



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPEST MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Nukleáris Technikai Intézet

ALLEGRO üzemanyag kazetta termohidraulikájának vizsgálata

Investigations of thermal hydraulics of ALLEGRO fuel assemblies

PhD téziszfüzet

Orosz Gergely Imre

Témavezető: Prof. Dr. Aszódi Attila

Budapest

2023

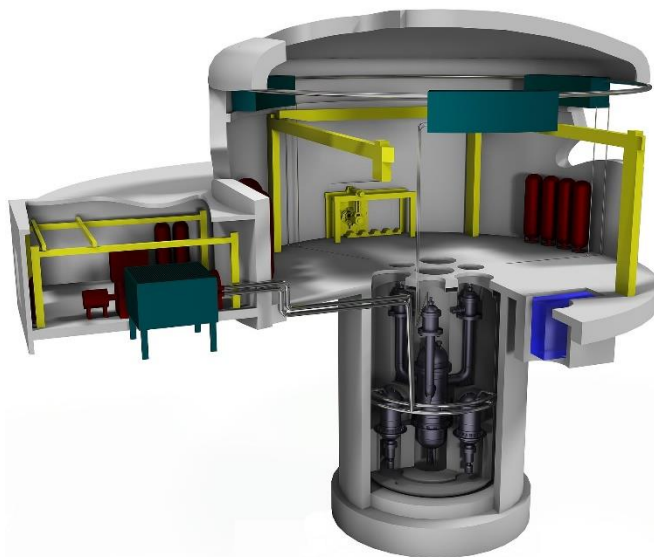
1. BEVEZETÉS

A gázhűtésű gyorsreaktor (Gas-cooled Fast Reactor - GFR) egyike azon IV. generációs nukleáris reaktorkoncepcióknak, amelyeket a Generation IV International Forum (GIF) további elemzésre és megvalósításra kiválasztott [1]. A reaktor hélium hűtőközeget alkalmaz, amely akár 850 °C hőmérsékletet is elérhet a reaktorzóna kilépésénél. Ezzel a magas munkaközeg hőmérséklettel a GFR erőmű akár 43-48%-os termikus hatásfokkal is rendelkezhet [2]. Ezen reaktortípusok bevezetése az atomerőműparkba hatalmas gazdasági és társadalmi előnyökkel járna.

A GFR reaktorzóna körülbelül egy nagyságrenddel nagyobb teljesítménysűrűséggel rendelkezik ($\sim 100 \text{ MW/m}^3$), mint a korábbi gázhűtésű termikus neutron spektrumú reaktorok ($5\text{-}10 \text{ MW/m}^3$). A nagy teljesítménysűrűség és a kis hőtehetetlenség miatt a zónából történő megbízható hőelvonás a GFR-konstrukció kulcskérdése.

Mielőtt a $2400 \text{ MW}_{\text{th}}$ teljesítményű GFR-t megépítenénk, létre kell hozni egy demonstrációs reaktort, amely bizonyítja a koncepció életképességét [4] [5]. A fenti célok elérése érdekében tervben van egy $75 \text{ MW}_{\text{th}}$ teljesítményű kísérleti gázhűtésű gyorsreaktor megépítése. Az ALLEGRO demonstrációs reaktor tervezett hőteljesítménye $75 \text{ MW}_{\text{th}}$, a zóna teljesítménysűrűsége 92 MW/m^3 , ami elég nagy ahhoz, hogy azzal a GFR-reaktorok működését vizsgálni lehessen.

Az ALLEGRO reaktor remélhetőleg demonstrálja a koncepciót, és segíti a szükséges technológiák kifejlesztését. A fő műszaki kihívások közé tartozik az üzemanyag-átrakó szerkezet, a remanens hő eltávolítására szolgáló hőcserélők, a magas hőmérsékleten üzemképes üzemanyag-kazetták és a héliumtisztítási technológiák kifejlesztése. Az ALLEGRO reaktor kifejlesztése jelenleg a SafeG nevű uniós projekt keretében zajlik [6].



1. ábra: Az ALLEGRO demonstrációs GFR 3D koncepcióterve [6].

2. CÉLKITŰZÉSEK

A doktori disszertációm célja, hogy minél pontosabb leírást adjak az ALLEGRO reaktor keramikus üzemanyag kazettáiban lejátszódó termohidraulikai folyamatokról.

A terveknek megfelelően az ALLEGRO kezdeti zónáját MOX (Mixed Oxide) fűtőelemekből állítják össze, hogy a fő berendezések (hőcserélők és a kompresszorok) működőképességét és hatékonyságát teszteljék. Az üzemeltetés későbbi szakaszában, a tervek szerint a zónába több kísérleti keramikus üzemanyag-kazettát is betöltenek a besugárzás hatásainak vizsgálata céljából. A MOX-kazettákból álló zóna hőmérséklete alacsonyabb, mint a végleges zónáé. A MOX zóna átlagos kilépési hőmérséklete ~ 530 °C lesz.

Ezt a kezdeti fázist követően a demonstrációs zónában, a GFR koncepcióhoz hasonló hőmérséklet-tartományban üzemelő (keramikus) kazettákat fognak használni, ami innovatív UC-PuC üzemanyag és SiC kompozit burkolat alkalmazását teszi szükségessé [2] [7]. Ezek az anyagok technikailag kerámiának minősülnek, ezért a kazettákat keramikus kazettáknak nevezik.

Értekezésemben a fent említett keramikus üzemanyag kazetta termohidraulikai kihívásaival foglalkozom.

Ehhez két különböző módszertant alkalmaztam. Munkám elején CFD (Computational Fluid Dynamics) háromdimenziós numerikus áramlástani szimulációkkal végeztem vizsgálatokat. Később valós fizikai Particle Image Velocimetry (PIV) mérésekkel igazoltam szimulációim helyességét. Mindkét módszertan külön-külön is releváns eredményeket szolgáltat, de együttesen egymás eredményeit képesek igazolni.

Első lépésként meg kell határozni a CFD-modellezés korlátait, és validációs módszerekkel ellenőrizni kell az ALLEGRO üzemanyag kazettához létrehozott CFD-modellek megbízhatóságát. A már validált modellek segítségével meg lehet találni a kazetta forrópontjait. Eközben pontos képet kaphatok a kazettában zajló különböző hőátadási folyamatokról, ami támogatja a további tervezési munkálatokat.

A forrópontok a biztonságos működés korlátozó tényezői, ezért célom, hogy megtaláljam a módját annak, hogy a reaktor teljesítményének csökkentése nélkül csökkenthessem a kazetta hőmérsékleti maximumát. A hőátadás javításával a kazetta maximális hőmérséklete csökkenthető. A hőátadás hatékonysága növelésének egyik ismert megoldása a nukleáris üzemanyag kazettákban az úgynevezett keverőfülekkel ellátott távtartó rácsok alkalmazása. A gázhűtésű reaktorokban eddig nem volt példa ilyen keverőfülek használatára. Célom volt egy működőképes, keverőfülrel ellátott távtartórács (Mixing Vane spacer Grid - MVG) koncepció kifejlesztése az ALLEGRO GFR számára. Az optimális keverőfűl geometria kiválasztását több CFD modellszámítás során sikerült megtalálnom.

Mivel ez az áramlástani probléma teljesen egyedi, szükségem volt egy sor validációs kísérletre a CFD modelleredményeim ellenőrzéséhez. A validáláshoz egy kísérleti tesztberendezést fejlesztettem ki, hogy demonstráljam az általam tervezett keverőfülek hatékonyságát. A kísérleti berendezés nem csak az ALLEGRO reaktor keramikus kazettájának vizsgálatára használható, hanem más háromszög rácsosztással rendelkező kazettatípusok vizsgálatára is. A kísérleti tesztberendezés neve PROUETTE (PIV ROD bUNDLE Test facility at bME). Optikai alapú PIV módszert alkalmaztam a pálcakötegekben lejátszódó áramlási folyamatok vizsgálatára.

3. KUTATÁSI MÓDSZERTAN

Látható, hogy az ALLEGRO reaktor keramikus kazettája különleges termohidraulikai tulajdonságokkal rendelkezik. Az atomenergia területén számos lehetőség van a fűtőelemek termohidraulikai folyamatának modellezésére vagy szimulálására. A legegyszerűbb és leggyakrabban alkalmazott módszer a számítógépes szimuláció. Attól függően, hogy mennyire részletesen akarjuk leírni a kiválasztott problémát, készíthetünk durvább modelleket rendszerkódok használatával, vagy ha a folyamatokat részletesebben akarjuk vizsgálni, akkor a vizsgálati tartományt a berendezés egy kisebb szegmensére kell szűkíteni, és egy nagy felbontású 3D CFD szimulációs modellt kell hozzá megalkotni. Az én esetemben a cél az üzemanyag kazetta minél pontosabb leírása volt, amihez több 3D-s modellt is készítettem az ANSYS CFX kód segítségével.

A CFD-kódok gyors eredményeket szolgáltatnak olyan áramlástanai problémákra, amelyeket a valóságban nem célszerű kísérletekkel vizsgálni. Ezek a kódok és szoftvercsomagok általában jól validáltak, de néhány speciális esetben szükség van az eredmények további megerősítésére. A nukleáris iparágban különösen fontos annak eldöntése, hogy a számított eredmények milyen mértékben fedik le a valós fizikai folyamatokat. Ehhez a CFD-kódok diszkretizációjához közeli felbontású mérési módszert kell alkalmazni. Az LDA (Laser Doppler Anemometry) és a PIV (Particle Image Velocimetry) mérési technikák beavatkozásmentes módon tesznek lehetővé rendkívül részletes áramlásmérést. A BME NTI-ben rendelkezésünkre áll egy PIV mérőrendszer, amelyre alapozva ilyen validációs méréseket lehet végezni.

3.1. Numerikus áramlástanai megközelítés

A numerikus áramlástan (CFD) olyan interdiszciplináris tudományterület, mely összefoglalja a folyadékok áramlását és az azokhoz kapcsolódó hő- és anyagtranszport-folyamatok numerikus modellezést. A következőkben nagyvonalakban ismertetem a CFD-számítások sajátosságait.

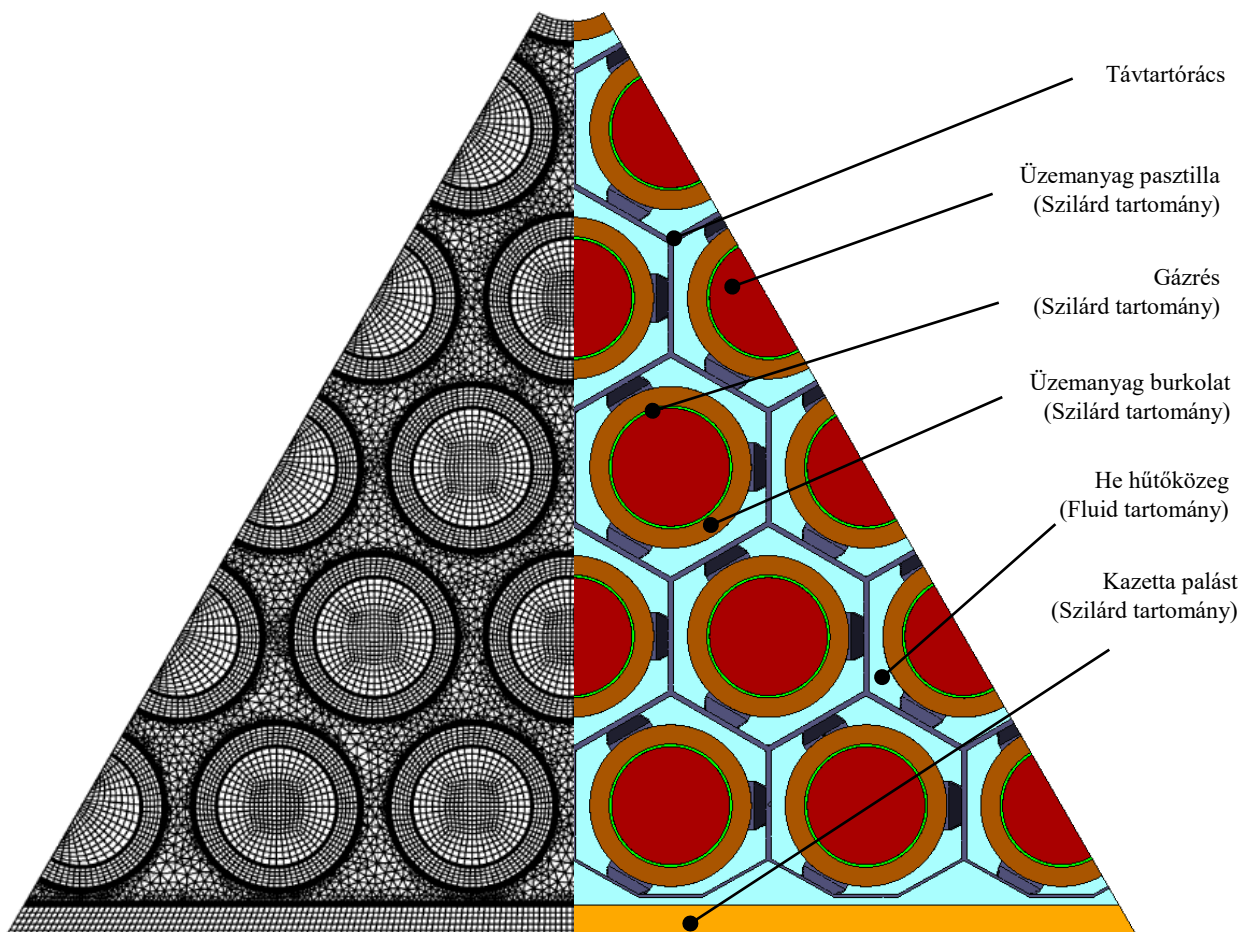
A tudományág gyakorlói olyan pontossággal szimulálják az áramlástanai folyamatokat bonyolult geometriákban, amelyet az áramlástanai kísérletek általában nem tudnának könnyen reprodukálni. A CFD módszer további előnye a kísérleti módszerekkel szemben, hogy nincs szükség drága és időigényes kísérleti berendezések tervezésére és megépítésére.

Napjainkban a gondosan megtervezett CFD szimuláció eredményeit a tényleges fizikai mérésekkel egyenértékűnek tekintik. Ennek elsődleges oka a számítógépek számítási sebességének drámai növekedése és a széles körben validált, univerzális CFD-kódok kifejlesztése. Meg kell azonban említenem, hogy új fizikai jelenségek, összetett geometriák, speciális közegek vagy nagy biztonsági jelentőségű kutatások esetében különösen indokolt a szimulációs modellek és módszerek ellenőrzése és validálása, amihez a CFD-módszerrel összehasonlítható felbontású kísérleti eredményekre van szükség.

A legtöbb CFD-kód a véges térfogatok módszerét (FVM) használja. A módszer lényege, hogy a vizsgált térrészt (tartományt) véges számú, véges méretű cellára bontjuk fel. Ezek a cellák egy úgynevezett hálót alkotnak. A háló létrehozásakor különbséget kell tenni a felületi és a térfogati elemek között. A hálógeneráló szoftverek általában a következő diszkretizációs elemeket részesítik előnyben: a felületeket háromszög és négyszög elemek fedik le, míg a belső régiókban általában tetraéder, hexaéder, piramis vagy prizma típusú elemeket használnak. A legnagyobb elemszámú CFD-modellem (lásd a disszertációm 6. fejezetében) több mint 197

millió elemből állt. A 2. ábrán látható egy példa az ALLEGRO keramikus kazettamodell térbeli diszkretizálására.

Az így kapott numerikus hálók esetében a kódok iteratív módon megoldják a hidrodinamika legfontosabb megmaradási egyenleteit (hő-, tömeg- és impulzus-megmaradás). Az iteratív számítások nagyon erőforrás-igényesek, ezért a szimulációkat gyakran nagy teljesítményű klaszterszámítógépen végzik. A legtöbb gyakorlati szimuláció turbulens áramlások leírásához kapcsolódik, amelyekhez speciális turbulencia-modelleket alkalmaznak a CFD-szimulációkban. E modellek nélkül az állandósult állapotokra vonatkozó számítások is nagyon időigényesek lennének. Meg kell azonban jegyezni, hogy a turbulenciamodellek nem univerzálisak, hanem inkább problémáspecifikusak. Bizonytalanságukat legalább egy érzékenységi vizsgálattal kell megbecsülni. Kutatásom során több turbulenciamodellt használtam, amelyeket a megfelelő fejezetekben ismertetek. Az általam használt modelleket úgy hoztam létre, hogy azok megfeleljenek a Nukleáris Technikai Intézet sokéves tapasztalatainak és a nukleáris iparban alkalmazott jó gyakorlatokra vonatkozó iránymutatásoknak (Best Practice Guidelines - BPG) [8].

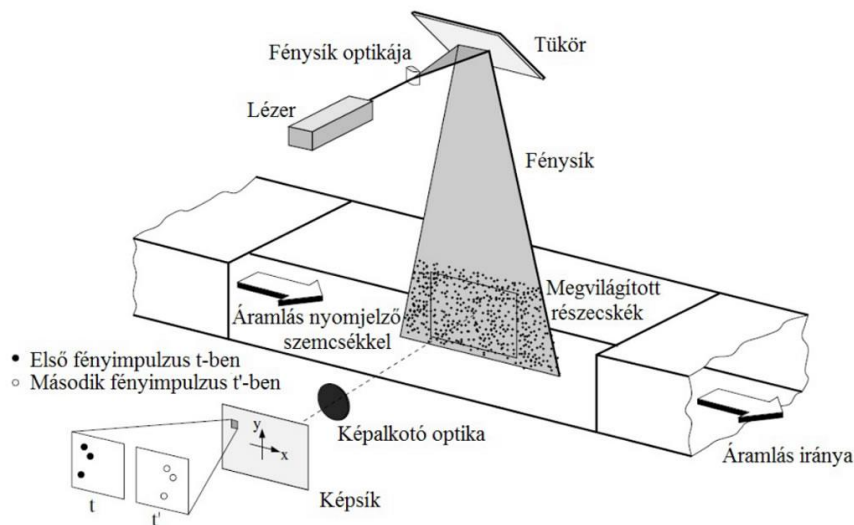


2. ábra: Hálófelbontás az ALLEGRO GFR üzemanyag kazetta kilépésénél és az OS2_CMPL CFD-modelljének részelemei

3.2. Particle Image Velocimetry megközelítés

Particle Image Velocimetry (PIV) egy optikai mérési technika az áramlások beavatkozásmentes elemzésére, amelyet az 1980-as évek óta fejlesztenek [9]. Az 1990-es évek végére a technika egyre elterjedtebbé vált az alap kutatásban és az ipari alkalmazásokban is, részben annak köszönhetően, hogy a film alapú fényképes képrögzítést felváltotta a videofelvétel használata és az elektronikus, majd a digitális fényképezőgépek elterjedése.

Ezzel párhuzamosan a szükséges számítástechnikai eszközök gyors ütemben fejlődtek, lehetővé téve a nagymennyiségű digitális kép rögzítését és egyre gyorsabb feldolgozását, valamint elemzését. Az optikai mérés fontos eleme a megvilágító fényforrás, ami a gyakorlatban nagyintenzitású lézereket takar. A lézerek méretének csökkenése és paramétereik javulásának köszönhetően a PIV-rendszerek egyre szélesebb körben terjedtek el.



3. ábra: Kísérleti elrendezés 2D PIV-hez szélcsatornában [9]

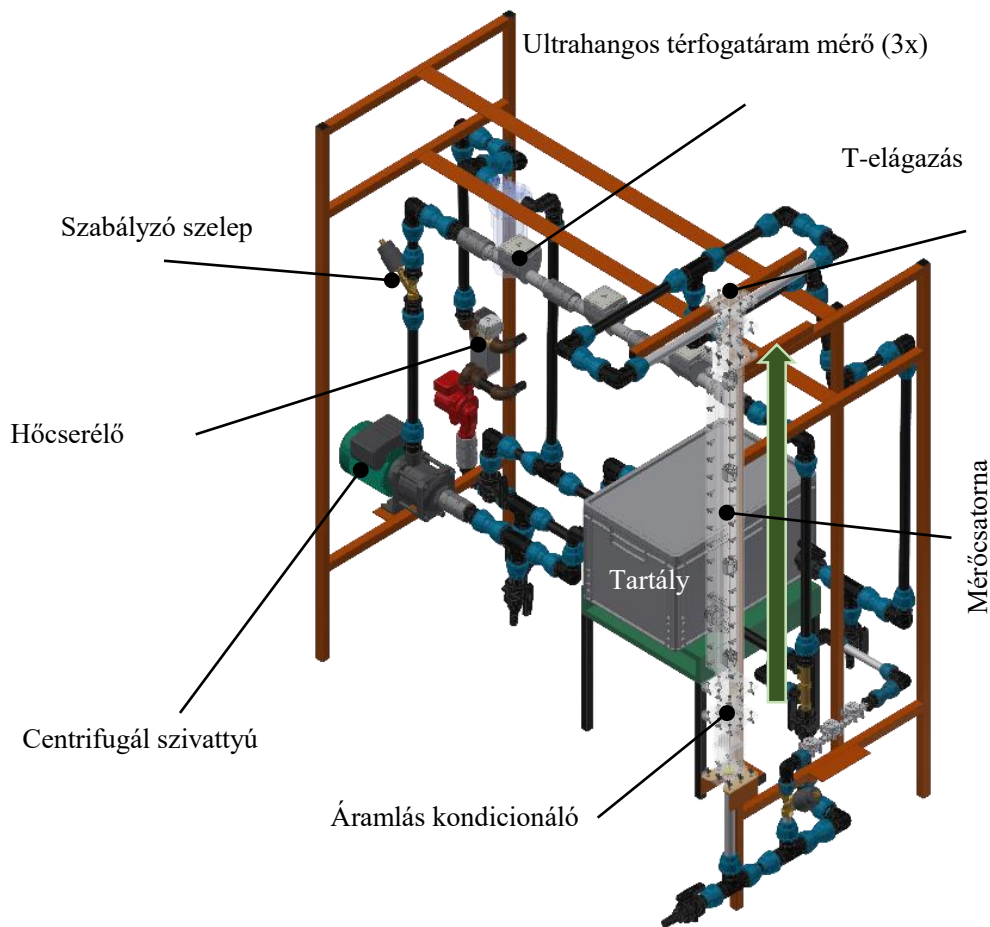
A PIV mérési technika azon alapul, hogy az áramló közegben elkevert és azzal együtt mozgó nyomjelző részecskék elmozdulásának rögzítésével következtetéseket lehet levonni az áramló folyadék sebességteréről. Az áramló közeg lehet gáz, víz vagy más optikailag átlátszó anyag. Optimális esetben a nyomjelző részecskének hasonló sűrűségűnek kell lennie, mint az áramló közegnek, méretének és alakjának pedig biztosítania kell a jó áramlásokövetést és a jó fényvisszaverő képességet. Az áramlással együtt mozgó részecskéket két egymást követő időpontban megvilágítják, a részecskék által szórt fényt rögzítik (azaz lefényképezik), és meghatározzák a két képen azonosított azonos részecskék mozgásának irányát és mértékét. Megfelelő matematikai eljárásokkal ez a részecske azonosítás megoldható, és a két kép között eltelt idő ismeretében meghatározható az áramlási sebesség. Megfelelő kalibrálással meghatározható a képi elmozdulás valós fizikai tartalma és kiszámítható a fizikai sebesség. A PhD kutatás során kidolgozásra került mérőrendszer (PIROUETTE) a doktori értekezés 7. fejezetében van részletesen bemutatva, a tézisfüzetben a 4. ábrán látható.

A mérőrendszert úgy terveztem, hogy izotermikus körülményeket modellezen. A berendezésben van egy 1 méter hosszú vizsgálati szakasz, amely hét pálcás pálcaköteggel szimulálja az ALLEGRO kazettában uralkodó áramlási viszonyokat. A víz áramlási körülményeit úgy hozom létre, hogy az ALLEGRO kazetta névleges körülményeihez hasonló Reynolds-számokat érjenek el. Ez lehetővé teszi a reaktorzóna tervezése szempontjából fontos áramlástani vizsgálatokat az üzemanyag kötegben és a távtartó rácsok körül. A víz áramlását egy centrifugál szivattyú biztosítja. A térfogatáram finomszabályozását egy szeleppel és három egymást követő ultrahangos térfogatáram mérővel állítom be.

Több térfogatáram mérővel növelhető a térfogatáram mérés pontossága, ami nagyon fontos a CFD-számításokhoz szükséges bemeneti peremfeltételek beállításához.

A csővezetékek és a szivattyú által okozott zavaró hatások csökkentése érdekében a tesztsatorna előtt egy áramlás kondicionáló került beépítésre. Az 1 méter hosszú hétpálcás pálcaköteg a tesztsatornában kapott helyet. A tesztsatornát levehető tetővel terveztem, a pálcaköteghez való a könnyű hozzáférés érdekében. Erre azért van szükség, hogy lehetővé váljon a pálcaköteg geometria megváltoztatása, úgymint különböző típusú távtartó rácsok és keverőfülek kicserélése. A tesztszakaszban a pálcaköteg FEP-ből (Fluorozott Etilén-Propilén) készült, hogy megfeleljen a MIR (Matching Index of Refraction) kritériumnak. A FEP polimer törésmutatója 1,33, ami közel azonos a munkaközeg (víz) törésmutatójával.

A távtartókat a mérési követelményeknek való megfelelés érdekében kisebb módosításokkal az ALLEGRO GFR kazetta távtartóinak megfelelően terveztem meg. A távtartók falvastagsága 0,8 mm. A rácsokat nagy felbontású 3D nyomtatási módszerrel (SLA), speciális kompozit gyanta használatával készítettük. A 3D nyomtatásnak köszönhetően a távtartók geometriája könnyen variálható és különböző típusú keverőfülekkel bővíthetők (pl. távtartó rács keverőfül nélkül, távtartók SPLIT és TWISTED típusú keverőfülekkel). Az MVG-k deformációjának megakadályozása összetett feladat, mivel a munkaközeg hőmérsékletét alacsonyan kell tartani egy hőcserélő egységgel (~30 °C), és meg kell akadályozni, hogy az MVG anyaga kémiai kölcsönhatásba kerüljön a munkaközeggel.



4. ábra: A PIROUETTE berendezés felépítése

4. TÉZISPONTOK

- I. Validált CFD modellt fejlesztettem az L-STAR benchmark berendezésre. **A sugárzásos hőátadás az ALLEGRO keramikus kazettában normál üzemi körülmények között is jelentős és mindenképpen figyelembe veendő fizikai folyamat. A pálca teljes hőteljesítményéhez képest a kisugárzott teljesítmény 0.71%-tól 9.7%-ig terjedő tartományban változik a különböző pálca pozíciókban [P1],[P2],[P3].**
- II. Az ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor keramikus kazettájának teljes keresztmetszetét magába foglaló validált CFD modellt fejlesztettem, amely leírja a kazetta aktív szakaszához tartozó összes szerkezeti elemet, az azokban lezajló hővezetést, valamint a hőszugárzást a hűtőközegben és a gázrészben. **Megállapítottam, hogy realiztikusabb modell eredmények elérése érdekében szükséges a szerkezeti elemekben végbemenő hővezetés leírása, amely csökkenti a kazetta hőmérsékleti maximumait. Nagy hőmérsékleti különbségek figyelhetők meg a különböző szubcsatorna típusok között, amelynek okaként a szubcsatornák közötti megfelelő hűtőközeg-keveredés hiányát azonosítottam. A legmagasabb pálcaburkolati hőmérséklet a sarok szubcsatornában található [P1],[P2],[P3].**
- III. Validált CFD modellt hoztam létre az ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor keramikus kazettájában alkalmazható keverőfülek szimulációs vizsgálatára. A keverőfűl geometria optimalizálása érdekében dimenziómentes tényezőket használtam. **Több keverőfűl típus eredményeinek összevetése után arra a következtetésre jutottam, hogy az ALLEGRO keramikus kazettára jellemző körülmények között a TWISTED típusú keverőfűl a legalkalmasabb a kazetta hőmérséklet-viszonyainak javítására. Validált CFD modelljeim és az általam megalkotott vizsgálati módszertan segítségével érzékenység vizsgálatot hajtottam végre a TWISTED keverőfűl optimális dőlésszögének megállapításához. A szimulációs vizsgálat eredményeképpen megállapítottam, hogy az ALLEGRO keramikus kazettára jellemző körülmények között a TWISTED típusú keverőfűlnek 30° az optimális dőlésszöge [P4].**
- IV. **Háromszög rácsosztású kazettákra vonatkozóan CFD specifikus módszert hoztam létre, amellyel a szubcsatornák közti hűtőközeg-keveredés irányfüggését is figyelembe lehet venni, a következőképpen:**

$$Transverse\ flow_x = \frac{1}{s} \int \frac{v_{cross}}{w_{bulk}} dy$$

ahol:

- | | | |
|-------------|---|---|
| s | – | a szubcsatornák közötti rész hossza [m], |
| v_{cross} | – | irányfüggő transzverzális sebesség [m/s], |
| w_{bulk} | – | a hűtőközeg fő sebességkomponense [m/s]. |

Így az irányfüggő keveredés axiális hosszmenti változását felhasználhatóvá és kézzelfoghatóvá tettem, ami különösen hasznos szekunder áramlásokat indukáló különböző keverőfülek vizsgálata és összehasonlítása esetén [P4].

- V. Az ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor keramikus kazettájára PIV kísérleti berendezést és CFD modellt fejlesztettem, amelyekkel az optimalizált TWISTED típusú keverőfülek teljes kazettára gyakorolt hatását vizsgáltam. **Kísérleti és CFD vizsgálatokkal**

megmutattam, hogy a sarokpálca túlhevülése megfelelően elrendezett keverőfülek segítségével elkerülhető, amihez viszont lényeges, hogy a sarokpálca két oldalán elhelyezkedő keverőfüleket nem tükörszimmetrikusan, hanem 60°-kal elforgatva kell elhelyezni. Bebizonyítottam, hogy a tükörszimmetrikusan elhelyezett keverőfülek 15 °C-szal növelik, míg a 60°-kal elforgatott elrendezésben 29 °C-szal csökkenteni tudják a pálcaburkolat maximális hőmérsékletét a forrópontban [P5],[P4].

- VI. Olyan 7 pálcát magába foglaló háromszög rácsosztású izotermikus PIV pálcaköteg mérőcsatorna kísérleti berendezést hoztam létre, amelyben a pálcák kizárólagosan FEP anyagból állnak és a távtartórácsok 3D nyomtatással készülnek, ezáltal különböző távtartórács geometriák áramlásra gyakorolt hatása vizsgálható. **Megállapítottam, hogy a pálcaköteget a kísérleti berendezésben függőlegesen kell elhelyezni, hogy a FEP pálcák kúszása, és a 3D nyomtatott speciális távtartórácsok geometriájának torzulása minimális maradjon.** Kísérleteimmel megállapítottam, hogy elengedhetetlen a szivattyú által bevitt hő elvezetése és a kísérlet izotermikus feltételeinek biztosítása mind a kísérleti geometria épségének megőrzéséhez, mind pedig a kísérletek megismételhetősége, reprodukálhatósága és CFD validációra történő felhasználhatósága érdekében.
- VII. **Mérésekkel támasztottam alá, hogy a 30°-os dőlésszögű TWISTED típusú keverőfül képes a keverőfül utáni régióban a legnagyobb keresztirányú sebességkomponensek létrehozására, ezért legcélszerűbb választás az ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor keramikus kazettában való alkalmazására [P5].**
- VIII. Felismertem, hogy a pálcák közti szűk térrészben nagy sebesség-gradiensű térrész található, ahol a kiértékelés során a lézersík véges szélességét (~1,5 mm) figyelembe kell venni, mert a PIV technika nem képes mélységben különbséget tenni az ebben a térrészben lévő nyomjelző részecskék között. **A PIV és a CFD eredmények megfelelő összehasonlítása érdekében a CFD számításokból származó sebességeloszlásoknak a lézersíkra merőleges 1,5 mm hosszú vonalszakasz mentén, a sebesség lokális átlagolásával kell elvégezni.** Az általam javasolt módszer közvetlenül összehasonlíthatóvá teszi a PIV és CFD vizsgálatokból származó vonalmenti sebességprofilokat [P5].

5. LEHETSÉGES ALKALMAZÁSOK

Az értekezés eredményei a nukleáris ipar több ágazatában is hasznosíthatók. A CFD számítások eredményei alapul szolgálhatnak a GFR technológia biztonsági elemzéseire, hogy megalapozzák azok megbízható működését. A disszertáció rávilágít a modellezési kihívásokra, amelyeket a GFR technológiában figyelembe kell venni.

A fűtőelemek hőátadási együtthatóinak pontos ismerete alapul szolgálhat a reaktor rendszerkódokban történő modellezése során használt paraméterek pontosítása során.

A szubcsatorna-kódokat széles körben használják a nukleáris biztonsági elemzés alapjaként. Az szubcsatornák közötti irányfüggő keveredési tényezők, amelyek a CFD-modellekből kinyerhetők, a szubcsatorna-kódok bemeneti paramétereiként használhatók.

A doktori kutatás alatt kifejlesztett PIV mérőrendszer egyedülálló a maga nemében. A rendszer alkalmas a háromszög rácsosztású atomreaktorok pálcakötegeiben lejátszódó áramlási folyamatok tanulmányozására. A háromszög rácsosztású üzemanyag a VVER reaktorokra jellemző, és a nemzetközi szakirodalomban kevés olyan publikáció van, amely ezen üzemanyagok működését PIV-módszertannal vizsgálják. A jövőben a PIROUETTE rendszert fogjuk használni a VVER reaktorok szempontjából releváns áramlástan mérésekhez. Tekintettel a mérések részletességére, az eredmények alapul szolgálhatnak nemzetközi CFD benchmark gyakorlatokhoz [11].

6. A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK

- P1. G.I. Orosz, S. Tóth, Thermal hydraulic investigations of ALLEGRO ceramic fuel assemblies, *Annals of Nuclear Energy*, 120 (2018) 570–580,
- P2. G.I. Orosz, S. Tóth, A. Aszódi, Simulations for L-STAR experimental gas-cooled system, *Kerntechnik* 85 (2020) 5 326-335
- P3. G.I. Orosz, S. Tóth, A. Aszódi, Detailed thermal modelling of the ALLEGRO ceramic assembly, *Nuclear Engineering and Design*, 376 (2021), 111127
- P4. G.I. Orosz, A. Aszódi, CFD Modelling of Mixing Vane Spacer Grids in ALLEGRO relevant gas cooled case, *Annals of Nuclear Energy*, 164 (2021), 108628
- P5. G.I. Orosz, B. Magyar, D. Szerbák, D. Kacz, A. Aszódi, ALLEGRO Gas cooled Fast Reactor Rod Bundle investigations with CFD and PIV method, *Nuclear Engineering and Design*, 400 (2022), 112062

7. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK

- P6. Orosz G.I., Tóth S., CFD vizsgálatok az ALLEGRO kerámia kazetta belső szubcsatornájára, *Nukleon*, IX. évf. (2016) 193, (Magyar)
- P7. Investigation of corner subchannel of ceramic assembly of ALLEGRO reactor, In: *IEEE, 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE) Seattle (WA)*, New York, IEEE (2017) Paper: 17097401, 5 p.
- P8. Orosz G.I., Tóth S., Az ALLEGRO kerámia kazetta hőmérséklet-eloszlásának egyenletesebbé tétele, *Nukleon*, XI. évf. (2018) 211, (Magyar)
- P9. G. I. Orosz, M. Peireti, B. Magyar, D. Szerbák, D. Kacz, B. Kiss, G. Zsíros, A. Aszódi, Preliminary Thesis on the First Part of the ALLEGRO CFD Benchmark Exercise: ALLEGRO CFD BENCHMARK: PART 1: Flow Straightener Benchmark Description (2022), arxiv, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.03940>

HIVATKOZÁSOK

- [1] OECD/NEA, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, January 2014.
- [2] 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, in *NURETH-15*, Pisa, Italy, May 12-17, 2013.
- [3] L. Bělovský, Project ALLEGRO, He-cooled fast reactor demonstrator, in *Nordic-Gen4 Seminar*, Lappeenranta, Finland, 2014.
- [4] C. Poette, F. Morin, V. Brun-Magaud and J. Pignatell, ALLEGRO 75 MW cores definition at start of GOFAST, in *GoFastR-DEL-1.2-01*, CEA, Cadarache, France, 2010.
- [5] P. Líška and G. Cognet, The ALLEGRO Project – European Project of Fast Breeder Reactor, in *1st International Nuclear Energy Congress*, Warsaw, Poland, May 23-24, 2011..
- [6] Project SafeG, SafeG, [Online]. Available: <https://www.safeg.eu/>. [Accessed 09 06 2021].
- [7] L. Charpentier, K. Dawi, M. Balat-Pichelin, E. Bêche, and F. Audubert, Chemical degradation of SiC/SiC composite for the cladding of gas-cooled fast reactor in case of severe accident scenarios, *Corrosion Science*, pp. 127-135, 2012 (59).
- [8] OECD NEA, Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications – Revision, www.oecd-nea.org: OECD NEA, February 2015.
- [9] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, and J. Kompenhans, Particle Image Velocimetry – A practical guide, Springer: Berlin, Germany, 2007.
- [10] G. I. Orosz and S. Tóth, CFD Investigation of Inner Subchannels of ALLEGRO Ceramic Fuel Assembly, *Nukleon*, May, 2016.
- [11] G. I. Orosz, M. Peiretti, B. Magyar, D. Szerbák, D. Kacz, B. Kiss, G. Zsíros and A. Aszódi, Preliminary Thesis on the First Part of the ALLEGRO CFD Benchmark Exercise, *arxiv*, 2022.
- [12] A. Vasile, B. Kvizda, S. Bebjak, G. Mayer, and P. Vácha, Thermal-hydraulics and Decay Heat Removal in GFR ALLEGRO, 2017.
- [13] G. I. Orosz, S. Tóth and A. Aszódi, Simulations for L-STAR experimental gas-cooled system, *Kerntechnik*, 85(2020).
- [14] G. I. Orosz, S. Tóth and A. Aszódi, Detailed thermal modelling of the ALLEGRO ceramic assembly, *Nuclear Engineering and Design*, 376(2021).
- [15] G. I. Orosz and A. Aszódi, CFD modelling of mixing vane spacer grids for ALLEGRO relevant gas cooled reactor fuel geometry, *Annals of Nuclear Energy*, 164 (2021).
- [16] G. I. Orosz, B. Magyar, D. Szerbák, D. Kacz, and A. Aszódi, ALLEGRO Gas cooled Fast Reactor Rod Bundle investigations with CFD and PIV method, *Nuclear Engineering and Design*, 400(2022).