

# Az ALLEGRO kerámia kazetta hőmérséklet-eloszlásának egyenletesebbé tétele

Orosz Gergely Imre, Tóth Sándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9. tel.: +36 1 463 2523

A gázhűtésű gyorsreaktor (Gas-cooled Fast Reactor, GFR) egyike a IV. generációs atomreaktor típusoknak. A 75 MW<sub>th</sub> teljesítményű demonstrációs GFR reaktor (ALLEGRO) fejlesztése jelenleg is folyik hazai és nemzetközi projektek keretein belül. A szükséges technológia kifejlesztésére és a koncepció működőképességének bemutatására szolgál az ALLEGRO reaktor.

A cikk célja bemutatni, hogy az ALLEGRO kerámia fűtőelem-kazetta sarokpálcáinak hőmérséklete hogyan csökkenthető. A probléma vizsgálatához az ANSYS CFX programot használtuk. A sarok régió leírására korábbi tanulmányainkban kidolgozott modellek álltak rendelkezésünkre. A modellek megmutatták, hogy a sarok csatornában a burkolat hőmérséklete lényegesen magasabb, mint a kazetta többi részében. A sarok részben kialakuló hőmérséklet maximum csökkentésére egyik megoldás a sarokpálca teljesítményének csökkentése, amely a fűtőelemben levő hasadóképes izotópok arányának csökkentésével valósítható meg. Jelen esetben azt vizsgáltuk, hogy mi történik, ha 10, 20 vagy 30 százalékkal csökkentjük a sarokpálcák teljesítményét. A modellek eredményei alapján meghatároztuk azt a sarokpálca teljesítményt, amely esetén a pálcaburkolat hőmérséklete körülbelül megegyezik a belső régióban levő pálcák burkolatának hőmérsékletével.

## Bevezetés

A gyorsreaktorok technológiai fejlettségüket tekintve „egy lépéssel a hagyományos reaktorok mögött járnak”. A negyedik generációs reaktor-koncepciók közül az egyik a gázhűtésű gyorsreaktor (GFR, Gas-cooled Fast Reactor). A típus előnye, hogy gyors neutron spektrummal rendelkezik, amely lehetővé teszi az üzemanyag-tenyésztést és a transzmutációt [1,2,3].

A kemény neutron spektrum és a magas zóna kilépő hűtőközeg hőmérséklet teszi ezt a reaktortípust különösen vonzóvá. Ám ezek a tulajdonságok jelentik a legnagyobb kihívást is, mivel komoly kritériumokat állítanak a reaktort felépítő anyagokkal szemben.

A kemény neutron spektrum teszi alkalmassá a reaktort az üzemanyag-tenyésztésre, így az üzemanyag jobb hatásfokú felhasználására. A gyorsreaktorok a természetes uránkészletek nagyságrendileg jobb kihasználását teszik lehetővé, továbbá képesek a hosszú élettartamú radioaktív hulladékok (transzuránok, másodlagos aktinidák) mennyiségének nagyarányú csökkentésére. A magas kilépő hélium hűtőközeg hőmérséklettel (körülbelül 800 °C) magas erőmű hatásfokot lehet elérni (43-48%), amely felveszi a versenyt a modern szénhidrogén tüzelésű erőművek hatásfokával.

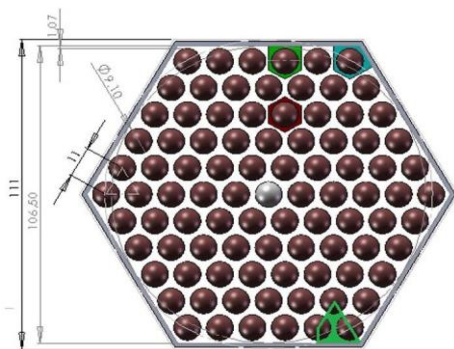
A GFR 75 MW<sub>th</sub> teljesítményű demonstrációs reaktorának (ALLEGRO) fejlesztése jelenleg is folyik hazai és nemzetközi projektek keretein belül. A szükséges technológia kifejlesztésére, és a koncepció működőképességének bemutatására szolgál az ALLEGRO reaktor.

A cikk célja annak vizsgálata, hogy a kerámia fűtőelem-kazetta sarokpálcáinak termikus maximuma hogyan

csökkenthető. A feladat megoldásához az ANSYS CFX program 15. verzióját használtuk. A sarok régió leírására korábbi munkáinkban kidolgozott modellek álltak rendelkezésünkre [4]. A kerámia kazetta sarok részében kialakuló hőmérséklet maximum csökkentésére egyik megoldás a sarokpálcák teljesítményének csökkentése, amely a fűtőelemben levő hasadóképes izotópok arányának csökkentésével valósítható meg. Jelen esetben azt vizsgáltuk, hogy mi történik, ha 10, 20 vagy 30 százalékkal csökken a sarokpálcák teljesítménye.

## Az ALLEGRO kerámia kazetta

Az ALLEGRO reaktor kerámia zónájában 87 üzemanyag-kazetta van [2]. Az üzemanyag (U,Pu)C, melyet SiC kompozit kerámia pálcákba helyeznek. A kazetta pálcakötegében 90 darab, 9,1 mm külső átmérőjű üzemanyag-pálca található (1. ábra). A pálcák háromszög-rácsba vannak rendezve, a rácsosztás 11 mm. A pálcák hossza 1350 mm, amelyből 860 mm az aktív hossz. A jelenlegi tervek szerint a pálcákat az aktív hossz négy darab távtartórács rögzíti, melyek egymástól való távolsága 246 mm. A kazettákat hatszög keresztmetszetű palást határolja. A zónán átáramló hűtőközeg hélium, amelynek tömegárama 36,1 kg/s, nyomása 70 bar, belépő hőmérséklete 400 °C. Jelen munkánkban a pálcaköteg sarok régióját vizsgáltuk (1. ábra, zölddel bekeretezve) 10, 20, illetve 30%-kal csökkentett sarokpálca teljesítmény mellett, hogy a kialakuló termohidraulikai viszonyokról képet kapjunk.



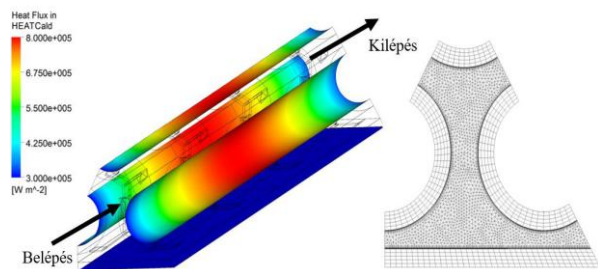
1. ábra: A sarok régió zöld kontúrral jelölve a kazetta ábráján [2]

**A modellek felépítése**

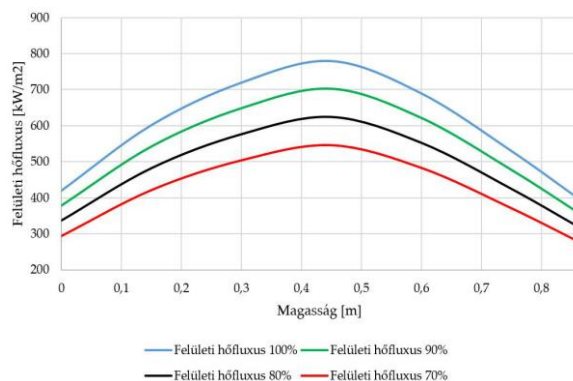
A vizsgálatokhoz az előző munkáinkban létrehozott modelleket alkalmaztuk [4]. A modellek 4 darab távtartórácsot tartalmaznak, melyek közti távolság 246 mm. Az áramlási régió hálófelbontása (2. ábra) a korábbi J2 háló felbontásával egyezik meg, amelyet hálózékenység-vizsgálattal ellenőriztünk [5]. A belépő peremfeltételeket az előző munkáinkban fejlesztett szabad pálcaköteg modell szolgáltatja [4]. A modell tömegáramát a forrókazetta tömegáramából adódónál konzervatív módon körülbelül 6 százalékkal kisebbnek írtuk elő. Az importált eloszlások a közeg sebesség, valamint turbulens kinetikus energia és örvény disszipáció értékeit tartalmazták. A belépésnél a hélium átlagos sebessége 23,6 m/s-nak felel meg. A kilépésnél 0 Pa relatív nyomás lett előírva, a referencia nyomás 70 bar. A pálcák, a távtartórács és a kazetta falára sűrűdéses fal peremfeltételt alkalmaztunk, vagyis közvetlenül a falnál a közeg sebessége zérus. A modell azon felületeire, ahol a valóságban a szomszédos szubcsatornák kapcsolódnak, szimmetria peremfeltételt adtunk meg. Turbulenciamodelleként a BSL Reynolds-feszültség modellt használtuk [7].

Négy különböző modellt hoztunk létre. A modellek a sarokpálca burkolat belső felszínén definiált hőfluxusok nagyságában különböznek. A modell nevek rövidítései a következők: CR-1 (CoRner-100%), CR-09 (CoRner-90%), CR-08 (CoRner-80%) és CR-07 (CoRner-70%).

Míndegyik esetben a pálcaburkolatot és az 1,07 mm vastagságú kazettafalat is modelleztük, melynek anyaga szintén SiC. Megjegyezzük, hogy a burkolat és a kazettafal anyagösszetétele még nem teljesen tisztázott. A pálcák felületi hőfluxusa a magasság függvényében másodfokú polinommal lett megadva (3. ábra). Belépésnél a közeg hőmérséklete 400 °C. A modellben definiálni kellett a hélium és a SiC hőmérsékletfüggő anyagjellemzőit. A jellemzők [8,9] polinomokkal lettek megadva, a korábbiaknak megfelelően.

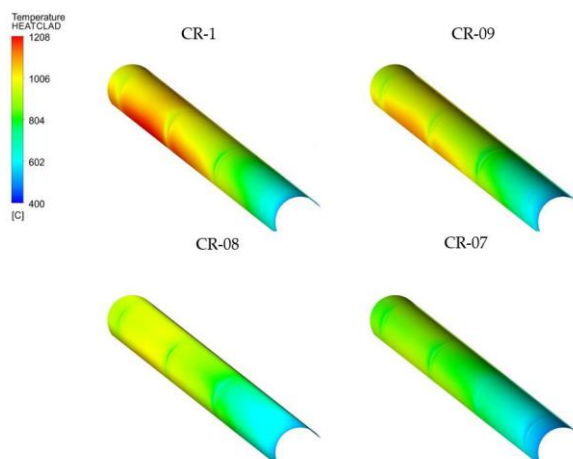


2. ábra: A pálcaburkolatokon elért felületi hőfluxus (nominális teljesítmény) és a modell hálófelbontása



3. ábra: Sarokpálca felületi hőfluxusai

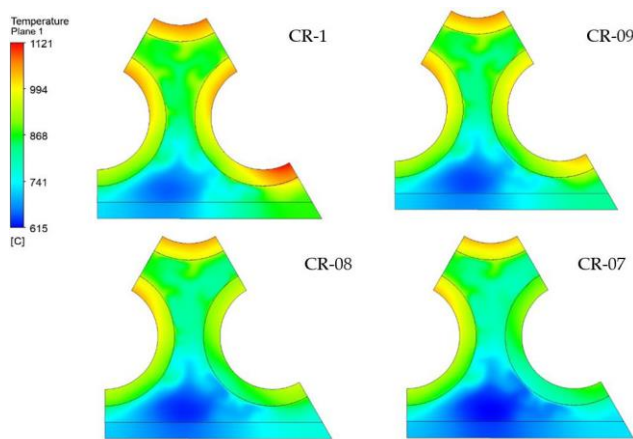
**A modellek által szolgáltatott eredmények**



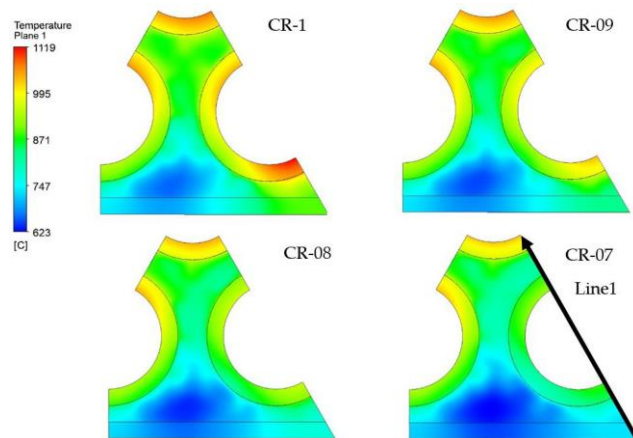
4. ábra: A sarokpálca belső felületének hőmérséklet-eloszlása

A 4. ábrán látható a sarokpálca belső felületén kialakuló hőmérséklet-eloszlás a különböző teljesítményű sarokpálcát tartalmazó modellek esetében. A pálcaburkolatok hőmérséklete a belépésénél 400 °C, majd az aktív szakasz mentén egyre nő a maximális hőmérsékletű helyig. Jól megfigyelhető a távtartórácsok hatása a hőmérséklet-eloszlásokra még a pálcaburkolat belső felületén is. Látható, hogy a CR-1 modellben a pálcaszakasz felső felén nagy felülettartományokban van 1200 °C körül a burkolat hőmérséklete. Ennek oka, hogy a szűk keresztmetszetű sarok szubcsatorna áramlástanai viszonyai előnytelenek. A sarok szubcsatorna kedvezőtlen hűtése miatt az ott áramló hélium erőteljesen felhevül, és ez kihat a pálcaburkolat hőmérsékletére is. A CR-09 modell esetén is láthatók hasonlóan magas értékek, de sokkal kisebb felület-tartományokban. A maximum is kisebbnek adódik ez esetben. A CR-08 és a CR-07 modellekben a pálcaburkolatok hőmérséklet-eloszlásai sokkal egyenletesebbek. A hőmérsékleti maximumok messze elmaradnak a nominális teljesítményű modellétől.

Az 5-6. ábrákon a modellekben kialakuló keresztmetszeti hőmérséklet-eloszlásokat láthatjuk. Már a második távtartórács után megfigyelhető a CR-1 modell esetén a sarokpálca burkolat túlhevülés, amely a negyedik rács mögött még fokozottabb. A CR-09 modellben szemmel láthatóan a sarokpálca és a belső, valamint a fal menti pálcaburkolatának hőmérséklet viszonyai hasonlóak. A CR-08 és CR-07 modellek esetében a sarokpálca burkolatának keresztmetszeti hőmérséklete elmarad a többi pálcaburkolatának hőmérsékletétől.



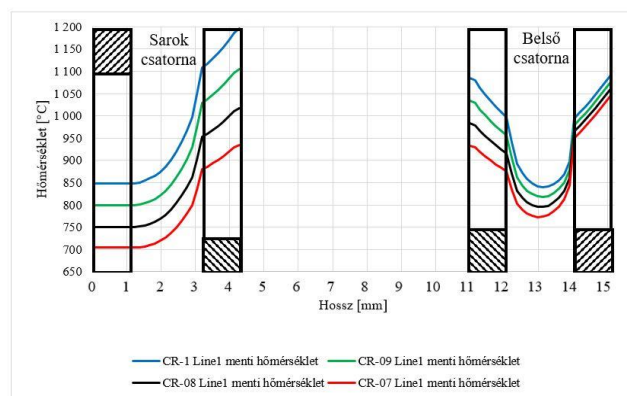
5. ábra: Hőmérséklet-eloszlások a negyedik távtartórács után 1D távolságban



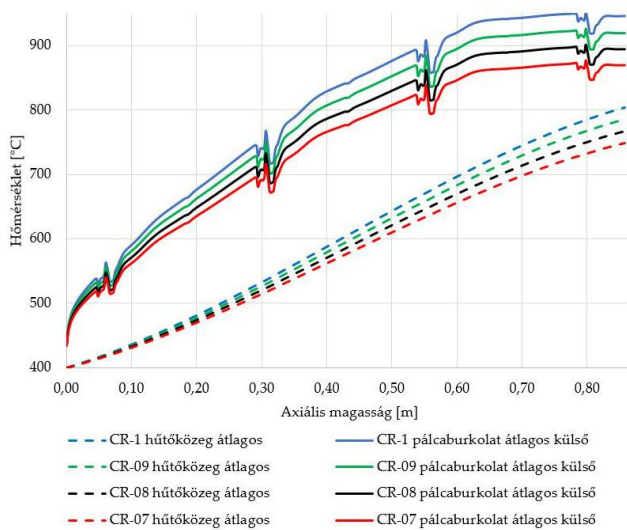
6. ábra: Hőmérséklet-eloszlások a negyedik távtartórács után 5D távolságban

A negyedik távtartórács után a CR-1 modell esetén látható, hogy a sarok csatorna a forrócsatorna (5-6. ábra). A pálcaburkolat maximális hőmérséklete eléri a SiC burkolatra vonatkozó üzemi hőmérsékletkorlátot (1200 °C). A CR-09 modellben a sarokpálca burkolat hőmérséklete alacsonyabb, és annak maximuma közelít a többi pálcához. A CR-08 és CR-07 modellek eredménye azt sugallja, hogy 10%-nál nagyobb sarokpálca teljesítmény csökkentés nem indokolt. Az utóbb említett két modellben a sarokpálca burkolat maximális hőmérséklete lényegesen alacsonyabb, mint a többi pálcáé, tehát indokolatlanul csökkentenénk tovább a pálca teljesítményét.

A 7. ábrán láthatók a Line1 vonal (6. ábra) menti hőmérséklet-eloszlások a maximális hőmérsékletű pont magasságában (784 mm). A CR-1 modell adja a legmagasabb hőmérséklet értékeket. Megfigyelhető, hogy a belső szubcsatornában a különböző modellek által adott hőmérséklet értékek kisebb mértékben különböznek, mint a sarok szubcsatorna esetén. A CR-09 modell esetében a sarokpálca burkolat hőmérséklet-eloszlása közel megegyezik a belső pálca burkolat hőmérséklet-eloszlásával. A kisebb teljesítményű modellek esetében (CR-08, CR-07) a hőmérsékletek már alatta vannak a belső pálca burkolat hőmérséklet értékeinek. Ezen az ábrán is látszik, hogy 10% sarokpálca teljesítmény csökkentés esetén a sarok szubcsatorna és a hozzá tartozó pálca burkolatának hőmérséklete a megfelelő szintre csökkenthető.



7. ábra: Line 1 vonal menti hőmérséklet-eloszlások 784 mm magasságban (a vonal pozíciója a 6. ábrán látható)

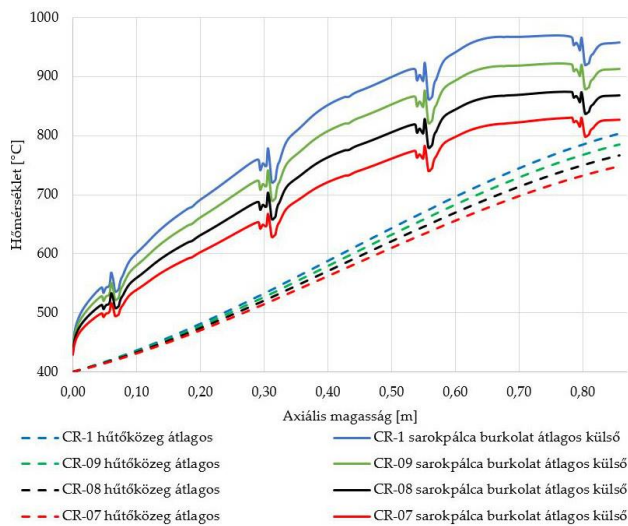


8. ábra: A hélium keresztmetszeti átlaghőmérséklete és a pálcaburkolatok külső felületi átlaghőmérséklete a magasság függvényében

A 8. ábrán láthatjuk a sarok régióban található pálca külső felületi átlagos hőmérsékletének hossz menti változását. Megfigyelhetjük azt is, hogy a sarok régióban a hélium átlaghőmérséklete hogyan emelkedik az aktív szakasz mentén. Jól látható, hogy a teljesítmény csökkentés nem csak a pálcaburkolat hőmérsékletét csökkenti, hanem a sarok régióból kilépő hűtőközeg átlaghőmérsékletét is. Ezen felül megfigyelhető a pálcaburkolat hőmérséklet változásán a távtartórácsok okozta hatás.

A 9. ábrán külön a sarokpálca külső felületi átlaghőmérséklete látható a különböző teljesítményértékek mellett. A különbségek sokkal erőteljesebbek, mivel az adatok nem tartalmazzák a többi pálca hőmérséklet értékeit.

Az 1. táblázatban láthatjuk a különböző sarokpálca teljesítmények esetén a hélium hűtőközeg és a pálcaburkolat hőmérséklet maximumokat. Látható, hogy a sarokpálca burkolat hőmérsékleti maximuma sokkal nagyobb arányban csökken, mint a hélium hőmérsékleti maximuma.



9. ábra: A hélium keresztmetszeti átlaghőmérséklete és a sarokpálca burkolat külső átlaghőmérséklete a magasság függvényében

1. táblázat Hőmérséklet maximumok a hélium hűtőközegben és a SiC pálcaburkolatban

	Maximális hélium hőmérséklet [°C]	Maximális sarokpálca burkolat hőmérséklet [°C]
CR-1	1105,9	1208,5
CR-09	1063,8	1152,8
CR-08	1057,1	1068,5
CR-07	1050,6	1015,3

A CR-09 modell esetén a maximum már alatta van az előírt 1200 °C-os hőmérsékleti határnak. A CR-09 modell esetén a hélium maximális hőmérséklete 42,1 °C-kal alacsonyabb az eredeti sarokpálca teljesítményű modellben kialakuló maximumhoz képest. A többi modell esetén ez a csökkenés a nagyobb teljesítményű esethez képest csak körülbelül 6,5°C. Ez azzal magyarázható, hogy a CR-1 modellben a maximális hőmérséklet érték a sarok szubcsatornában alakul ki, a többi esetben pedig a belsőben, így a sarokpálca teljesítmény csökkentés csak kisebb léptékben csökkenti a maximális hőmérsékletet.

## Összefoglalás

A kutatás célja annak vizsgálata volt, hogy a sarokpálcák teljesítményének milyen mértékű csökkentésével tehető közel egyenletessé a sarok régió hőmérséklet-eloszlása. A CFD modellekben 10%-os lépcsőkben csökkentettük a sarokpálca teljesítményét a névleges érték 70%-ig. Az eredmények alapján meghatároztuk azt a pálca teljesítményt, amely esetén a sarokpálca burkolat hőmérséklet-eloszlása körülbelül megegyezik a belső régióban levő pálcák burkolatának hőmérséklet-eloszlásával. A szimulációk eredményei megmutatták, hogy már 90%-os teljesítmény szint, azaz 10%-os csökkentés mellett közel azonos a burkolatok hőmérséklet-eloszlása, és teljesül a vonatkozó hőmérsékleti kritérium. További sarokpálca teljesítmény csökkentés csak a kazetta hasznos teljesítményének csökkenését eredményezi.

Mivel ilyen kismértékű teljesítmény csökkentés is képes megoldani a sarokpálcák hűtöttségi problémáját, érdemes változtatlan pálcatelesítmény mellett egyéb megoldási módszereket is elemezni. A következőkben azt vizsgáljuk, hogy különböző keverőfűleknek milyen hatása van a régió hőmérséklet-eloszlására, és képesek-e javítani a sarok szubcsatornák hőmérsékleti viszonyait.

## Köszönetnyilvánítás

A munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap által támogatott VKSZ\_14-1-2015-0021 azonosító számú projekt keretében zajlott.

## Irodalomjegyzék

- [1] L. Bělovský, Project ALLEGRO, He-Cooled Fast Reactor Demonstrator, Nordic-Gen4 Seminar, Lappeenranta, Finland, September 4-5, 2014
- [2] C. Poette, F. Morin, V. Brun-Magaud and JF. Pignatel, ALLEGRO 75 MW Cores Definition at Start of GOFATR, CEA, France, August 26, 2010
- [3] P. Líška, G. Cognet, The ALLEGRO Project – European Project of Fast Breeder Reactor, 1st International Nuclear Energy Congress, Warsaw, Poland, May 23-24, 2011
- [4] G. I. Orosz, S. Tóth, Investigation of Corner Subchannel of Ceramic Assembly of ALLEGRO Reactor, 6th International Youth Conference on Energy, Budapest, Hungary, June 21-24, 2017
- [5] G. I. Orosz, S. Tóth, CFD vizsgálatok az ALLEGRO kerámia kazetta belső szubcsatornájára, Nukleon, 2016. május
- [6] S. Tóth, B. Kiss, E. Gyuricza and A. Aszódi, CFD Investigation of ALLEGRO Fuel Assemblies, The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal - Hydraulics, NURETH-15, Pisa, Italy, May 12-17, 2013
- [7] ANSYS Inc, ANSYS CFX Solver Theory Guide, 2010
- [8] H. Petersen, The Properties of Helium: Density, Specific Heats, Viscosity, and Thermal Conductivity at Pressures from 1 to 100 bar and from Room Temperature to about 1800 K, September, 1970
- [9] M. Zabiego, V. Brun-Magaud, E. Castelier and M.L. Flem, A Set of Data Considered for the GFR Pin Design Provided by CEA as an Input to JRC-ITU's Computations within the Frame of the GoFastR Project, CEA, Cadarache, France, 2011