, šiluminio apvalkalo suirimas dėl aukštos temperatūros, elektros energijos praradimas ir kt.

### 3. PROGRAMINIŲ PAKETŲ APŽVALGA

Termohidrauliniai procesai, vykstantys branduoliniuose įrenginiuose, dažniausiai modeliuojami vienmačiais arba dvimačiais programiniais paketais tokiais, kaip MELCOR, MAAP5, TRACE, RELAP, COBRA ir kt. Vienmačių programinių paketų MELCOR ir TRACE išlaikymo baseinų modeliai pateikti 3 – 4 paveiksluose. Vienmačių programinių paketų aplinkoje įrenginiai atvaizduojami kaip eilė kontrolinių tūrių, kuriuose nustatomos apibendrintos (integralios) charakteristikos. Dvimačiai programiniai paketai leidžia nustatyti charakteristikų pasiskirstymą įrenginio ar jo elemento pjūvyje. Trimačiuose programiniuose paketuose gaunamas pilnas parametrų pasiskirstymo visame modelio tūryje vaizdas.



3 pav. Baseino modelis programiniuose paketuose: a) MELCOR [2]; b) TRACE [7].

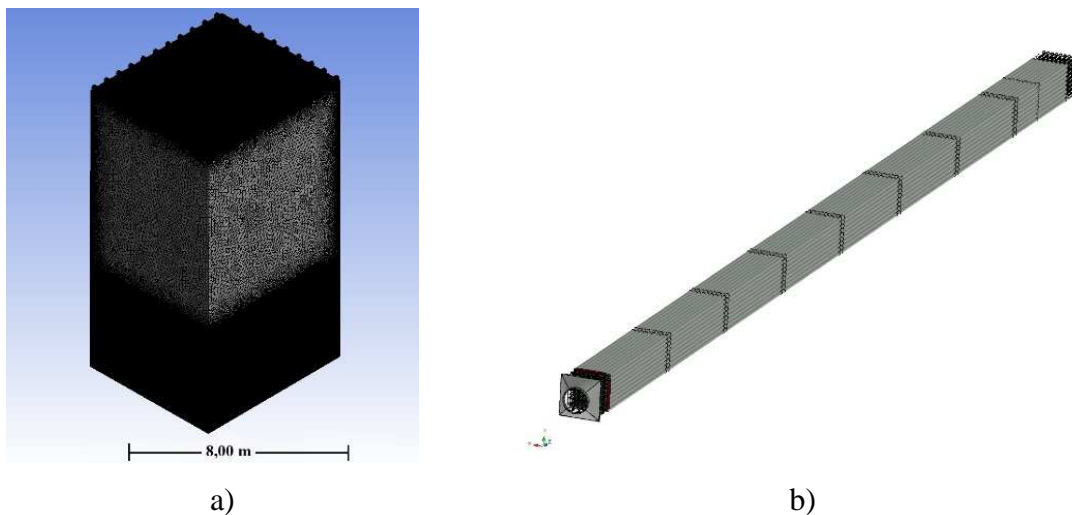
Labiausiai paplitę trimačiai termohidraulinių procesų modeliavimo paketai – Ansys Fluent ir Neptune CFD. Neptune CFD naudojamas branduoliniuose reaktoriuose ir kituose įrenginiuose vykstančių termohidraulinių procesų analizei, tačiau šis programinis paketas naudojamas rečiau negu Ansys Fluent programinis paketas. Ansys Fluent skirtas analizuoti ne tik branduolinius, bet ir kitus pramonės, aviacijos ir kitų sričių įrenginius [8]. Šis programinis paketas pripažintas tarptautinių mokslo ir pramonės įstaigų. Per ilgą programinės įrangos tobulinimo laikotarpį išvystyta termohidraulinių procesų metodologija, gauti rezultatai pasižymi dideliu tikslumu. Dėl



šios prielaidos jis naudojamas dažniausiai. Šiame darbe termohidraulinių procesų, vykstančių išlaikymo baseine, modeliavimui pasirinktas Ansys Fluent 14.0v programinis paketas.

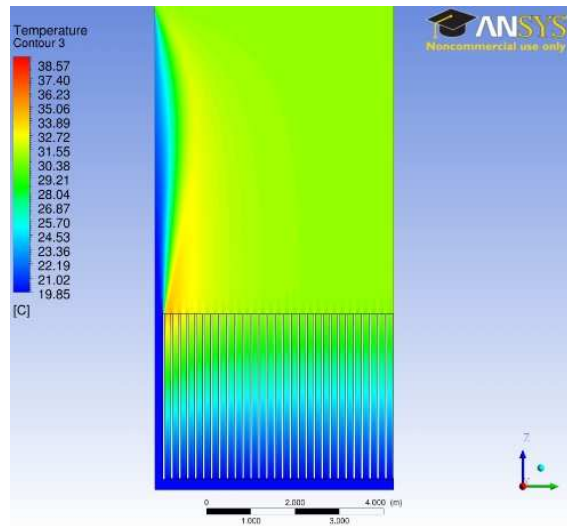
#### 4. PRADINIAI REZULTATAI

Ansys Fluent aplinkoje sukurti išlaikymo baseino ir branduolinio kuro rinklės GE13 modeliai pavaizduoti 5 paveiksle. Išlaikymo baseine esančias panaudoto branduolinio kuro rinklės imituoja stačiakampiai gretasieniai, kuriems pritaikyta „Porous media“ funkcija [3, 9]. Ši funkcija naudojama tada, kai geometrinėje figūroje yra daug, žymiai sudėtingesnių geometrinių figūrų, dėl kurių neįmanoma viso modelio suskaidyti į kontrolinius tūrius ir atlikti termohidraulinę analizę. Funkcija „Porous media“ leidžia sudėtingos geometrinės formos figūroms priskirti apibendrintas hidraulinių nuostolių susidarymo charakteristikas. Išlaikymo baseino ir rinklės modeliai suskaidyti į 16 mln., ir 12 mln. kontrolinių tūrių atitinkamai. Vystomas kuro rinklės modelis perspektyvoje bus panaudotas apibendrintų „Porous media“ hidraulinių charakteristikų analizei. Kraštinės sąlygos baseinui: įtekančio aušinimo vandens temperatūra ~ 20°C, ištekančio aušinimo vandens temperatūra ~ 30°C, tūrinis šilumos išsiskyrimas – 10754,59 W/m<sup>3</sup>, įtekančio aušinimo vandens kiekis – 70,43 kg/s, modeliuojamas stacionarus tekėjimas (darbinis režimas), priimtas supaprastinimas – aušinimo vanduo įteka per baseino grindis, ištekėjimo vamzdžių skaičius (baseino viršuje) – 20 vnt., taikomas  $k - \epsilon$  tekėjimo modelis, kuris skirtas uždaviniams, turintiems mažus slėgio gradientus. Skaičiavimams atlikti naudojamas didelio našumo paskirstytų skaičiavimų kompiuteris „SGI Altix ICE4800“.



5 pav. Modeliai: a) išlaikymo baseino modelis (1/4 pagal simetrijos ašis); b) detalus rinklės modelis.

Skaitiniu eksperimentu nustatyti aušinimo vandens temperatūros ir greičio profiliai išlaikymo baseine pateikti 7 paveiksle. Gauta, kad aušinimo vandens temperatūra ištekėjimo vamzdžiuose yra 31°C, žemiausia aušinimo vandens temperatūra stebima baseino kraštuose, o aukščiausia – centre.



7 pav. Aušinimo vandens temperatūros pasiskirstymas baseine.

## IŠVADOS

1. Išlaikymo baseino termohidraulinių parametų studijai pasirinktas trimačio modeliavimo programinis paketas Ansys Fluent, kuris suteikia galimybę gauti pilną parametų pasiskirstymą visame modelio tūryje vaizdą.
2. Sukurtame modelyje pasirinktas kuro rinklių atvaizdavimo detalumo laipsnis leidžia atvaizduoti realistinį naujai iškrautų ir kurį laiką išbuvusių baseine kuro rinklių išdėstymą (tirta 1x4 schema).
3. Ansys Fluent aplinkoje sukurtas išlaikymo baseino modelis panaudojant „Porous media“ priartėjimą stacionaraus darbo sąlygose davė rezultatus, artimus kitų autorių darbams.
4. Tolimesni tyrimai bus nukreipti į detalaus kuro rinklės modelio bei jo pagalba gautų duomenų pritaikymą termohidraulinių procesų eigos vertinimui panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine tiek stacionariose tiek ir avarinėse būklėse.

## LITERATŪRA

1. Boiling Water Reactor Systems. Prieiga per internetą: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>>.
2. US Nuclear Regulatory Commission. Prieiga per internetą: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1425/ML14255A365.pdf>>.
3. Predictions of Spent Fuel Heatup After a Complete Loss of Spent Fuel Pool Coolant. Prieiga per internetą: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003727905.pdf>>.
4. Spent Fuel Pool Storage. Prieiga per internetą: <<https://www.nirs.org/reactorwatch/security/nasrptsfp5.pdf>>.
5. Spent Fuel Pool Risk Assessment Integration Framework (Mark I and II BWRs) and Pilot Plant Application. Prieiga per internetą: <<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000003002000498&Mode=download>>.
6. VATESI. Prieiga per internetą: <[http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine\\_informacija/projektai/Bendrieji\\_AE\\_sau\\_gos\\_uztikrinimo\\_reikalavimai.pdf](http://www.vatesi.lt/fileadmin/documents/Teisine_informacija/projektai/Bendrieji_AE_sau_gos_uztikrinimo_reikalavimai.pdf)>.
7. Scientific.net. Prieiga per internetą: <<http://www.scientific.net/AMM.145.78>>
8. ANSYS. Prieiga per internetą: <<http://www.ansys.com/trustedcfd>>.
9. The design and simulation of a new spent fuel pool passive cooling system. Prieiga per internetą:

10. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454913001308>>.

## **The Thermal Hydraulic Processes Study of BWR Spent Fuel Pool**

### **Summary**

Due to the safety issues arising from the Fukushima accident, it is necessary to investigate the BWR 4 spent fuel pool in the Mark I type containment. Water circulation and spent fuel cooling phenomena are predicted using computational fluid dynamics (CFD). This study has reviewed the specifics of spent fuel pool, software packages for the modelling of thermal hydraulic processes in the spent fuel pool. Moreover, a typical BWR 4 spent fuel pool and GE13 bundle models were created in Ansys Fluent software. Those models are more accurate than the models in the others studies of spent fuel pool. The pool is filled 3819 bundles of various ages in high – density racking. Thermal power of spent fuel pool is 2,951 MW. The study showed that cooling water at stationary mode in the spent fuel pool is 31°C. These results correlate with other thermal hydraulic processes studies of the spent fuel pools.

## **NATŪRALIOS KONVEKCIJOS PANAUDOTO BRANDUOLINIO KURO IŠLAIKYMO BASEINE TYRIMAS**

**Audrius Graževičius, Linas Paukštaitis**

*Kauno technologijos universitetas, Šilumos ir atomo energetikos katedra, Studentų g. 56-438, Kaunas, el. paštas: [Audrius.Grazevicius@lei.lt](mailto:Audrius.Grazevicius@lei.lt); [linas.paukstaitis@ktu.lt](mailto:linas.paukstaitis@ktu.lt)*

**Raktiniai žodžiai:** natūrali konvekcija, išlaikymo baseinas, panaudotas branduolinis kuras.

### **ĮVADAS**

Fluidų srautai veikiami termogravitacinių jėgų yra svarbūs daugelyje technologinių sistemų: branduolinių įrenginių, elektroninių sistemų aušinimui, šilumokaičiuose ir kt. Kitaip tariant, svorio jėgos laukas įvairiose sistemose yra pagrindinis veiksnys, sąlygojantis fluido judėjimą (natūralią konvekciją). Termogravitacinių jėgų sukeliamas poveikis šilumos mainams, dažnai tapdavo avarijų priežastimi [1].

Šiame darbe pateikti BWR 4 (verdančiojo vandens) reaktoriaus panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseine esančio panaudoto kuro aušinimo, vykstant natūraliai konvekcijai (sugedus aušinimo sistemai), rezultatai. Šis skaitinis, natūralios konvekcijos tyrimas yra tęstinis tyrimas.

### **1. TYRIMŲ METODIKA**

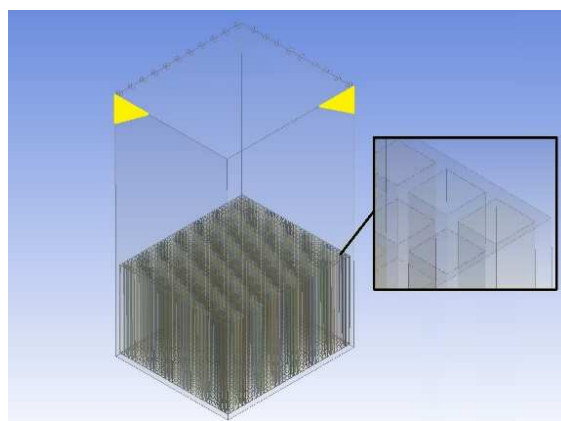
Natūrali konvekcija tiriama išlaikymo baseine (1/4 pagal simetrijos ašis), kuris yra „Mark I“ gelžbetoniniame korpuse [2]. Pagrindinė išlaikymo baseino paskirtis – panaudoto branduolinio kuro aušinimas (liekamosios šilumos šalinimas). Bendra išlaikymo baseino talpa – 3828 panaudoto branduolinio kuro rinklių vietos, iš kurių ne mažiau kaip 764 vietos rezervuojamos avarinio iškrovimo iš reaktoriaus atvejui. Panaudoto branduolinio kuro rinklės išlaikymo baseine išdėstomos žiedine tvarka ir 1x4 principu, kurie pateikti 1 ir 2 paveiksluose, o panaudoto branduolinio kuro rinklių šiluminė galia pateikta 1 lentelėje [3]. Išlaikymo baseinui dirbant darbinio režimu (vyrauja mišri konvekcija) aušinimo vandens temperatūra ~ 28°C. Liekamoji šiluma šalinama aušinimo sistemos pagalba. Sugedus šiai sistemai, išlaikymo baseine vyrauja tik natūrali konvekcija, kurią sukuria liekamoji šiluma, išsiskirianti iš panaudoto branduolinio kuro.

Išlaikymo baseino skaitiniui modeliui sukurti ir natūraliai konvekcijai tirti, kai įvyksta aušinimo sistemos gedimas, pasitelktas ANSYS Fluent programinis paketas. Parenkamas k-e (turbulentinis tekėjimas aušinimo vandens zonai virš rinklių ir po jomis, o rinklėse vyrauja laminarinis tekėjimas). Dėl sudėtingos rinklių geometrijos, joms pritaikoma „Porous media“

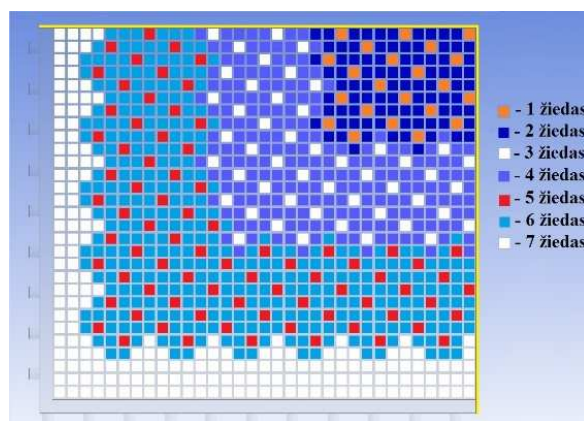
funkcija, kuri leidžia sudėtingos geometrijos kūnams pritaikyti apibendrintas hidraulinių nuostolių susidarymo charakteristikas. Baseino sienos – armuotas betonas (sienos menamos), kurio šilumos laidumo koef.  $\lambda = 2,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [4], sienos storis 2,0 m. Natūralios konvekcijos modelis – Boussinesq, t.y modelis, skirtas modeliuoti skysčio tekėjimą, kurio tankio pokyčiai yra nedideli. Aušinimo vandens kiekis išlaikymo baseine  $\sim 1265,64 \text{ m}^3$ .

1 lentelė. Liekamosios šilumos išsiskyrimas išlaikymo baseine.

Žiedo Nr.	Rinklių skaičius, vnt.	Žiedo šiluminė galia, kW
1	88	1927
2	352	80
3	-	-
4	784	179
5	316	465
6	1320	301
7	-	-
<b>Iš viso</b>	<b>2860</b>	<b>2952</b>



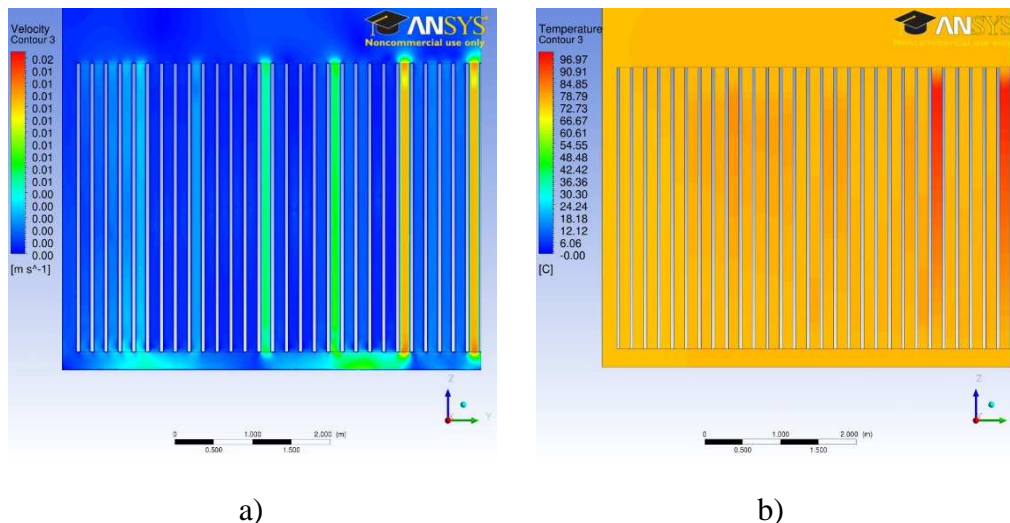
1 pav. Išlaikymo baseino modelis (1/4 pagal simetrijos ašis – simetrijos plokštumos pažymėtos geltonai).



2 pav. Panaudoto branduolinio kuro rinklių išdėstymas baseine žiedine tvarka ir 1x4 principu.

## 2. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Aušinimo vandens tekėjo greitis ir temperatūra, po 50 valandų, kai sugedo aušinimo sistema, pavaizduotas 3 ir 4 paveiksluose. Gautuose rezultatuose matome, kad aušinimo vandens greitis, esant natūraliai konvekcijai, 1 žiede (karščiausiose rinklėse) – 0,012 m/s. Visuose kituose žieduose tekėjimo greitis svyruoja nuo 0,005 iki 0,03 m/s, išskyrus 3 ir 7 žiedus. Šiuose žieduose, kuriuose rinklių nėra (nėra hidraulinių pasipriešinimų), tekėjimo greitis svyruoja nuo 0,0015 iki 0,007 m/s.



3 pav. Rinklių zona: a) šilumnešio greitis; b) šilumnešio temperatūra.

## IŠVADOS

Programiniu paketu ANSYS Fluent atlikus skaitinį išlaikymo baseino tyrimą, galime daryti šias išvadas:

1. Termogravitacinės jėgos 1 ir 5 žieduose – didžiausios, todėl aušinimo vandens greitis šiuose žieduose – 0,01 m/s.
2. Dėl termogravitacinių jėgų susidaręs aušinimo vandens greitis – pakankamai geras, kad tinkamai ataušintų panaudotą branduolinį kurą.
3. Išlaikymo baseine vykstant natūraliai konvekcijai, užtikrinamas pakankamas laiko tarpas, per kurį galima suremontuoti aušinimo sistemą arba vandens siurblių pagalba, padidinti vandens kiekį baseine ir taip išvengti vandens užvirimo.

## LITERATŪRA

1. Energetika. Prieiga per internetą:  
<<http://www.lmaleidykla.lt/publ/0235-7208/2010/2/119-125.pdf>>.
2. Boiling Water Reactor Systems. Prieiga per internetą:  
<<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>>.
3. US Nuclear Regulatory Commission. Prieiga per internetą:  
<<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1425/ML14255A365.pdf>>.
4. Vandens savybės. Prieiga per internetą:  
<<http://de2.lt/naudinga-informacija/lentel%C4%97s/1499-vandens-savyb%C4%97s,-tankis,-talpa,-entropija,-klampumas,-entalpija>>.