



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)
Természettudományi Kar (TTK)
Nukleáris Technikai Intézet (NTI)



A hűtőközeg áramlásának termohidraulikai vizsgálata Szuperkritikus
Vízű Reaktor releváns geometriákban

– PhD Tézisfüzet –

Szerző: Kiss Attila

Budapest
2018.

Előzmények és háttér

Doktori kutatásomban vizsgálatokat végeztem a Szuperkritikus Vízhűtésű Reaktor¹ (Supercritical Water-cooled Reactor, röviden SCWR) releváns geometriákban a hűtőközeg (szuperkritikus (nyomású) víz, angol rövidítéssel SCW) termohidraulikájára. Az egyetemi kiegészítő képzésem utolsó félévében (2006. február és június között), a diplomatervezés keretében kezdtem el ezt a munkát, és 2018 januárjában fejeztem be. Kezdetben a volt Témavezetőm, Professzor Dr. Aszódi Attila és én azt terveztük, hogy a széles körben használt, alaposan validált, kereskedelmi numerikus áramlástani (Computational Fluid Dynamics, CFD) kódot, az ANSYS CFX-et² fogjuk csak használni, de időközben egy jó együttműködés alakult ki közöttünk és az MTA EK neutron radiográfiai kutatócsoportja között. Ez utóbbi volt az oka, hogy lehetőségem adódott a doktori kutatásaimat kiterjeszteni kísérleti vizsgálatokra, a fent említett numerikus analízisek mellett. Büszke vagyok arra, hogy az én kutatásaimmal kezdődtek el az SCWR témájú kutatások a BME NTI-ben 2006-ban Aszódi professzor témavezetése mellett a NAP NUKENERG magyar projekt keretében. Azóta egy további doktori kutatás (**Reiss, 2011**) folyt és számos tehetséges hallgató dolgozott (**Hegyesi, 2018; Mervay, 2018; Ványi, 2016; Ványi et al., 2019**) ezen a területen intézetünkben.

A doktori kutatásaim az SCWR-ek termohidraulikájának területén (**Pioro és Duffey, 2007**) lettek elvégezve, vagy még általánosabban a nukleáris energetika témájában. A kutatásaim motivációja az alábbi volt. 2018-ban a világ atomerőmű (NPP) flottája 453 reaktort (blokkot) számlált. További 56 blokk állt építés alatt (főleg Kelet-ázsiai országokban). A működő blokkok teljes nettó beépített kapacitása 397.6 GW_e volt és ezek állították elő a világ villamos energia termelésének 11%-át. Úgy tűnik, hogy az igény erre az alapvető, versenyképes és megbízható villamos energia előállító technológiára – amely működése mentes az üvegházhatású gázok kibocsátásától – a jelenben és valószínűleg a jövőben is nőni fog (pl. az elektromobilitás valószínű térnyerése, vagy az okos eszközök további terjedése miatt). A jelenlegi flotta (amely főleg a 2. generációs, kisebb mértékben pedig a 3. generációs reaktorok osztályába tartozik) fő termelési célja nagy mennyiségű villamos energia előállítása az erőmű alaperőművi üzeme során. A Föld ökológiai rendszere és az emberi közösségek miatt nagyon fontos a nemkívánatos emberi fenyegetéstől védett, technológiai értelemben biztonságos, energetikai értelemben hatékony működése a jelenlegi flottának, akárcsak az üzemelő blokkok műszakilag lehetséges élettartam hosszabbítása további 20-30 évvel (lásd pl. a Paks I atomerőmű esetét).

Habár ígéretes fejlesztések folynak, ezek legtöbbször valószínűleg csak a 4. generációs reaktorok esetében – mint az SCWR pl. – lesznek teljes körűen alkalmazhatóak (**Pioro (Szerkesztő), 2016**).

Az SCWR egy nagy nyomású, magas hőmérsékletű, könnyűvíz-hűtésű (LWR) reaktor, amely a hűtőközegének termodinamikai kritikus pontja (22,064 MPa and 373,95°C) fölött fog üzemelni (**Gen. IV Közösség, 2018**). Manapság az SCWR rövidítés már inkább egy több különböző koncepcióból álló reaktor családot jelöl inkább, mintsem egyetlen önálló koncepciót, mert az atomreaktorokat fejlesztő több kulcsszereplő ország (pl. Oroszország, Kanada, Japán, Kína és az EU) rendelkezik saját SCWR tervvel vagy tervekkel (**Leung, 2017**). Ezek a koncepciók alapvetően eltérhetnek egymástól. Ez az oka, hogy létezik termikus és gyors neutron spektrumú változat is a javasolt aktív zóna tervektől függően. A különböző koncepciók alapjául a létező nyomott csöves (pl. a kanadai) vagy a nyomott tartályos (az összes többi) reaktorok szolgálnak, és így nehéz- vagy könnyű-víz moderátorral jellemezhetőek. A jelenleg üzemelő vízhűtésű fosszilis tüzelésű kazánokkal és LWR-ekkel szemben az SCWR-ekben a termohidraulika döntően befolyásolja a hőfejlődést az üzemanyagban a kettejük között lévő erős kapcsolat révén, ahol a kapcsolatot a hűtőközeg anyagjellemzői jelentik. Továbbá, a hűtőközeg egy jelentősen nagyobb entalpiaemelkedést szenved el az SCWR-ek aktív zónájában, mint a jelenlegi vízhűtésű reaktorokban, amely körülmény csökkenti az ugyanakkora hőteljesítmény elvonásához szükséges hűtőközeg tömegáram nagyságát és ezzel egy időben megemeli a kilépő entalpia értékét a zónából egészen a túlhevített értékig (**Oka és Koshizuka, 1993**). A direkt, egykörös transz-kritikus „gőz” – ciklust javasolják az SCWR-ekhez, amely kizár mindenfajta belső keringést a reaktoron belül mindkét fő típusra, a nyomott csöves és tartályos kivétel esetén is. Ez azt jelenti, hogy

¹ Ez a reaktor típus a 4. generációs reaktorok közé tartozik, lásd bővebben itt:

https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems

² Tömör leírás az ANSYS CFX-ről itt található: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx>

a túlhevített „gőz” direkt módon a nagynyomású turbinába lesz betáplálva, míg a „gőz” – ciklusban keletkező tápvíz a reaktorba kerül visszatáplálásra, úgy, mint a forralóvízes reaktorok (BWR) esetén. Ezért, ezek az SCWR koncepciók magukban integrálják a működési és tervezési tapasztalatokat, amelyeket a több száz LWR-rel és ugyancsak több száz SCW-vel hűtött fosszilis tüzelésű szuperkritikus és ultra-szuperkritikus kazánal gyűjtöttek. Ez az oka annak, hogy ellentétben több 4. generációs reaktorral, az SCWR-ek a jelenlegi LWR-ekből kifejleszthetőek (**Pioro (Szerkesztő), 2016**).

Habár az említett LWR-ek és a fosszilis tüzelésű szuperkritikus és ultra-szuperkritikus kazánok évtizedek óta működnek, több eddig meg nem oldott műszaki kihívás merült fel az SCWR-ekkel kapcsolatban. Illusztris példái a műszaki kihívásoknak a hűtőközeg nem teljesen megértett termohidraulikai³ aspektusai (**Pioro és Duffey, 2005**) és az üzemanyag valamint az aktív zóna szerkezeti anyagainak szükséges anyagtechnológiai fejlesztése annak érdekében, hogy megfelelően korrózió-, szuperkritikus nyomás- és hőmérsékletállók legyenek az SCWR-ekben (**Ehrlich et al., 2004**).

A fő különbség a szub- és szuperkritikus nyomású víz termohidraulikája között a fázisátalakulás típusa. Míg a szubkritikus vízben elsőfajú fázisátalakulás (forrás-kondenzáció) zajlik le, addig az SCW-ben másodfajú fázisátalakulás, úgynevezett pszeudókritikus átmenet valósul meg. A pszeudókritikus átmenet folyamatos, erősen nem-lineáris anyagjellemző változással jellemezhető, amely egy bizonyos (inkább szűk), a nyomás emelkedésével táguló hőmérséklet tartományban jelentkezik (**Pioro és Duffey, 2007**). Az SCW termohidraulikája pedig inkább komplex folyamatokkal jellemezhető még viszonylag olyan egyszerű geometriákban is, mint az egyenes falú cső vagy körgyűrű keresztmetszetű csatorna az anyagjellemzők nem-lineáris változásai miatt. Ezért elég valószínű, hogy a hűtőközeg anyagjellemzők SCWR releváns geometriákban bekövetkező potenciális fizikai hatásainak teljes megértése jelentős előrelépést eredményezhetne az SCWR-ek R&D munkájában. Ennek ellenére, néhány tanulmányt (**Kim és Kim, 2011; Mikielewicz et al., 2002; Shehata és McEligot, 1998; Zhang et al., 2012**) leszámítva a legtöbb CFD vizsgálat a teljes hőátadási képre fókuszált, miközben elhanyagolta a határretegben lezajló bonyolult folyamatokat, amelyeket a hűtőközeg anyagjellemzőinek drasztikus megváltozása okoz. Ez a komplex termohidraulika az SCWR-ekben még komplexebbé válik amiatt, hogy a nukleáris üzemanyagokban végbemenő hőfejlődés erősen kapcsolódik a hűtőközeg hőmérséklet mezőjével annak anyagjellemzőin keresztül. Továbbá, az általam legintenzívebben vizsgált európai SCWR koncepció, az úgynevezett High Performance Light Water Reactor (HPLWR (**Schulenberg és Starflinger, 2012**)) aktív zónájának felépítése bonyolultabb, mint a jelenlegi LWR-eké. A CFD technika terén bekövetkezett közelmúltbeli előrelépések révén (fejben tartva a modellezési korlátokat (**Zhang et al., 2012**)), a CFD vizsgálatok megfelelő eszköznek tűnnek arra, hogy a kísérleti eredményeknél nagyobb részletettséggel számítási eredményeket szolgáltatassanak az SCWR-ekben lezajló termohidraulikai folyamatokra.

Kutatási célok

Az SCW nem teljesen feltárt termohidraulikai aspektusai, az SCWR-ek további fejlesztésére mutató nemzetközi igény és a csupán részlegesen megoldott CFD-s kihívások miatt, amely ezen a tudományterületen mutatkoznak, azt gondolom, kijelenthető, hogy a doktori kutatásaimat egy aktuális, intenzíven kutatott és a termohidraulika egy fontos területén végeztem, amely területen továbbra is szükség van a nemzetközi együttműködésre a létező problémák azonosítása, vizsgálata és megoldása érdekében.

Ennek fényében kézenfekvő, hogy a doktori kutatásaimat egyrészt a kereskedelmi CFD kódok (pl. ANSYS CFX) SCW termohidraulika területén történő felhasználhatóságának értékelésével, másrészt az SCW nem teljesen feltárt termohidraulikai aspektusainak a feltárásával, harmadrészt pedig az SCWR koncepciók fejlesztéséhez való hozzájárulással töltöttem el. Ezen három cél elérésének érdekében különböző geometriákban egy kiterjedt validációs sorozatot végeztem az ANSYS CFX

³ Pl. a különböző hőátadási módok fizikai háttere, az SCW anyagjellemzők hatása a hőátadásra vagy a nyomásesések SCWR releváns geometriákban normál üzem és különböző baleseti helyzetek esetén.

kóddal részben nemzetközi benchmark feladatok megoldása⁴ révén, numerikus és kísérleti vizsgálatok elvégzésével hozzájárultam az SCW nem teljesen megértett termohidraulikai tulajdonságainak megértéséhez, valamint a HPLWR Phase II és az SCWR-FQT EU finanszírozású projektek keretében CFD analíziseket végeztem az európai HPLWR koncepció különböző geometriáira.

Alkalmazott módszerek

Az irodalomkutatás során világossá vált, a gyakorlat számára jelentősnek mondható SCW áramlások túl magas Reynolds számmal jellemezhetőek ahhoz, hogy direkt numerikus szimulációt (DNS) vagy nagyörvény szimulációt (LES) végezzünk rájuk. Emiatt használtam a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (RANS) CFD megközelítést.

Az általam megépített numerikus modellek egyfázisú, nagyjából állandósult állapotú, turbulens, a felhajtóerővel terhelt áramlást és izotróp, Newtoni, összenyomható és disszipatív (viszkózus és hő vezetők) folyadékot (SCW) reprezentáltak. A véges térfogatok módszerét (FVM) használtam annak érdekében, hogy diszkretizáljam a vizsgált geometriát és megoldjam a RANS egyenleteket az ANSYS CFX kereskedelmi CFD kóddal. Hexagonális elemekből felépülő vagy hibrid (a faltól távol nagyobb tetragonális, míg a fal mellett ék alakú elemeket tartalmazó) numerikus rácsokat az ANSYS ICEM CFD programmal hoztam létre. A konvektív, diffúzív és turbulens tagokat általában másodrendűen pontos numerikus sémákkal közelítettem a modellekben.

A turbulenciát részben a vonatkozó irodalom, részben pedig a saját tapasztalatom alapján modelleztem. A Shear Stress Transport (SST) örvényviszkózitás (first momentum closure (FMC) típusú) modellt (**Menter, 1993**) megfelelő fal közeli rácsfelbontással együtt használtam normál (csavarodó hatás vagy nagy áramvonal görbülettől mentes) SCW áramlásokhoz. A csavarodó hatással jellemezhető (pl. a HPLWR-ben alkalmazott helikális távtartók által okozott) áramlásokat viszont alacsony Reynolds számú Reynolds feszültség (second momentum closure (SMC) típusú) turbulencia modellekkel (pl. a Baseline Reynolds Stress Model (BSL-RSM) az ANSYS CFX (**ANSYS Inc., 2017**)) modelleztem.

A kísérleti vizsgálataink esetében a nem konvencionális neutron radiográfia (NR) technikát használtuk párhuzamosan konvencionális mérési technikákkal (mint a termoelemek, abszolút és különbségi nyomástávadók, tömegáram mérők) annak érdekében, hogy az SCW közeg természetes cirkulációs áramlás termohidraulikájának további részleteit ismerhessük meg.

Új tudományos eredmények: Tézisek

A doktori kutatásaim során elért, publikált fő tudományos eredményeim szerepelnek a következő felsorolásban (megjegyzendő, hogy a tézispontokhoz kötődő publikációk a disszertációban való megjelenés sorrendjét követik):

1. Létrehoztam egy validált numerikus (CFD) modellt a szuperkritikus víz fölfelé áramlására vertikális, homogén módon fűtött, egyenes, sima belső furatú cső geometriára, és több kísérlet adataival való összehasonlítás után arra a következtetésre jutottam, hogy állandósult áramlási esetben a legjobb egyezés a mért és számított eredmények között úgy kapható, ha a beépített IAPWS-IF97 termofizikai anyagi jellemző modellt, a Shear Stress Transport turbulencia modellt és az $y_1^+ \leq 1$ feltételt teljesítő numerikus rácsfelbontást alkalmazunk. A csőgeometria teljes kerületének modellezése nem szükséges, egy kerület mentén forgási szimmetrikus modell (pl. a cső 10° -os szegmense) használható **{2}**, **{11}**.
2. Cső és csatorna geometriában áramló szuperkritikus víz validált CFD modelljei által szolgáltatott eredmények alapján arra jutottam, hogy a lokális változók eloszlása (pl. falhőmérsékleté) különösen a fűtött falhoz közel szignifikáns érzékenységet mutat a globális peremfeltételek kis változására, úgymint a belépő hőmérséklet ($\pm 30^\circ\text{C}$), referencianyomás ($\pm 2\% - \pm 20\%$), tömegáram ($\pm 10\% - \pm 20\%$) és hőfluxus ($\pm 10\% - \pm 20\%$). A hőátadás elfajulása esetén az érzékenység szignifikánsan erősebb, mint normál vagy fokozott hőátadás esetében **{1}**, **{6}**.
3. CFD modelleket fejlesztettem HPLWR üzemanyag kazetta releváns geometriákra és arra a következtetésre jutottam, hogy a keresztmetszeti áramkép periodikus módon változik a

⁴ Ezek vagy a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ), vagy a Generation Four International Forum (GIF) szervezésében valósultak meg.

- keresztmetszet geometriájával együtt, és a sebesség mező keresztirányú sebességre tesz szert a helikális távtartók jelenléte miatt. Emiatt alakul ki óramutató járásával ellentétes (külső csavarodó áramlási kör) vagy azzal megegyező (belső csavarodó áramlási kör) irányú csavarodó áramlás a kazetta külső fala és a moderátor csatorna fala mellett elhelyezkedő szubcsatornában. Erős egyirányú szubcsatornák közötti keresztáramlásokat (0.2 – 2.2 m/s) azonosítottam sarki és fal melletti szubcsatorna határokon a belső és külső csavarodó áramlási körben, valamint erős kétirányú szubcsatornák közötti keresztáramlásokat ($\pm 0.1 - \pm 2.2$ m/s) két üzemanyag pálca közötti szubcsatorna határokon **{4}**, **{5}**, **{7}**, **{9}**.
4. Az SCWR-FQT berendezés CFD vizsgálata során nem kívánt mértékben instacionárius és egyenetlen szuperkritikus víz áramlást azonosítottam a belépő szakaszon, amelyet egy, a befoglaló méretekkel azonos nagyságú örvény okoz a fordítókamrában. A problémát megoldottam három további fenékelem tervezet CFD analízisével. A legmegfelelőbb, nyolc kis terelő szárnyal szerelt tárcsa fenékelem tervezetet választottam ki, mert ez szolgáltatta a legegyszerűsebb és legstacionáriusabb áramlást a belépő szakaszon **{4}**, **{12}**, **{13}**, **{14}**.
 5. Stagnáló szuperkritikus víz áramlási zónákat azonosítottam közvetlenül az alsó távtartó után sarki szubcsatornában az SCWR-FQT teszt szakaszának CFD analízise során. Nem kívánt alacsony sebességű áramlási régiók maradnak az áramlásban a fűtött szakasz kezdetéig a stagnáló áramlási zónák nyomában. A problémát megoldottam további két alsó távtartó tervezet CFD analízisével. A legmegfelelőbb, teljesen átterezett új alsó távtartó tervezetet választottam: eltüntette a stagnáló áramlási zónákat az alsó távtartó mögött és még erősítette is a belépő áramlás stacionárius jellegét **{4}**, **{12}**, **{13}**, **{14}**.
 6. Négypalcás üzemanyag köteg validált CFD modelljeinek eredményei alapján megerősítettem, hogy a termohidraulikai szempontból legjobb kompromisszumos választás a HPLWR üzemanyag kazetta helikális távtartójának menetemelkedésére a 200 mm-es érték. A nyomásesés a fűtött szakaszon (hidraulikai szempont: az alacsonyabb a jobb) 18%-kal magasabb csupán a helikális távtartó nélküli geometriához képest, míg az átlagos hőátadási tényező (termikus szempont: a magasabb a jobb) 95%-kal magasabb a sarki szubcsatornában, amelyet a legforróbbnak találtam helikális távtartó nélküli esetben. A helikális távtartó alkalmazása fokozza a hőátadást a sarki szubcsatornában, pontosan ott, ahol a leginkább szükség mutatkozik rá **{7}**, **{8}**.
 7. Meghatároztam a nyomásesési komponenseit a szuperkritikus víznek természetes cirkulációs áramlás során különböző nyomásokra (225-275 bar) és belépő hőmérsékletekre (50-200°C) az ANCARA körön végzett kísérletek útján. Két domináns nyomásesési komponens azonosítottam: a sűrűlódásit és a hidrosztatikusát, viszont az áramlás gyorsítási nyomásesése (a gyorsítást a sűrűség csökkenése okozza, ez a komponens a domináns kevert konvekciós és kényszeráramlások esetén) elhanyagolhatóan adódott az igen alacsony áramlási sebességek miatt (a sebesség $n \times 1$ cm/s az $n \times 1$ m/s helyett) **{3}**, **{10}**.

Az eredmények hasznosításáról

A doktori kutatásaim alatt elért eredmények és az ezekből kidolgozott tézisek alapján, úgy vélem, hogy a kutatásaim elérték a kezdetekkor kitűzött célokat. Kutatásaimmal hozzájárultam a nemzetközi erőfeszítésekhez annak érdekében, hogy felmérjük a kereskedelmi CFD kódok (pl. ANSYS CFX) használhatóságát az SCW termohidraulikájának területén (**{1}**, **{2}**, **{6}**, **{11}**, **(Rohde et al., 2016)**), az SCW nem teljesen megértett termohidraulikai aspektusainak feltárásához (**{1}**, **{3}**, **{6}**, **{7}**, **{8}**, **{10}**), valamint az SCWR koncepciók fejlesztéséhez (**{4}**, **{5}**, **{7}**, **{9}**, **{12}**, **{13}**, **{14}**). Biztos vagyok benne, hogy ezek az eredmények hozzá fognak járulni bizonyos mértékben az SCWR-ek jövőbeni kutatásához és fejlesztéséhez.

Az eredményeim jövőbeni felhasználásának néhány konkrét példája a következő:

- ❖ Az SCWR-FQT berendezés a jövőben megépítésre kerül. Ez lesz az első olyan berendezés, amely szuperkritikus nyomáson működik, és nukleáris üzemanyagot használ. Nagyon büszke vagyok arra, hogy hozzájárultam az SCWR-FQT megtervezéséhez.
- ❖ Egy európai- kínai-kanadai együttműködés kidolgozás alatt áll, annak érdekében, hogy folytassuk az SCWR-ek R&D tevékenységét. Ennek megvalósításának érdekében egy európai H2020-as témajavaslat (amely a javaslatom alapján a MACHETE névre hallgat) került benyújtásra 2018. szeptember 27-én az NFRP-2018-2 kiírásra. Intézetünk egyike a 15

partnernek. Remélem, hogy győzni fog a témajavaslatunk és ez a nagyszerű projekt elnyeri az EU pénzügyi támogatását a haladó célok elérése érdekében.

- ❖ A megkezdett kísérleti munka az ANCARA körön a közeljövőben folytatódni fog. Így, a megszerzett tapasztalat ezzel a körrel újra hasznosulni fog, és remélhetően új eredmények fognak születni.
- ❖ Néhány apró részfeladat a közeljövő SCWR témájú kutatásaiból valószínűleg szakdolgozat, diplomaterv vagy TDK dolgozat keretében kerül majd megoldásra egyetemi hallgatók által, ahogy ez a múltban is történt.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- {1} Kiss Attila, Aszódi Attila, *Sensitivity Studies on CFD Analysis for Heat Transfer of Supercritical Water Flowing in Vertical Tubes*, The Experimental Validation and Application of CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology (**CFD4NRS-4**) konferencia kiadvány, Daejeon, Dél-Korea, 2012. szeptember 10–12.
- {2} Kiss Attila, Aszódi Attila, *Summary for Three Different Validation Cases of Coolant Flow in Supercritical Water Test Sections with the CFD Code ANSYS CFX 11.0*, **Nuclear Technology**, 170/1, 40-53. oldal, 2010. április.
- {3} Kiss Attila, Balaskó Márton, Horváth László, Kis Zoltán, Aszódi Attila, *Experimental investigation of the thermal hydraulics of supercritical water under natural circulation in a closed loop*, **Annals of Nuclear Energy**, 100/2, 2017. február, 178–203. oldal, DOI: 10.1016/j.anucene.2016.09.020, 2016.
- {4} Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila, *Numerical analysis on inlet and outlet sections of a test fuel assembly for a Supercritical Water Reactor*, **Nuclear Engineering and Design**, 295, 415–428. oldal, 2015. december 15.
- {5} Kiss Attila, Eckart Laurien, Aszódi Attila, Yu Zhu, *Numerical simulation on a HPLWR fuel assembly flow with one revolution of wrapped wire spacers*, **Kerntechnik**, 2010/04, 148-157. oldal, 2010.
- {6} Kiss Attila, Andrey Churkin, Darwan S. Pilkhwal, Abhijeet M. Vaidya, Walter Ambrosini, Andrea Pucciarelli, Krishna Podila, Yanfei Rao, Laurence Leung, Chen Yuzhou, Mark Anderson, Meng Zhao, *Summary on the Results of Two Computational Fluid Dynamic Benchmarks of Tube and Different Channel Geometries*, **ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science**, 4., 2018. január.
- {7} Kiss Attila, Mervay Bence, *Numerical analysis on the thermal hydraulic effect of wrapped wire spacer in a four rod fuel bundle*, **Nuclear Engineering and Design**, Közlésre elfogadott kézirat (Elfogadták 2018. november 21-én), megjelenés alatt.
- {8} Kiss Attila, Mervay Bence, *Numerical Analysis on the Effect of Wrapped Wire Spacers on Thermal Hydraulics in a Four Rod Fuel Bundle*, **26th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety**, Helsinki, Finnország, 2016. október 10-14.
- {9} Kiss Attila, Eckart Laurien, Aszódi Attila, *Numerical Simulation of a HPLWR Fuel Assembly Flow With Wrapped Wire Spacers*, megjelent az **International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2008 (ICAPP 2008)** konferencia kiadványában, 8339 számú cikk, Anaheim, California, USA, 2008. június 9-12.
- {10} Balaskó Márton, Horváth László, Horváth Ákos, Kiss Attila, Aszódi Attila, *Study on the properties of supercritical water flowing in a closed loop using dynamic neutron radiography*, **Physics Procedia**, 43, 254 – 263. oldal, 2013.
- {11} Kiss Attila, Aszódi Attila, *SCWR üzemanyagban lejátszódó termohidraulikai folyamatok modellezése az ANSYS CFX 10.0 kóddal*, **Magyar Energetika**, XV./5., 2007. november.

- {12} Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila, *Az SCWR-FQT tesztszakasz be- és kilépő részének CFD analízise*, **Nukleon a Magyar Nukleáris Társaság elektronikus folyóirata**, VII. évf. (2014) 169, 2014. szeptember.
- {13} Mariana Ruzickova, Thomas Schulenberg, Dirk C. Visser, Radek Novotny, Kiss Attila, Maraczy Csaba, Aki Toivonen, *Overview and progress in the European project: "Supercritical Water Reactor – Fuel Qualification Test"*, **Progress in Nuclear Energy**, 77, 381–389. oldal, 2014. november.
- {14} Mariana Ruzickova, Ales Vojacek, Thomas Schulenberg, Dirk C. Visser, Radek Novotny, Kiss Attila, Maraczy Csaba, Aki Toivonen, *European Project "Supercritical Water Reactor–Fuel Qualification Test": Overview, Results, Lessons Learned, and Future Outlook*, **ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science**, 2/1, 2015. december 9.

További folyóirat cikkek

M. Rohde, J. W. R. Peeters, A. Pucciarelli, **Kiss A.**, Y. F. Rao, E. N. Onder, P. Muehlbauer, A. Batta, M. Hartig, V. Chatoorgoon, R. Thiele, D. Chang, S. Tavoularis, D. Novog, D. McClure, M. Gradecka and K. Takase, *A Blind, Numerical Benchmark Study on Supercritical Water Heat Transfer Experiments in a 7-Rod Bundle*, **ASME Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science**, 2(2), 021012, 12 oldal, azonosító: NERS-15-1156; doi: 10.1115/1.4031949, February 29, 2016.

További konferencia cikkek

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Preliminary calculations of Coolant Flow in a SCWR Fuel Assembly with the Code ANSYS CFX 10.0*, **Modelling and Measurements of Two-Phase Flows and Heat Transfer in Nuclear Fuel Assemblies**, konferencia cikk, KTH Workshop, Stockholm, Svédország, , 2006. október 10-11.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *SCWR üzemanyagban lejátszódó termohidraulikai folyamatok modellezése az ANSYS CFX 10.0 kóddal*, **V. Nukleáris Technikai Szimpózium**, Paks, Magyarország, 2006. november 30.– december 1., Megjelent a "**Magyar Energetika**" 2007/5 számában.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Preliminary calculations of Coolant Flow in a SCWR Fuel Assembly with the Code ANSYS CFX 11*, **the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2007 (ICAPP 2007)**, konferencia cikk, azonosító: 7494, Nizza, Franciaország, 2007. május 13-18.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Refined validation of water coolant flow in a supercritical pressure test section with the code ANSYS CFX 11*, **12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12)**, konferencia cikk, azonosító: 137, Sheraton Station Square, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2007. szeptember 30 – október 4.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Short summary of Numerical Simulation of a HPLWR Fuel Assembly Flow with Wrapped Wire Spacers*, **International Students' Workshop on High Performance Light Water Reactors**, Karlsruhe, Németország, 2008. március 31 – április 3.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Summary for Three Different Validation Cases of Coolant Flow in Supercritical Water Test Sections with the Code ANSYS CFX 11.0*, **International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2008 (ICAPP 2008)**, konferencia cikk, azonosító: 8336, Anaheim, California, USA, 2008. június 9-12.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *SCWR üzemanyagban lejátszódó termohidraulikai folyamatok modellezése az ANSYS CFX kóddal*, **VII. Nukleáris Technikai Szimpózium**, Budapest, Magyarország, 2008. december 4-5.

Kiss Attila, Eckart Laurien, Aszódi Attila, Yu Zhu, *Improved Numerical Simulation of a HPLWR Fuel Assembly Flow with Wrapped Wire Spacers*, **4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSCWR-4)**, konferencia cikk, azonosító: 03, Heidelberg, Németország, 2009. március 8 – 11.

Kiss Attila, Eckart Laurien, Aszódi Attila, Yu Zhu, *Numerical Simulation on a HPLWR Fuel Assembly Flow with One Revolution of Wrapped Wire Spacers*, **Workshop on Nuclear Fuel Assembly Modelling and Experiments**, KTH, Stockholm, Svédország, 2009. július 9 – 10.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Summary for different validation cases of water coolant flow in supercritical water test sections with the code ANSYS CFX*, **Conference on Modelling Fluid Flow 2009** (CMFF'09), a 14. esemény a **Fluid Flow Technologies** nevű nemzetközi konferencia sorozatában, Budapest, Magyarország, 2009. szeptember 9 – 12.

Kiss Attila, Eckart Laurien, Aszódi Attila, Yu Zhu, *Numerical Simulation on a HPLWR Fuel Assembly Flow with One Revolution of Wrapped Wire Spacers*, **IAEA Technical Meeting on Heat Transfer, Thermal-Hydraulics and System Design for SCWRs**, Pisai Egyetem, Pisa, Olaszország, 2010. július 5-9.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Numerical Experiment on Different Validation Cases of Water Coolant Flow in Supercritical Pressure Test Sections Assisted by Discriminated Dimensional Analysis part I: The Dimensional Analysis*, **5th International Symposium on Supercritical Water Cooled Reactors** (ISSCWR-5), konferencia cikk, azonosító: 36, 13. oldal, Vancouver, Kanada, 2011. március 13 – 16.

Kiss Attila, Eckart Laurien, Aszódi Attila, Yu Zhu, *Numerical Simulations on the Rotating Flow of Wrapped Wired HPLWR Fuel Assembly*, **5th International Symposium on Supercritical Water Cooled Reactors** (ISSCWR-5), konferencia cikk, azonosító: 37, 19. oldal, Vancouver, Kanada, 2011. március 13 – 16.

Vágó Tamás, Kiss Attila, Aszódi Attila, *Numerical Investigation on the Inlet and Outlet Effect of Heated Test Section of SCWR Fuel Qualification Test Design*, **Joint HZDR & ANSYS Conference; 10th Multiphase Flow Conference & Short Course; Simulation, Experiment and Application**, Dresden, Németország, 2012. június 12-14.

Balaskó Márton, Horváth László, Horváth Ákos, Kiss Attila, Aszódi Attila, *Study on the Properties of Supercritical Water Flowing in a Closed Loop using Dynamic Neutron Radiography*, **7th International Topical Meeting on Neutron Radiography**, Kingstone, Kanada, 2012. június 17 – 21.

Vágó Tamás, Kiss Attila, Aszódi Attila, *Az SCWR-FQT tesztszakaszának CFD analízise: a belépési hatás vizsgálata*, **XI. Nukleáris Technikai Szimpózium**, konferencia cikk, azonosító: 34, 10 oldal, Paks, Magyarország, 2012. november 29-30.

Kiss Attila, Aszódi Attila, *Numerical Investigation on the Physical Background of Deteriorated Heat Transfer Mode in Supercritical Pressure Water*, **6th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors** (ISSCWR-6), Shenzhen, Guangdong, Kínai NK, 2013. március 3 – 7.

Balaskó Márton, Horváth László, Horváth Ákos, Kiss Attila and Aszódi Attila, *Study on the Heat Transfer of Supercritical Pressure Water Flowing in a Closed Loop using Dynamic Neutron Radiography*, **6th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors** (ISSCWR-6), Shenzhen, Guangdong, Kínai NK, 2013. március 3 – 7.

Kiss Attila, Vágó Tamás, Aszódi Attila, *Az SCWR-FQT tesztszakaszának CFD analízise: a be- és kilépő rész vizsgálata*, **XII. Nukleáris Technikai Szimpózium**, 9 oldal, Budapest, Magyarország, 2013. December 5-6.

Vágó Tamás, Kiss Attila, Aszódi Attila, *Numerical investigation on the inlet and outlet effect of heated test section of SCWR fuel qualification test design*, **15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics** (NURETH-15), konferencia cikk, azonosító: NURETH15-499-D05, Pisa, Olaszország, 2013. május 12 – 15.

M. Ruzickova, T. Schulenberg, D. C. Visser, R. Novotny, Kiss A., C. Maraczy, A. Toivonen, *An overview and progress in the European project: "Supercritical Water Reactor – Fuel Qualification Test"*, **19th Pacific Basin Nuclear Conference** (PBNC-19), konferencia cikk, 9 oldal, Vancouver, Kanada, 2014. augusztus 24 – 29.

M. Ruzickova, A. Vojacek, T. Schulenberg, D.C. Visser, R. Novotny, Kiss A., C. Maraczy, A. Toivonen, *European Project "Supercritical Water Reactor – Fuel Qualification Test" (SCWR-FQT):*

Overview, Results, Lessons Learnt and Future Outlook, **7th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors** (ISSCWR-7), konferencia cikk, azonosító: ISSCWR7-1054, Helsinki, Finnország, 2015. március 15-18.

M. Rohde, J. W. R. Peeters, A. Pucciarelli, Kiss A., Y. F. Rao, E. N. Onder, P. Mühlbauer, A. Batta, M. Hartig, V. Chatoorgoon, R. Thiele, D. Chang, S. Tavoularis, D. Novog, D. McClure, M. Gradecka, K. Takase, *A Blind, Numerical Benchmark Study on Supercritical Water Heat Transfer Experiments in a 7-Rod Bundle*, **7th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors** (ISSCWR-7), konferencia cikk, azonosító: ISSCWR7-2044, Helsinki, Finnország, 2015. március 15-18.

Kiss Attila, Andrey Churkin, Alexey Krutikov, Luka Golibrodo, Vasilii Volkov, Abhijeet M. Vaidya, Walter Ambrosini, Andrea Pucciarelli, Krishna Podila, Yanfei Rao, Laurence Leung, Chen Yuzhou, Mark Anderson, *Summary on the results of two CFD benchmarks of tube and different channel geometries*, **8th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors** (ISSCWR-8), konferencia cikk, Chengdu, China, 2017. március 13 – 15.

Kiss Attila, Balaskó Márton, Horváth László, Kis Zoltán, Bartos Júlia, Aszódi Attila, *Study on the thermal hydraulics of supercritical water under natural circulation flowing in a closed loop*, **8th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors** (ISSCWR-8), konferencia cikk, Chengdu, China, 2017. március 13 – 15.

Kiss Attila, Andrey Churkin, Alexey Krutikov, Luka Golibrodo, Vasilii Volkov, Darwan S. Pilkhwal, Abhijeet M. Vaidya, Walter Ambrosini, Andrea Pucciarelli, Krishna Podila, Yanfei Rao, Laurence Leung, Chen Yuzhou, Mark Anderson, Meng Zhao, *Two CFD benchmarks on SCWR related tube and different channel geometries*, **27th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety**, konferencia cikk, München, Németország, 2017. október 17 – 20.

Kiss Attila, Mervay Bence, *A helikális távtartó termohidraulikára gyakorolt hatásának numerikus áramlástanai vizsgálata*, **XVI. Nukleáris Technikai Szimpózium**, konferencia cikk, Budapest, Magyarország, 2017. november 23 – 24.

Hivatkozások

- ANSYS Inc., 2017. CFX Theory Guide - 2.3.2.2. The BSL Reynolds Stress Model.
- Ehrlich, K., Konys, J., Heikinheimo, L., 2004. Materials for high performance light water reactors. J. Nucl. Mater. 327, 140–147. oldal <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.01.020>
- Gen. IV Közösség, 2018. Gen IV International Forum [WWW dokumentum]. https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr
- Hegyesi, B.I., 2018. Computational Fluid Dynamic analysis on the thermal hydraulics of a fuel assembly of the thorium-uranium fuelled SCWR, BSc szakdolgozat, témavezető: Kiss A., konzulens: Professor Csom Gy., a BME NTI-be leadva, 2018. januárjában sikeresen megvédve.
- Kim, D.E., Kim, M.H., 2011. Two layer heat transfer model for supercritical fluid flow in a vertical tube. J. Supercrit. Fluids 58, 15–25. oldal <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.04.014>
- Leung, L., 2017. Supercritical Water-cooled Reactors, GIF Webinar sorozat, On-line webinár, 2017. március 28.
- Menter, F.R., 1993. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. Proceedings of the AIAA 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, USA, 1993. július 6–9.
- Mervay, B., 2018. Numerikus áramlástanai számítások különböző SCWR releváns geometriákban áramló szuperkritikus nyomású vízre, MSc diplomaterv, témavezetés: Professor Paál Gy., konzulens: Kiss A., a BME NTI-be leadva, 2018. januárjában sikeresen megvédve.
- Mikielewicz, D.P., Shehata, A.M., Jackson, J.D., McEligot, D.M., 2002. Temperature, velocity and mean turbulence structure in strongly heated internal gas flows: comparison of numerical predictions with data. J. Heat Mass Transf. 45, 4333 – 4352. oldal.
- Oka, Y., Koshizuka, S., 1993. Conceptual Design of a Supercritical-pressure Direct-cycle Light Water Reactor. Nucl. Technol. 103, 295–302. oldal.
- Pioro (Szerkesztő), I., 2016. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, 1st Edition. ed, A volume in Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, Duxford (UK), Cambridge (USA), Kidlington (UK).
- Pioro, I.L., Duffey, R.B., 2007. Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications. ASME Press, New York, USA.
- Pioro, I.L., Duffey, R.B., 2005. Experimental heat transfer in supercritical water flowing inside channels (survey). Nucl. Eng. Des. 235, 2407–2430. oldal, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.05.034>
- Reiss, T., 2011. Coupled Neutronics-Thermal Hydraulics Analysis of SCWR, PhD disszertáció, BME, Budapest.
- Schulenberg, T., Starflinger, J., 2012. High Performance Light Water Reactor, Design and Analyses, 1. kiadás, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Shehata, A.M., McEligot, D.M., 1998. Mean structure in the viscous layer of strongly heated internal gas flows: measurements. J. Heat Mass Transf. 41, 4297 – 4313. oldal.
- Ványi, A.S., 2016. Tórium-urán üzemanyagciklusú SCWR teljesítmény-eloszlásának vizsgálata Monte Carlo módszerrel, 2016-os TDK Konferencia, BME Természettudományi Kar.
- Ványi, A.S., Fehér, S., Kiss, A., Csom, G., 2019. Coupled thermohydraulics-neutronics study of a thorium fueled SCWR concept, 9th International Symposium on SCWRs (ISSCWR-9), konferencia cikk, azonosító: 16.
- Zhang, G., Zhang, H., Gu, H., Yang, Y., Cheng, X., 2012. Experimental and numerical investigation of turbulent convective heat transfer deterioration of supercritical water in vertical tube. Nucl. Eng. Des. 248, 226–237. oldal, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.026>