

# Lézeroptikai mérés technikák alkalmazása VVER fűtőelem-kazetta áramlási viszonyainak vizsgálatához

*Tar Dániel, Baranyai Gábor, Ézsöl György, Tóth Iván*

MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet, Termohidraulikai Laboratórium  
1252 Budapest Pf. 49, tel.: +36 1 392 2222/1307

*A kísérletek célja a hűtőközeg keveredésének tanulmányozása fűtőelem-kazetta maketten, és az eredmények computational fluid dynamics (CFD) szimulációkkal való összehasonlítása. Particle image velocimetry (PIV) mérés technikát alkalmaztunk a sebesség, laser induced fluorescence (LIF) technikát pedig a hőmérséklet mezők meghatározására. A már meglévő, eredeti alkatrészeket is tartalmazó VVER-440/213 munkakazetta 1:1 léptékű modelljének fűtőelem pálcái közül 36-ot elektromosan fűthetővé tettük, így extrém és egyenletes teljesítmény-eloszlásokat is beállítottunk. Lehetővé tettük a radiális irányú (vízszintes) síkokban való sebességmérést, melynek során a hűtőközeg csóva áramlási irányú tengely körüli forgását vizsgáltuk. Megismételhetőségi vizsgálatot végeztünk sebességprofilok ismételt mérése útján. A hőmérséklet eloszlás felvételek bizonytalanságának csökkentése érdekében további kísérletek szükségesek.*

## Bevezetés

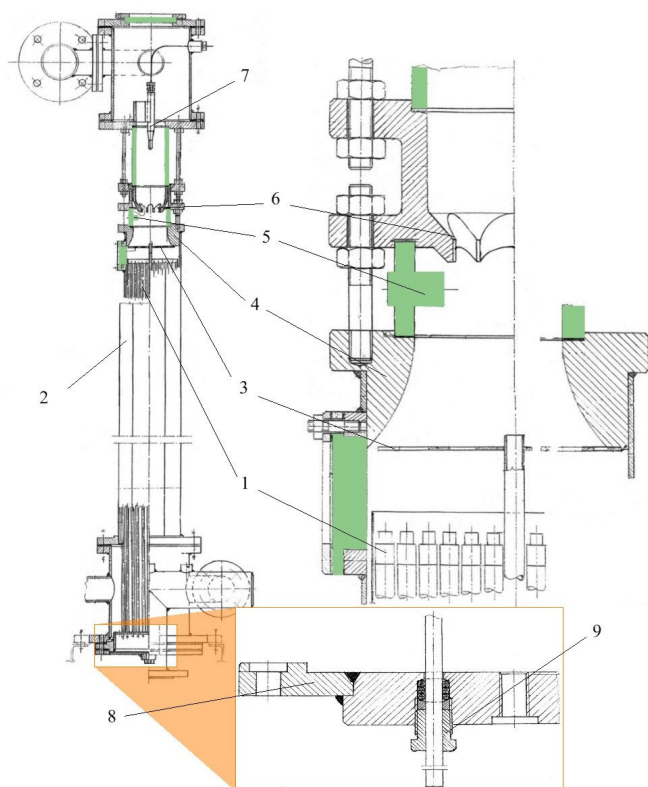
A cikkben paksi VVER fűtőelem-kazetta modellben a hűtőközeg áramlási viszonyainak lézeroptikai mérés technikák segítségével történő kísérleteiről számolunk be. A Paksi Atomerőműben a hőteljesítmény-növelés megvalósítása új típusú profilírozott üzemanyag kazetták segítségével lehetséges. Az előzetes vizsgálatok kimutatták, hogy a biztonsági tartalékok megfelelő szinten tartása miatt az aktív zóna egyenlőtlenségi limitjeit és egyéb keretparamétereket változatlanul kell tartani, így az emelt hőteljesítmény miatt a töltet tervezés szigorúbb peremfeltételek mellett lesz megvalósítható. Nem kizárható, hogy bizonyos üzemi szituációkban, kampány állapotokban a névleges teljesítmény nem lesz elérhető. Ennek egyik oka az, hogy a teljesítményt jelentősen korlátozó mennyiség, a szubcsatorna számított kilépő hőmérsékletének meghatározása konzervatívan, keveredés figyelembe vétele nélkül történik.

A kísérletek végső célja a hűtőközeg keveredésének tanulmányozása a megépített fűtőelem-kazetta maketten mért kétdimenziós sebesség és hőmérséklet eloszlások alapján, és az eredmények computational fluid dynamics (CFD) szimulációs számításokkal való összehasonlítása. Particle image velocimetry (PIV) mérés technikát alkalmaztunk a sebesség, laser induced fluorescence (LIF) technikát pedig a sebességmezők meghatározására.

Korábban, a kísérletsorozat első részeként a megépített fűtőelem-kazetta modell kilépőcsatorna részében sebességmező méréseket végeztünk PIV technikával [1-2]. A VVER-440/213 munkakazetta 1:1 léptékű kazettamodell fűtőelem pálcái közül 36-ot elektromosan fűthetővé tettük, valamint a berendezést kiegészítettük egy hűtőközzel. A fűthető pálcák adott konfiguráció szerinti ki- és bekapcsolásával extrém, és az erőművi üzemi állapothoz hasonló, egyenletes teljesítmény-eloszlásokat is beállítottunk. Az axiális irányú (függőleges) síkokban történő mérések után lehetővé tettük a radiális irányú (vízszintes) síkokban való sebességmérést, melynek során a hűtőközeg csóva áramlási irányú tengely körüli forgását vizsgáltuk. Megismételhetőségi vizsgálatot is végeztünk a kazetta kilépő termoelem körüli áramlási csatornarész függőleges síkokban kapott sebességprofilok ismételt mérése útján.

## A fűthető munkakazetta-modell és a mérőkör

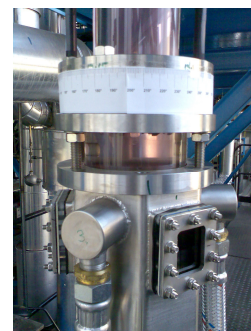
A továbbfejlesztett kazettamodell vázlatát az 1. ábra, a fejrész rajzát a 3. ábra mutatja (ezt az [1] cikkben már részletesen ismertettünk). A modell fenéklemeze módosult, melyen megjelent a 36 indirekt fűtésű pálca tömszelencés átvezetése (4. ábra). Ebben a cikkben a felső mérőablakon keresztül felvett sebességeloszlást is ismertettünk (2. és 15. ábra).



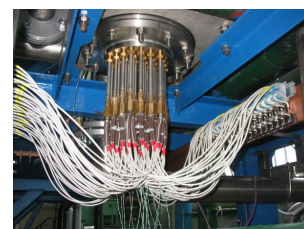
1. ábra: A kazettamodell vázlatos rajza; fűtőelemrudak (1), hatszögös burkolat (2), keverőrács (3), a hatszögös áramlási csatorna hengeresre változik (4), emelőcsapok (5), illesztőrózsa (6), termoelem (7), fenéklemez fűtési átvezetéssel (8), fűtőelem tömszelencés kivezetése (9)



2. ábra: A felső mérőablak



3. ábra: Kazettamodell fejrész



4. ábra: Tömszelencés kivezetés, fűtőpatronok

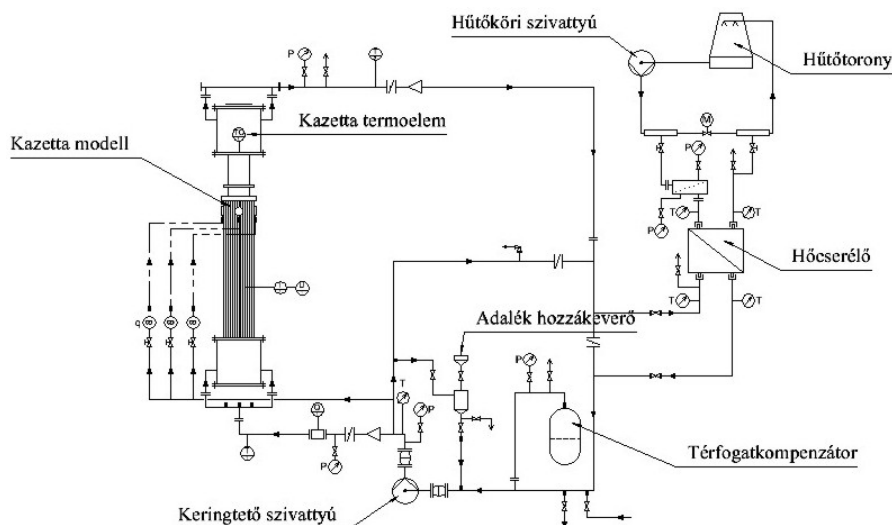
Az 1000 mm hosszú fűtőelem modell indirekt elektromosan fűtött szakasza 900 mm. Egy fűtőpatron maximális teljesítménye 2 kW, így a maximálisan elérhető összes teljesítmény 72 kW. (A mérések során azonban általában ennek csupán tört részét használtuk; az alább bemutatott T konfiguráció esetén 40 kW, P konfiguráció esetén 20 kW volt az összteljesítmény). A mintegy 30 kW teljesítményű keringtető szivattyú működéséből és a fűtőelemek fűtéséből adódó hőteljesítmény elvezetésére egy részáramú hűtőkör került beépítésre (5. ábra). Az ellenáramba kötött víz-vizes hőcserélő meleg és hideg oldalán is mintegy 30 m<sup>3</sup>/h forgalomig lehet változtatni a víz mennyiségét szelepek segítségével. A hideg oldalt a PMK-2 kísérleti berendezés [3] tercier hűtőkörébe kötöttük be, annak keringtető szivattyúját használjuk, így a teljesítmény elvitelét a kör csepegtető tálcás hűtőtornyai biztosítják.

A kazetták közötti résáramokat – a korábbi kísérlettel azonos módon [1] – modelleztük, három by-pass ág beépítésével. A by-pass bevezetések közvetlenül a hatszögös csatorna felső részénél levő 120°-os szimmetriában elhelyezett mérőablakok fölött találhatók. A forgalom mérés mindegyik by-pass ágban egy vizóra segítségével lehetséges.

## PIV sebesség és LIF hőmérséklet eloszlás mérések

### Az alkalmazott lézeres mérés technikák összehasonlítása (LIF, PIV)

Korábbi tanulmányokban [1-2] ismertettük a teljes sebességeloszlás meghatározására alkalmazott PIV, és a teljes hőmérsékletmezők mérésére telepített LIF optikai mérőrendszereket. Most rövid összefoglalásként csak a két módszer hasonlóságait és különbségeit ismertetjük. A PIV mérés során az áramló közegbe mikrométerű (tipikusan 20 μm átmérőjű) fényszóró részecskéket *diszpergálunk*, míg a LIF mérések során fluoreszcencia festékanyagot (Rhodamine B) *oldunk* az áramló közegben. A PIV részecskék tökéletesen követik az áramló közeget, a LIF fluoreszcencia festékanyag homogén a közegben. A LIF mérésekhez 550 nm-es felüláteresztő szűrőt kell alkalmazni, a PIV mérésekhez 532 nm-es zöld szűrő alkalmazható. PIV mérések esetén csupán a sebesség abszolútértékek kiszámításához szükséges kalibráció (nagyítási faktor meghatározása). A LIF mérés feltétele a pixelenkénti intenzitás-hőmérséklet kalibráció. A fűtőelem-kazetta mérések során a szivattyú teljesítmény-beviteléből származó hőmérséklet-emelkedést használtuk a kalibrációhoz, mely során 1 °C-os lépéssel általában 8-10 pontra kalibráltunk.



5. ábra: A mérőszakasz elvi kapcsolási rajza

A mérőrendszer paramétereinek beállítása a korábbi jelentésekben leírtakhoz hasonlóan történt. Dupla-impulzusú lézert (NdYAG) és CCD kamerát (2 Mpixel, 8 bit) alkalmaztunk. A PIV mérésekhez a számítási részterületek mérete 32×32 pixel nagyságúra választottuk. A lézereenergia a maximum (50 mJ) 25%-a, a  $\Delta t$  100  $\mu s$  volt. Általában 500-1000 db, 4 Hz frekvenciával felvett pillanatfelvételtől számítottuk az időben átlagolt értékeket a PIV és a LIF méréseknél is.

**Mérési beállítások**

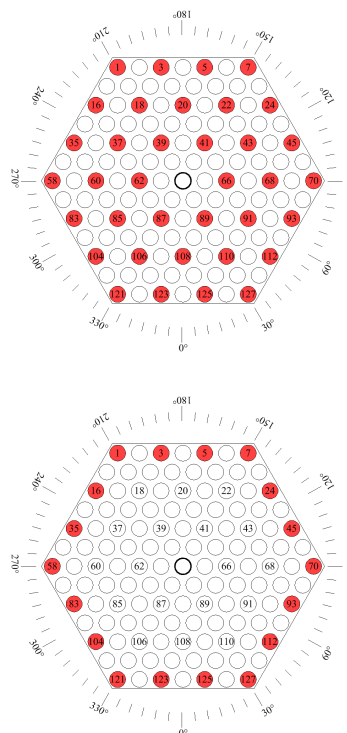
A méréseket az áramlási csatorna három axiális szintjén végeztük, a korábbi kísérletekkel összhangban (a beállítások szemléltetését lásd [1-2]), kettő ismertetésére ad lehetőséget e cikk terjedelme. Az 1. szint a fűtőelemek feletti tér, amelyet alulról a szubcsatorna kilépések, felülről pedig a keverőrács határol. A 2. szint a legfontosabb vizsgálati helyet jelentő kazetta termoelem előtti tér.

Összesen öt fűtési konfigurációval mértünk, melyből kettő ismertetésére ad lehetőséget a cikk terjedelme. A reaktorfizikai és termohidraulikai számításoknál alkalmazottan megfelelően sorszámoztuk a fűtőelemeket, és bejelöltük az indirekt fűtésű pálcák pozícióit (6. ábra). Az ábrán a számokat csak a fűthető rudak esetében tüntettük fel. (A 36 fűthető rúd szimmetrikusan helyezkedett el, így bármely fűthető rúd tetszőleges második szomszédja szintén fűthető.)

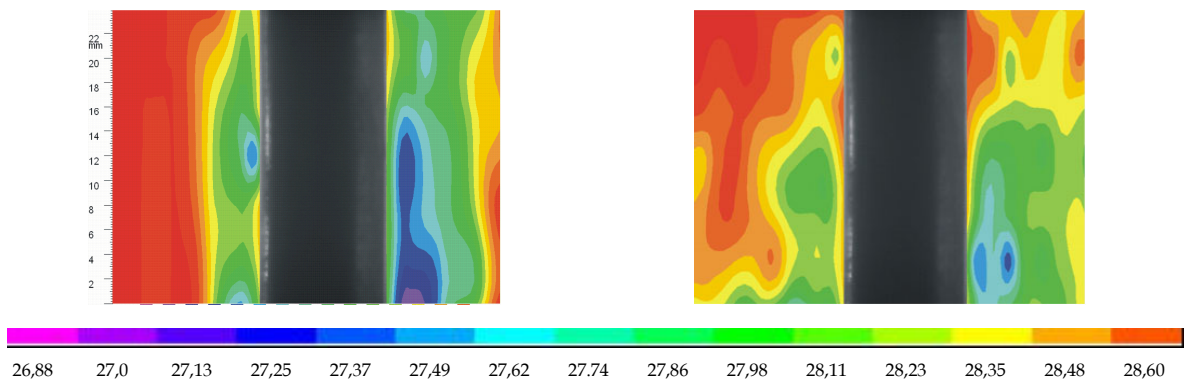
**Mérési eredmények**

Általános megállapítható, hogy kis térfogatáram (10 m<sup>3</sup>/h), egyenlőtlen fűtési konfiguráció valamint maximális részáram forgalom mellett kaptunk jól kiértékelhető eloszlásokat. A 7-10. ábrákon az 1. axiális szinten kapott eredmények láthatók. A hőmérséklet mező 10 m<sup>3</sup>/h forgalomnál a szubcsatornának hatását tükrözi, 30 m<sup>3</sup>/h-nál pedig minden bizonynal a keverőrács hatása is érvényesül. További bizonyításra lesz szükség azonban a 8. ábrán bemutatott

hőmérsékleteloszlás korrekt magyarázatához, amely szerint a felső régió a melegebb. Elképzelhető ugyanis, hogy a LIF mérés pontatlansága okoz látszólagos melegedést, mivel az adott mérési paraméterek mellett (forgalom, fűtőteljesítmény) a térbeli hőmérséklet felbontásának csökkenhet. A sebességeknél megfigyelhető a szubcsatornának hatása a relatíve nagy sebességű csóvák révén, ezek azonban kisebb forgalomnál szabálytalanabbak, ami az áramló hűtőközeg kisebb impulzusára utal.

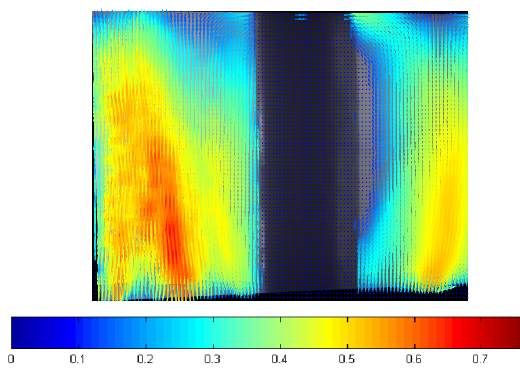


6. ábra: T és P fűtési konfigurációk (a fűtött rudak színes koronggal jelölve)

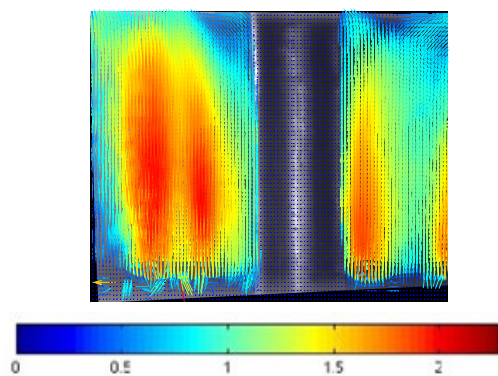


7. ábra: LIF hőmérséklet-eloszlás, °C, (1. szint, T, Q=10 m³/h)

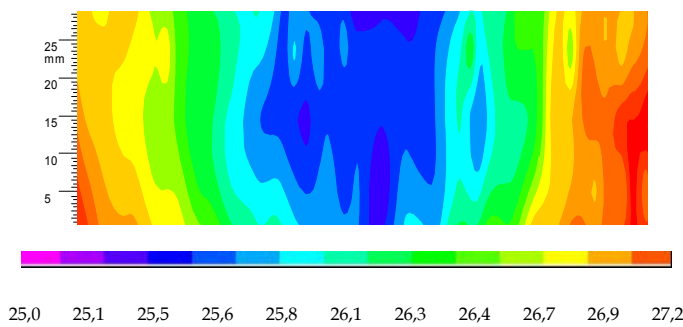
8. ábra: LIF hőmérséklet-eloszlás, °C, (1. szint, T, Q=30 m³/h)



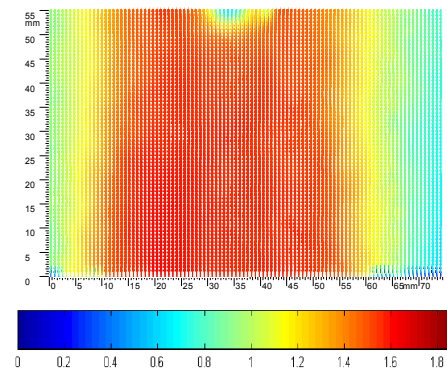
9. ábra: PIV sebességeloszlás, m/s, (1. szint, Q=30 m³/h)



10. ábra: PIV sebességeloszlás, m/s, (1. szint, Q=90 m³/h)



11. ábra: LIF hőmérséklet-eloszlás, °C, (2. szint, P, Q=10 m³/h)



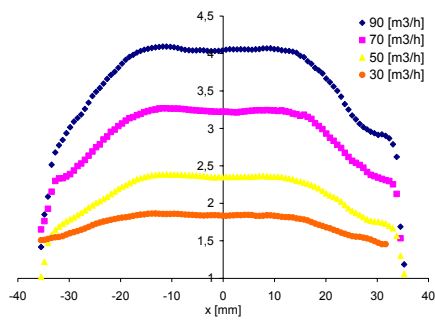
12. ábra: PIV sebességeloszlás, m/s, (2. szint, Q=30 m³/h)

A 2. axiális szinten a hőmérsékletben csak igen egyenlőtlen (pl. az ismertetett P) fűtési konfiguráció és kis térfogatáram (10 m³/h) esetén kaptunk jól kiértékelhető eloszlást (11. ábra), más esetekben közel homogén hőmérsékleti kép adódott.

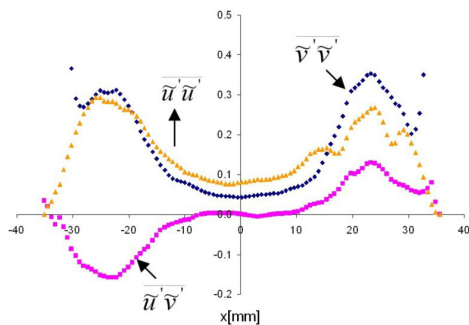
A sebességek esetén (korábbi kísérleteinkkel összhangban) a hengeres kilépőcsatorna szakaszában már kisebb térfogatáram esetén sem fedezhető fel a szubcsatornák hatása (12. ábra), a turbulens profilok minden forgalom esetén hasonlóak (13. ábra). Azonban az időátlagolt sebes-

ségprofilok, és stressz tagok is aszimmetrikusak (14. ábra), ami a turbulens áramlásra ható tényezőkre utal (keverőrács, emelőcsapok, illesztőrózsa). A 11-12. ábrák nem ugyanakkora mérési tartományt ábrázolnak, a LIF-fel vizsgált tartomány 30 mm magas, míg a PIV-es 55 mm. A 0 mm-hez tartozó relatív axiális szinthez kell viszonyítani a távolságot, tehát a LIF mérés felső része kb. 25 mm-rel a termoelem alatt van.



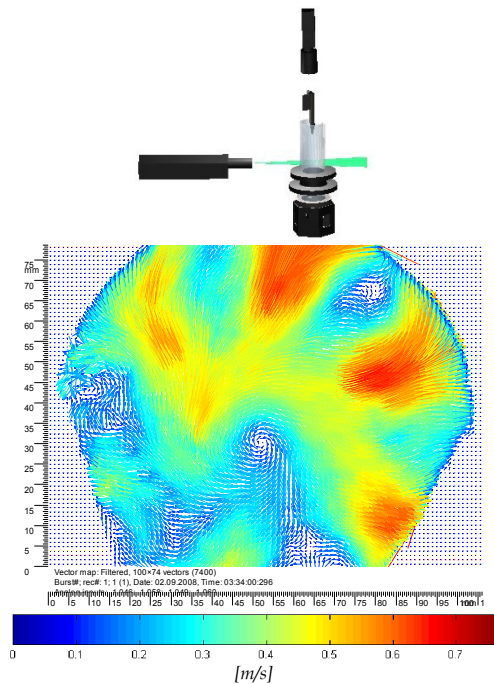


13. ábra: Axiális sebességprofilok időátlagai és szórása 90, 70, 50 és 30 m<sup>3</sup>/h esetén [m/s]

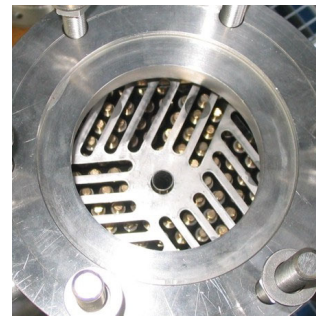


14. ábra: Időátlagolt stress tagok, Q = 90 m<sup>3</sup>/h

A 15. ábrán horizontális síkon kapott sebességmező látható. A kísérlet célja az áramló közeg függőleges tengely körüli rotációjának bizonyítása; ez segítene CFD eredményekkel való összevetéseknél. A forgást feltehetően a keverőrács okozza (16. ábra). Bár a kapott sebességmezőn ez a forgás észrevehető, a forgás bizonyításához további mérések szükségesek.



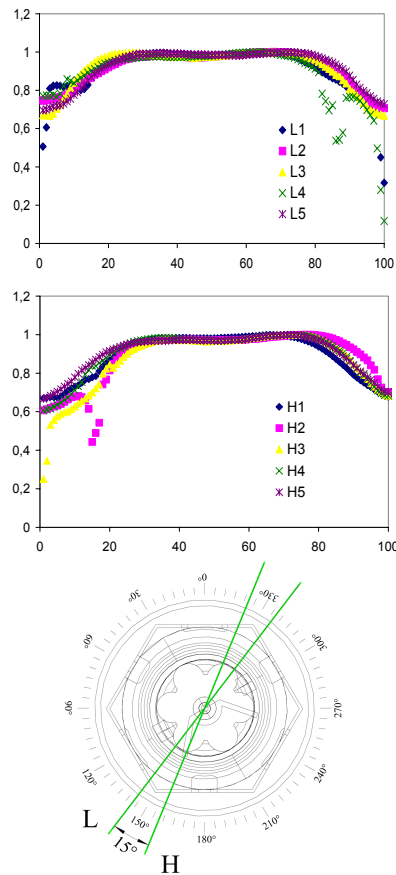
15. ábra: Mérési beállítás és sebességmező horizontális síkon



16. ábra: A keverőrács felülnézeti fényképe

### Pontosság becslés, PIV megismételhetőségi vizsgálat

A PIV mérések pontosság vizsgálatát általában az [1] tanulmányban, konkrétan a fűtőelem kazettamoddellal végzett mérések esetére vonatkozó elemzést [2]-ben ismertettük. A LIF mérések pontossága alapvetően függ a kalibrációtól; a kalibrációs görbéből információt kaphatunk a felbontásra.



17. ábra: A megismételhetőségi vizsgálat eredménye (relatív távolságok és sebességek)

A PIV megismételhetőségi vizsgálat során a 17. ábra szerinti két különböző mérési beállításban mértünk váltakozva, így kétszer öt, újbóli beállítású profil adódott. A mérések sorrendje tehát L1 → H1 → L2 → H2 → L3 → H3 → L4 → H4 → L5 → H5 volt. Az eredmény azt mutatja, hogy az

újibóli beállítás hibája 5%-nál kisebb, legfeljebb a cső szélénél nő meg a szórás valamelyest. Mindegyik görbe 1000 pillanatfelvétel átlaga.

### Összefoglaló értékelés

Az ismerttetett sebesség- és hőmérséklet eloszlás eredmények segítségével kvantitatív és kvalitatív elemzéseket végeztünk a fűtőelem kazetta modell kilépőcsatorna részében. Az említett korábbi tanulmányokban leírt eredményeinkből is már kiderült, hogy a kazetta kilépő termoelem szintjén a keverőrács, emelőcsapok és illesztőrózsa homogenizálták a közeget, a szubcsatornák kilépésénél megjelenő csóvák itt már eltűnnek, és sajátos, de hengeres csőre jellemző sebességprofil alakul ki. A hőmérsékletmező

mérések azt mutatták, hogy termoelem szintjén a hőmérsékletben csak igen egyenlőtlen fűtési konfiguráció és kis térfogatáram esetén kaptunk jól kiértékelhető eloszlást, más esetekben közel homogén hőmérséklet kép adódott. További, csatolt sebesség és hőmérséklet-mező mérések végzése célszerű, melyekből azokat jellemző kvantitatív mennyiségek (például Reynolds fluxus) származtathatók.

A PIV/LIF mérési módszer alkalmasnak bizonyult a bonyolult áramlási csatorna geometriában történő turbulens keveredés vizsgálatára, valamint a CFD számítások validációjára. További kísérletek szükségesek azonban a kvantitatív adatok pontosításához, elsősorban a hőmérséklet eloszlás felvételek bizonytalanságának csökkentése érdekében.

---

## Irodalomjegyzék

- [1] Tar D., Baranyai G., Ézsöl Gy., Tóth I.: VVER üzemanyag kazetta hűtőközeg keveredésének kísérleti vizsgálata PIV mérés technikával, *Nukleon*, 1, 4 (2008) 20
- [2] D. Tar, G. Baranyai, Gy. Ézsöl, I. Tóth: *Experimental Investigation of Coolant Mixing in VVER Reactor Fuel Bundles by Particle Image Velocimetry*, XCFD4NRS, France (2008)
- [3] L. Szabados, Gy.Ézsöl, L. Perneczky, I. Tóth: *Results of the Experiments Performed in the PMK-2 Facility for VVER Safety Studies*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007
- [4] S. Tóth, A. Aszódi: *Preliminary Validation of VVER-440 Fuel Assembly Head CFD Model*, 17th Symposium of AER, Ukraine (2006)
- [5] M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans, 1996, *Particle Image Velocimetry*, Springer