

Sóolvadékos reaktorkoncepció kísérleti vizsgálata

Yamaji Bogdán, Aszódi Attila

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Nukleáris Technikai Intézet
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 9. tel.: +36 1 463 2112

A BME NTI bekapcsolódott az Európai Unió 7. K+F keretprogramjának támogatásával zajló EVOL nemzetközi kutatási projektbe. Az ebben a projektben javasolt MSFR gyorsneutron-spektrumú sóolvadékos reaktorkoncepció jellemzője, hogy zónája nem tartalmaz csatornákat, vagy az áramlás irányítását szolgáló egyéb szerkezeteket, ezért az áramlás jellegének vizsgálata kiemelkedő fontosságú feladat. Az ilyen folyékony üzemanyagú rendszereknél kiemelt jelentősége van az üzemanyag-hűtőközeg áramlásának, hisz ez nem csak a hőelvitelt, de magát a hőfelszabadulást, az aktív zóna reaktorfizikai jellemzőit is meghatározza. Annak érdekében, hogy laboratóriumi körülmények között kísérletileg vizsgálni tudjuk a reaktorkoncepció termohidraulikai viselkedését, illetve hogy mérési eredményekkel validációs háttérrel biztosítsunk numerikus szimulációs (CFD) modellekhez az Intézetben rendelkezésre álló PIV mérőrendszer segítségével, megterveztük és felépítettük az MSFR koncepció kicsinyített és szegmentált modelljét. A mérések víz közeggel, hőfelszabadulás modellezése nélkül történtek. Cikkünkben a kísérleti berendezést mutatjuk be, és az eddig elvégzett mérések eredményeit foglaljuk össze, összehasonlítva azokat előzetes számítási eredményekkel.

Az MSFR koncepció

Az EVOL (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor Systems) programban meghatározott MSFR (Molten Salt Fast Reactor) koncepció egy egyterű, homogén aktív zónájú sóolvadékos reaktor [1]. Az áramló hűtőközeg és üzemanyag egy lítium-fluorid alapú közeg, ennek 22,5%-a (molszázalék) nehézfém-fluorid (urán vagy urán-tórium keverék). Az aktív zóna hengeres geometriájú, ehhez alul és felül elhelyezett tizenhat be- és kilépőcsonkkal csatlakoznak a sóolvadék kényszerített cirkulációját biztosító hűtőkörök. A koncepció szerint a reaktor zónája nem tartalmaz belső szerkezeti elemeket. A reaktor gyorsneutron-spektrumú, így szemben az MSRE kísérleti reaktorról [2], vagy a Generation IV International Forum által referenciaként megadott MSR sóolvadékos reaktorról [3] nem tartalmaz grafit szerkezeteket, így áramlási csatornákat sem.

Az MSFR koncepcióban a hengeres aktív zónában a sóolvadék alulról felfele áramlik, a magasabb hőmérsékletű közeg a zóna felső részén elhelyezett csonkokon lép ki a zónából (ld. az 1. ábrán). Az aktív zónán kívül szivattyúk közbülső hőcserélőkön keresztül a zóna alsó részén elhelyezett csonkokhoz juttatják az üzemanyag-hűtőközeget.

A reaktorkoncepció névleges hőteljesítménye 3000 MW, tervezett villamos teljesítménye 1500 MW. A névleges belépő hőmérséklet 650 °C, a névleges kilépő hőmérséklet 750 °C. Az MSFR koncepció fő paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

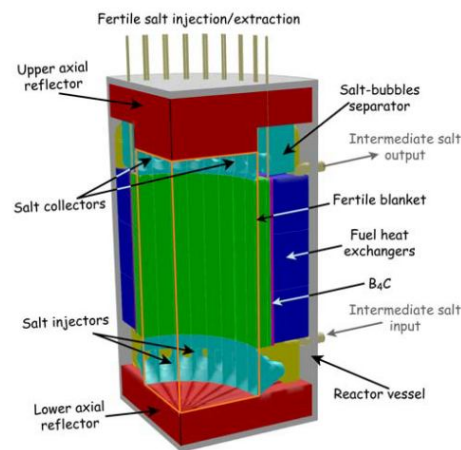
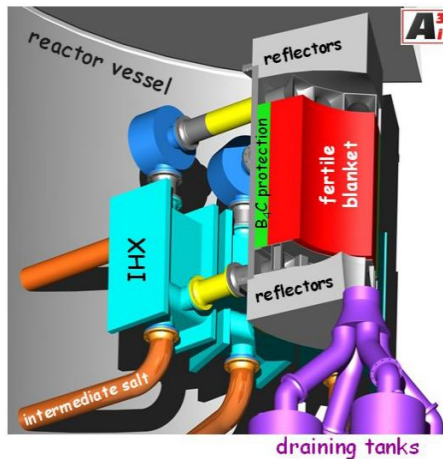
A reaktor tizenhat be- és kilépő csonkkal rendelkezik, ezek átmérője 300 mm. Minden egyes belépő és kilépő csonkpár egy szivattyún keresztül kapcsolódik egy közbenső hőcserélő egységhez. A közbenső hőcserélőkben a szekunder hűtőközeg sóolvadék, hasadóanyag-tartalom nélkül. Az aktív

zónához alul csatlakoznak a leeresztő vezetékkel a leeresztő tartályok. Az aktív zónát alul és felül reflektor veszi körül, a zóna kerületén pedig tenyészköpeny és szintén reflektor helyezkedik el.

1. táblázat Az MSFR sóolvadékos reaktor paraméterei [1]

Hőteljesítmény [MW]	3000
Villamos teljesítmény [MW]	1500
Kezdeti sóolvadék összetétel [mol%]	77,5% LiF – 22,5% (U/Th/Pu)F ₄
Belépő hőmérséklet [°C]	650
Kilépő hőmérséklet [°C]	750
Zóna átmérő [m]	2,255
Zóna magasság [m]	2,255

Az MSFR sóolvadék lítium-fluorid alapú, 22,5% (mol%) arányban tartalmaz aktinida-fluoridot. Ez utóbbi a különböző elképzelések szerint tóriumot és uránt, vagy tóriumot és egyéb aktinidákat tartalmaz. A termohidraulikai elemzések szempontjából fontos fizikai jellemzőket a 77,5% LiF – 22,5% ThF₄ esetére a 2. táblázat tartalmazza. A számításokhoz és a CFD szimulációkhoz ezeket az összefüggéseket és értékeket használtuk.



1. ábra: Az MSFR koncepció geometriája [1] – Hengeres zóna, ki- és belépő csonkok, axiális és radiális reflektorok, tenyészköpeny, gázszeparátor, keringető szivattyú és közbelső hőcserélők

2. táblázat Az MSFR-ben alkalmazott 77,5% LiF – 22,5% ThF₄ fizikai jellemzői [1]

	függvény	érték 700 °C-on
sűrűség [g/cm ³]	$4,094-8,82E-04 \times (T[K]-1008)$	4,1249
kinematikai viszkozitás [m ² /s]	$5,54E-08 \times \exp(3689/T[K])$	2,46E-06
dinamikai viszkozitás [kg/ms]	$\text{sűrűség} \times 5,54E-08 \times \exp(3689/T[K])$	1,01E-02
hővezetési tényező [W/mK]	$0,928 + 8,397E-05 \times T[K]$	1,0097
fajhő [J/kgK]	$(-1,111 + 0,00278 \times T[K]) \times 1E+03$	1594

3. táblázat Az MSFR koncepció névleges hidraulikai jellemzői

hőmérséklet [°C]	700
zóna teljesítmény, Q [W]	3E+09
hőmérséklet-különbség, ΔT [°C]	100
zóna tömegáram, $m=Q/(c \times \Delta T)$ [kg/s]	$3E+09 / (1594 \times 100) = 18\ 820$
1 belépő csonk forgalom, $m/16$, [kg/s]	$18\ 820 / 16 = 1176,33$
zóna átmérő, D [m]	2,255
zóna keresztmetszet, A [m ²]	3,994
zóna átlagsebesség, $v=m/(A \times \rho)$, [m/s]	1,167
Reynolds-szám zóna, névleges = $v \times D / \nu$	1,05E+06
belépőcsonk átlagsebesség, v_{be} [m/s]	4,03
Reynolds-szám belépőcsonk, névleges = $v_{be} \times D_{be} / \nu$	4,93E+05

A hőteljesítmény és hőmérséklet-különbség segítségével, valamint az anyagjellemzőkkel meghatározható a zónaforgalom, ennek ismeretében pedig a névleges üzemállapothoz tartozó csonkonkénti üzemanyag-hűtőközeg forgalom. Ezekből meghatározható az átlagos üzemanyag-hűtőközeg sebesség a zónában, valamint a zónaátmérővel, mint jellemző mérettel számolt Reynolds-szám. Az erre vonatkozó számítást tartalmazza a 3. táblázat. Eszerint névleges állapot esetén az aktív zónában az áramlás erősen turbulens, a Reynolds-szám meghaladja az 1000000-t. Ennek az az oka, hogy viszonylag magas az áramlási sebesség a zónában, mert annak a termikus teljesítményhez képest nem túl nagy a térfogata. Összehasonlításképpen az orosz MOSART koncepciónál [4], amely szintén egy hengeres geometriájú, homogén egyterű reaktor, a hasonló paramétereiből 0,5 m/s átlagos zónán belüli sebesség jön ki, a Reynolds-szám pedig 500 000 körül.

A kísérleti modellezés lehetőségei

A kísérlet megtervezésével a cél az volt, hogy laboratóriumi körülmények között Particle Image Velocimetry (PIV) mérés technika [5] segítségével kísérletileg vizsgáljuk az MSFR koncepció aktív zónájában az áramlást. A méréseket a BME NTI-ben telepített PIV mérőrendszerrel [6], szobahőmérsékletű víz munkaközeggel terveztük elvégezni. A megvalósításhoz szükséges volt a geometria skálázása, valamint a további méret- és szivattyúzási teljesítmény-igény csökkentéséhez a geometria szegmentálása. Tehát nem a teljes aktív zóna geometriát, hanem annak csak negyedét modelleztük. Korábbi elemzések megmutatták [7], hogy a névleges zóna Reynolds-számának tartásához rendkívül nagy tömegáram, azaz nagy szivattyúzási teljesítmény lenne szükséges, és a víz hőmérsékletének emelése (pl. 80°C-ra) is csak mintegy harmadára csökkentené a szükséges térfogatáramot, miközben egy ilyen rendszer hőmérsékletének stabilan tartása túlzott műszaki ráfordítást igényelne. A geometriai skálázás mellett az áramlási sebesség csökkentése is megengedhető korlátozott mértékben. Így ugyan nem reprodukáljuk a valós Reynolds-számot, de amennyiben azt 1-2×10⁴ felett tartjuk, akkor az még teljesen turbulensnek tekinthető [8]. Emellett bevett gyakorlat, hogy a vizsgált áramlási tartományra vonatkozó Reynolds-számot nem reprodukálják a skálázott kísérletek, mert arra egy laboratóriumi kísérletben nincs lehetőség. A német ROCOM berendezés a Konvoi reaktortípus pleximodellje [9]. A Vattenfall kísérleti berendezése egy háromhurkos Westinghouse nyomottvízes reaktor

plexi modellje, a Hidropress acélból készült tesztberendezése pedig egy VVER-1000 modell [10]. Mindhárom 1:5 arányú kicsinyített modell víz munka-közeggel, a Vattenfall modell a Reynolds-szám emelése érdekében 53,6°C hőmérséklet vízzel [11], míg a másik kettő 20°C körüli hőmérsékletű vízzel üzemel. Ezeknél a kísérleti berendezéseknél a reaktortartályon belüli tartományban a Reynolds-szám 10^5 nagyságrendű, mely érték két nagyságrenddel kisebb, mint a valódi energetikai reaktorok belépőcsónkjainál vagy a leszálló gyűrűs aknában kialakuló Reynolds-szám (kb. 10^7). Mindhárom kísérleti modell célja, hogy a primer körben és a reaktortartályban lejátszódó keveredési folyamatokat vizsgálják, illetve mérési eredményeket biztosítsanak CFD modellek validációjához.

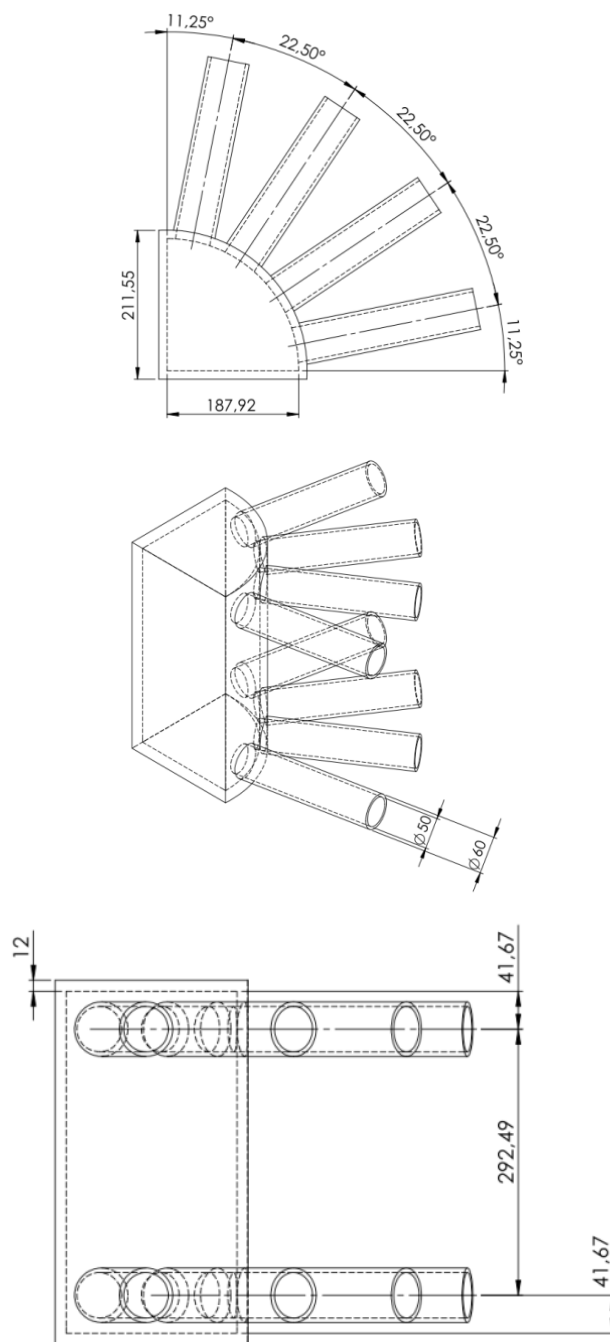
Az oak-ridge-i Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) kísérleti programban a kísérleti sóolvadékos reaktor tervezésekor két vízzel működő modellt építettek, az egyik 1:5 arányú kicsinyített plexi modell volt 35°C hőmérsékletű vízzel, míg a második 1:1 léptékű acél modell volt műanyag betekintő ablakokkal, szintén víz közeggel. A berendezések célja az áramlási viszonyok vizsgálata volt a reaktortartály belépőcsónk zónájánál és a leszálló gyűrűs aknában, valamint az alsó keverőtérben [12]. A fém kísérleti modellben a Reynolds-számot nem tudták reprodukálni, de az elegendően magas volt ahhoz, hogy az áramlás a turbulens tartományban legyen [13]. Meg kell jegyezni, hogy az MSRE reaktor egy grafit moderátoros reaktor volt, az aktív zónában a sóolvadék a grafit tömbökbe mart függőleges csatornában áramlott felfelé, így a zónán belüli viszonyok szempontjából ez alapvetően különbözött az MSFR koncepciótól.

A fenti megfontolások és az említett példák mind azt mutatják – együtt a korábban elvégzett CFD számításokkal [7] – hogy lehetséges, és a probléma vizsgálata szempontjából elfogadható a geometriai skálázás azzal együtt, hogy a Reynolds-szám egzakt reprodukciója nem lehetséges, de azt megfelelően magas értéken tartjuk, így az áramlás jellege a kísérletben hasonló lesz az energetikai léptékű MSFR berendezésben várhatóval. A hivatkozott számítások azt is igazolták, hogy az áramlási tartomány vizsgálatához elegendő a zónageometria negyedének modellezése, mert abban a falaknál és a falak csatlakozásainál – értelemszerűen – a valóságos 360°-os geometriában kialakulóhoz képest eltérő áramlás alakul ki, de ez az eltérés egy szűk, fal melletti tartományra korlátozódik. A vizsgált áramlási tér zömére a kapott eredmények reprezentatívnak lesznek tekinthetőek.

Az MSFR kísérleti modellje

A geometriai skálázásnál 1:6 méretarány lett választva, ez megfelel a $d=0,05$ m modell belépőcsónk belső átmérőnek. Ez a belső csőátmérő egyben sztenderd méret réz- és plexi-csövek esetén. A tervezett és elkészült modelltartály és annak méretei a 2. ábrán láthatók.

A plexi modelltartály levehető fedőlappal rendelkezik, illetve ezen keresztül csatlakozik egy kiegyenlítő tartályhoz. A fedőlapp eltávolításával megoldható feltöltött tartályban a kalibráció, illetve hozzáférés biztosítható a tartály tisztításához, egyben ez az oldal a bevilágító ablak a PIV berendezés lézere számára. A tervezett névleges állapotban a csónkonkénti térfogatáram $10 \text{ m}^3/\text{h}$, ez $Re_{zóna}=1,5 \times 10^5$ hengeres zónára vonatkozó Reynolds-számnak felel meg 20°C hőmérsékletű vízzel. A kialakított hurkokkal ennél kisebb és nagyobb forgalmak is előállíthatók.



2. ábra: A modelltartály méretei, a plexitartály karimákkal

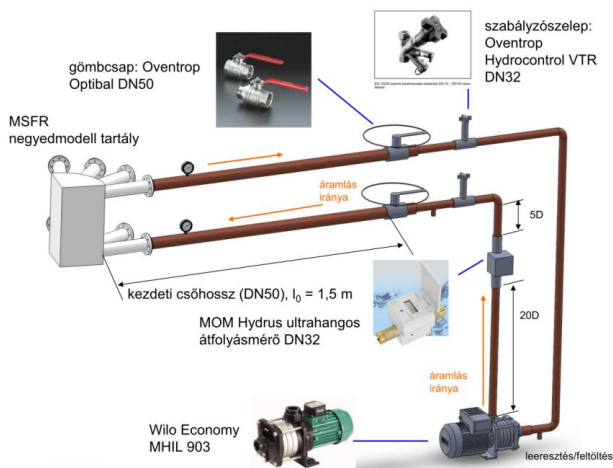
Ahhoz, hogy a belépőcsövekben teljesen kialakult turbulens áramlás legyen, az alábbi képlet [14] szerint meghatározható minimális belépő csőhossz szükséges:

$$l_0/d = 4,4 \times Re_{be}^{1/6} \quad (1)$$

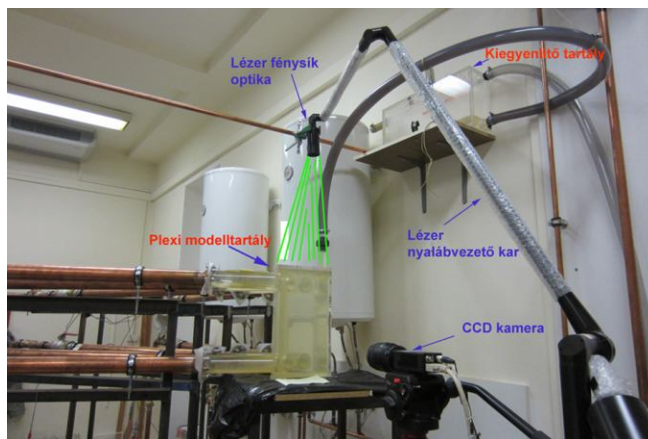
ahol l_0 minimális belépő csőhossz, d a cső belső átmérője, a Re_{be} a csőre vonatkozó Reynolds-szám. A $10 \text{ m}^3/\text{h}$ belépő térfogatáram figyelembe vételével $Re_{be} = 7,05E+04$ és $l_0 = 28,248$, tehát $l_0/d = 30$ esetén az áramlás kialakult lesz. Ebből az arányból $l_0 = 1,5 \text{ m}$ adódik. Mindenképpen szükséges, hogy hidraulikailag teljesen kialakult áramlás legyen a belépéseknél, amennyiben a mérési eredményeket CFD modellek validációjához akarjuk felhasználni.

Az alkalmazott PIV mérőrendszer a következő elemekből áll: Nyomjelzőként $50 \mu\text{m}$ átmérőjű poliamid szemcséket alkalmazunk, a megvilágító lézer egy Nd:YAG duál impulzslézer (maximális energia: 135 mJ, hullámhossz: 532 nm, impulzushossz: $\sim 6 \text{ ns}$), ehhez nyalábvezető kar és nyalábformáló optika csatlakozik. A szemcséken szórt fényt 2 MP felbontású digitális kamera rögzíti, a lézer és a kamera szinkronizálását, a rögzített képpárok alapján a vektormező adaptív korrelációs eljárással történő kiszámítását [5] személyi számítógép végzi a Dantec DynamicStudio szoftverével [15].

A modelltartályhoz csatlakozó hurok további részei a következő szempontok szerint lettek kialakítva: Olyan szivattyúra volt szükség, amely képes a kívánt térfogatáramot biztosítani, figyelembe véve egy hurok áramlási ellenállását, valamint áramellátása a 230 V feszültségű hálózatról megoldható. Hogy minél kisebb legyen a hurok nyomásesése, a MOM Hydrus (DN32) ultrahangos átfolyásmérőt választottuk, melynek nyomásesése 0,35 bar $10 \text{ m}^3/\text{h}$ átfolyásnál [16]. Egy hurokban a belépő és a kilépő ágon is van egy-egy izolációs gömbcsap, illetve egy-egy szabályozószelep. Előbbiek a feltöltött tartály izolációját teszik lehetővé (pl. kalibrációhoz), utóbbiak a kívánt hurokonkénti forgalmak beállítását biztosítják. A kiválasztott szivattyú a Wilo Economy MHIL 903 típus, ez 26 m emelő-magasság mellett tud biztosítani $10 \text{ m}^3/\text{h}$ térfogatáramot. A szivattyú nyomóoldalán, a függőleges vezeték szakaszon az átfolyásmérő előtt 20D, utána 5D egyenes szakasz került kialakításra az átfolyásmérő optimális működése érdekében. A hurok karimás rögzítéssel csatlakoznak a modelltartályhoz. Egy hurok háromdimenziós modellje és a mérési összeállítás a 3. és 4. ábrán látható.



3. ábra: A modelltartályhoz csatlakozó hurok kialakítása és részei (kiegyenlítő tartály nélkül)

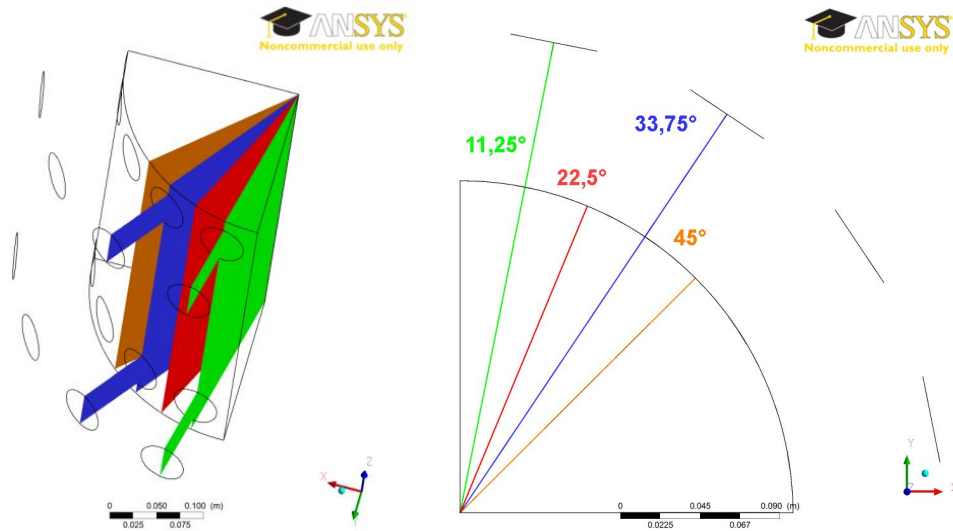


4. ábra: A kísérleti modell és a PIV mérőrendszer a BME NTI laborjában

Mérési eredmények

A kétdimenziós PIV mérések számára az áramlási tartományban négy kiemelt mérési síkot határoztunk meg. Ezek a két szélső csonkpár csonkjainak középvonalai által meghatározott függőleges síkok (zöld - $11,25^\circ$, kék - $33,75^\circ$), illetve három szomszédos csonkpár közötti szimmetriasíkok (vörös - $22,5^\circ$, narancs - 45°), ezek az 5. ábrán láthatóak. A síkokhoz rendelt szögértékek a síkok és a PIV kamera számára betekintő ablakként funkcionáló függőleges oldal által bezárt szögek.

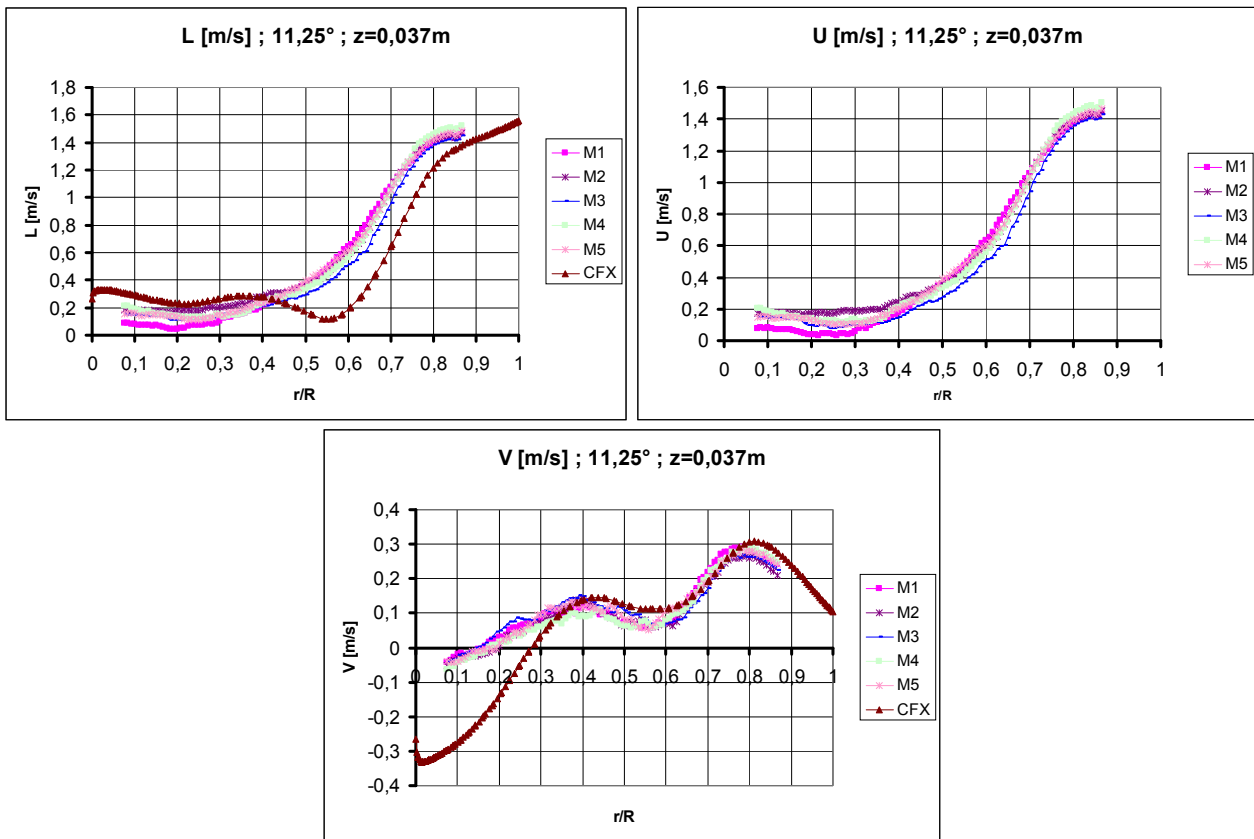
Ezekben a síkokban megfelelő (szimmetrikus) forgalmak beállításakor a síkokra merőleges áramlási sebességkomponens jóval kisebb lesz a síkba eső komponenseknél, így ezekben a síkokban az áramlást közelítőleg kétdimenziósnak tekinthetjük. Az MSFR viselkedésének vizsgálatához természetesen a két belső sík ad jobb eredményeket, ezek távolabb vannak a két függőleges határoló faltól. A PIV kamera merőleges a függőleges betekintő oldalra, így a kamera érzékelője párhuzamos lesz azzal. Az érzékelő és a mérési síkok közötti szögeltérés korrekcióját egy dedikált kalibrációs céltárggyal lehet elvégezni, ezt *de-warping*-nak hívja a szakirodalom. Ezt a „visszatorzítást” az összes mérési síkra el kell végezni, mellyel egyben a metrikus kalibrációt is elvégezzük. A pontos pixelérték-metrikus érték összefüggés meghatározásához harmadfokú XYZ polinomiális transzformációs módszert alkalmaztuk [15].



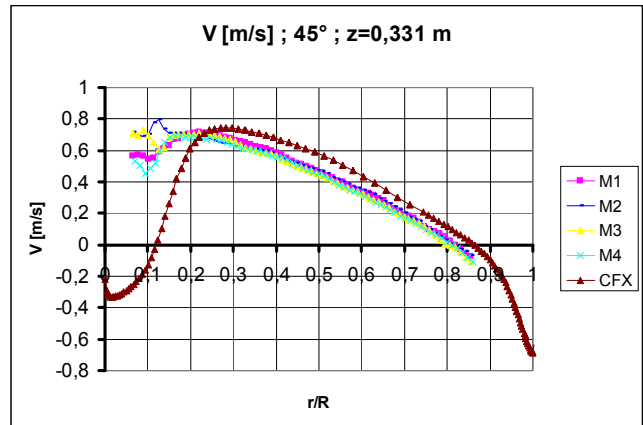
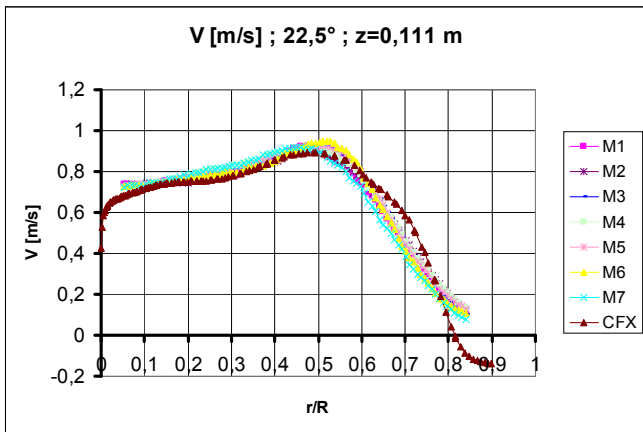
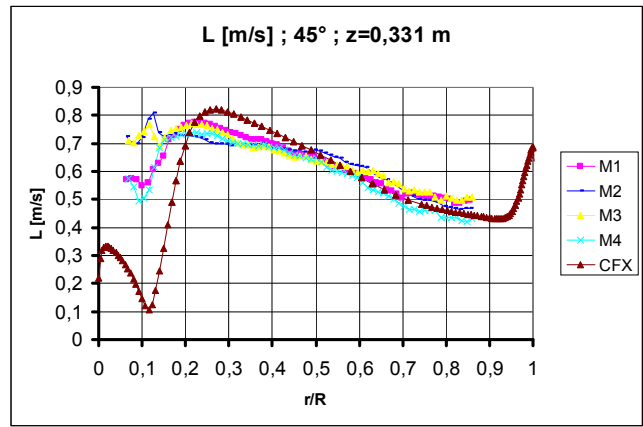
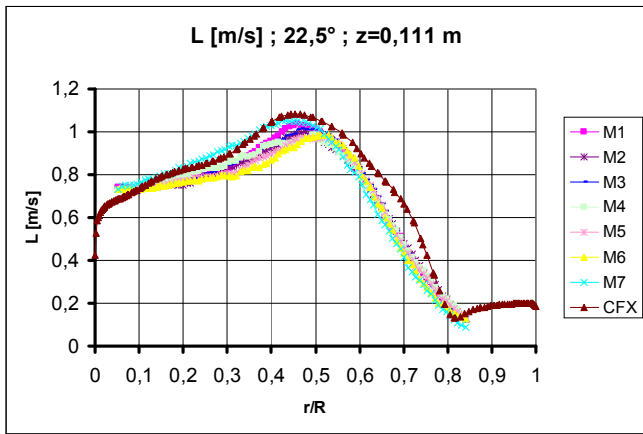
5. ábra: A modelltartályban kijelölt mérési síkok elhelyezkedése

A turbulens stacionárius állapotok mérése négyszáz képpár 15 Hz frekvenciával történő rögzítésével történt, ebből az első tizenöt képpárt elhagytuk a lézer teljesítményének felfutása miatt. A fennmaradó 385 db képpárból előállítható 385 db pillanatnyi értéket mutató vektormező. A vektormező átlagolásával kapjuk a végeredményt, mely az adott mérési sík detektált területére kapott sebességmező. A korábbi mérések megmutatták [7], hogy az alkalmazott hurokforgalomhoz ($q=2,7\text{ l/s}$) és szemcsesűrűséghez $\Delta t = 250\ \mu\text{s}$ késleltetés és $\Delta x = 32$ pixel interrogációs terület oldalhossz megfelelő. A négy mérési síkban a tartály teljes magasságában többször megismételve megmértük egyenletes belépő forgalom mellett a sebességeloszlást, alább az így kapott eredményekből mutatunk kiválasztott példákat.

A 6-9. ábrán az így kapott átlagolt sebességmezőkből származó, a sebességvektor abszolút értékének (hosszának - L) és függőleges komponensének (V) radiális eloszlása látható különböző magasságokon. A 6. ábrán szerepel a radiális sebességkomponens (U) is. Az ábrákon az M jelű görbék az azonos esetre vonatkozó különböző méréseket jelölik, míg a CFX jelű görbék az adott eset CFX szimulációjából származó eredményt mutatják. A grafikonokon az $r/R=1$ érték a modelltartály hengerpalástját jelöli, azaz itt vannak a csanakcsatlakozások, az $r/R=0$ érték a tartály negyed körívkik vízszintes metszete derékszögű sarkának radiális helykoordinátája.

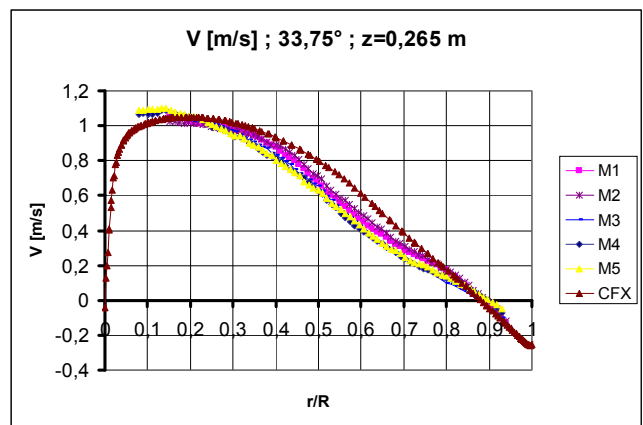
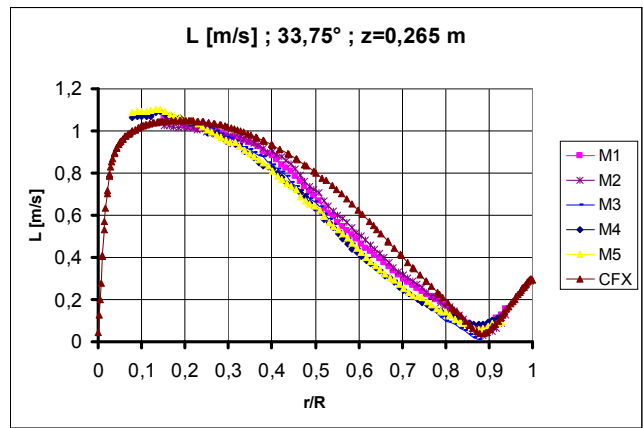


6. ábra: Radiális sebesség abszolút érték (L) és sebességkomponens (U, V) eloszlások, $11,25^\circ$, $z = 0,037\text{ m}$



7. ábra: Radiális sebesség abszolút érték (L) és függőleges sebességkomponens (V) eloszlások, 22,5°, z = 0,111 m

9. ábra: Radiális sebesség abszolút érték (L) és függőleges sebességkomponens (V) eloszlások, 45°, z = 0,331 m



8. ábra: Radiális sebesség abszolút érték (L) és függőleges sebességkomponens (V) eloszlások, 33,75°, z = 0,265 m

A 6-9. ábra jól szemlélteti, hogy a rendszer a tervezettnél megfelelően üzemeltethető, az egyes mérések reprodukálhatók, a kapott értékek a vártnak megfelelőek. A kapott mért sebességeloszlások a fizikai képnek megfelelnek. A 6. ábra eloszlásai a $z=0,037$ m magassághoz tartoznak, ez a magasság közel esik a belépőcsonkok középvonalának magasságához ($z=0,0416$ m), de az alatt helyezkedik el. Ennek megfelelően itt a sebességet (L) a radiális komponens (U) határozza meg a vízszintes beáramlásnak megfelelően, és az $r/R=1$ felé éri el a maximumot, $r/R=0$ közelében pedig negatív értékeket is felvesz, azaz a saroknál lefelé áramlás is kialakul. Magasabban ez az eloszlás megfordul, a függőleges falak által meghatározott sarokban egyértelmű a felfelé áramlás, míg a beömlőcsonkok feletti részben a palástonál kapunk lefelé áramlást (ld. 7. és 8. ábra). A 9. ábrán a kiömlőcsonkok középvonalának magasságában felvett vonal mentén kapott eloszlások láthatók, két belső csont közé eső síkban (45°). A négy ábrán szerepel az előzetes háromdimenziós CFD számítások eredménye is összehasonlításként. Ezek jó egyezéssel visszaadják nem csak a sebességértékek nagyságát, de a maximumhelyeket is, illetve azokat a pontokat, ahol például a függőleges komponens irányt vált. Az ANSYS CFX 14.5 kóddal végzett számítások modelljében hexaéderez térfigogi hálót alkalmaztunk, a stationárius számításokhoz a $k-\epsilon$ turbulencia modellt használtuk. A modell részletes ismertetése itt terjedelmi korlátok miatt nem lehetséges, azt egy következő, a CFX modellek részletes vizsgálatát tárgyaló cikkben fogjuk bemutatni.

Összefoglalás

Az MSFR sóolvadékos reaktorkoncepció alapján megterveztük és felépítettük annak kicsinyített, szegmentált kísérleti hidraulikai modelljét. A kísérleti modellen végzett sikeres PIV mérésekkel adott üzemállapothoz meghatároztuk a sebességmezőt a modelltartály teljes magassága mentén. A többször megismételt mérések igazolták a rendszer használhatóságát, illetve azt, hogy a mérések megismétel-

hetőek, az eredmények reprodukálhatóak. A rendszer a tervezett üzemállapotban üzemeltethető, a névlegesnél ($q=10\text{ m}^3/\text{h}$) kisebb és nagyobb hurok térfogatáramok is beállíthatók. A korábbi tapasztalatok alapján sikerült meghatározni a szükséges mérési paramétereket (pl. lézer felvillanás késleltetési idő, adatgyűjtési frekvencia stb.). Előzetes CFX számításokat végeztünk az elvégzett mérések reprodukálásának céljából, a számítási eredmények nagyon jól egyeznek a mért adatokkal.

Köszönetnyilvánítás

Ez a munka az Európai Atomenergia Közösség (EURATOM) 7. kutatás-fejlesztési keretprogramja által támogatott EVOL projekt (támogatási megállapodás száma: 249696 EVOL) keretében készült. A projekthez kiegészítő finanszírozást nyújtott a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség az Új Széchenyi Terv EU_BONUS_12 programja keretében (szerződés száma: EU_BONUS_12-1-2012-0003).

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚSZT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatta.

Irodalomjegyzék

- [1] *MOLTEN SALT FAST REACTOR Reference configuration – 15th of March, 2012, EVOL - Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System, EU 7th Framework Programme*
- [2] *MSRE (1962); Directory of Nuclear Reactors Vol. V. Research, Test and Experimental Reactors; IAEA, Vienna, 1964, STI/PUB/73 (1964)*
- [3] *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, Issued by the U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (2002)*
- [4] *Ignatiev V., et al, Calculation of safety related parameters for Na,Li,Be/F MOSART concept (2007)*
- [5] *M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans: Particle Image Velocimetry - A practical guide, Springer, Berlin, Germany, 2007*
- [6] *Bogdán Yamaji, Rita Szijártó, Attila Aszódi: Investigation of Mixing and Thermal Stratification with PIV, Proceedings of the 8th International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-8), October 10-14, 2010, Shanghai, China, N8P0302*
- [7] *Bogdán Yamaji, Attila Aszódi, Máté Kovács, Gyula Csom: Thermal-hydraulic analyses and experimental modelling of MSFR, Annals of Nuclear Energy, 2014, Volume 64, pp. 457-471*
- [8] *P. E. Dimotakis: The mixing transition in turbulent flows, Journal of Fluid Mechanics, 2000, 409, pp. 69-98*
- [9] *T. Höhne, S. Kliem, U. Bieder: Modeling of a buoyancy-driven flow experiment at the ROCOM test facility using the CFD codes CFX-5 and Trio U, Nuclear Engineering and Design, 2006, 236, pp. 1309-1325*
- [10] *S. Kliem et al: Comparative Evaluation of Coolant Mixing Experiments at the ROCOM, Vattenfall, and Hidropress Test Facilities, Science and Technology of Nuclear Installations, 2007, Volume 2007, Article ID 25950, Hindawi*
- [11] *T. V. Dury, B. Hemström, V. Shepel: CFD Simulation of the Vattenfall 1/5th-Scale PWR Model for Boron Dilution Studies, Benchmarking of CFD Codes for Application to Nuclear Reactor Safety (CFD4NRS) Workshop Proceedings, Garching (Munich), Germany, 5-7 September 2006 OECD NEA, 2006*
- [12] *R. J. Kedl: Fluid Dynamic Studies of the Molten-Salt Reactor Experiment (MSRE) Core, ORNL-TM-3229, Oak Ridge National Laboratory, 1970*
- [13] *R. B. Briggs: Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report For Period Ending February, 28, 1962, ORNL-3282, Oak Ridge National Laboratory, 1962*
- [14] *Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, 2004, p. 415, Műegyetemi Kiadó, Budapest, ISBN 963-420-798-7*
- [15] *DynamicStudio – User's Guide, pp. 306, 319, Dantec Dynamics, 2012*
- [16] *Diehl Metering – Hydrus ultrasonic meter, user manual, 02.05.2012*