
Reaktorüzemeltetési gyakorlat

Korszerű vizsgálati módszerek

jegyzőkönyvet készítette:

Asztalos Bogdán

mérés időpontja: 2019. 03. 21.

mérőtársak: Boldizsár Bálint, Kurgyis Bálint, Lőrinczy Döme, Major András, Molnár Janka

mérésvezető: Horváth András

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, elméleti háttér	2
2. Mérés menete	3
3. Mért adatok	4
3.1. Biztonságvédelmi rudak esési ideje	4
3.2. Reaktor elindítása	4
3.3. A kétszereződési idő mérése	5
3.4. Névleges teljesítmény elérése	6
3.5. Reaktor leállítása	7
4. Konklúzió	7

1. Bevezetés, elméleti háttér

A mérésünk során a BME Nukleáris Technikai Intézet Oktatóreaktorában vettünk részt egy reaktorüzemeltetési gyakorlaton. A gyakorlat célja a termikus reaktor működésének és üzemeltetésének közelebbi megismerése volt, így az alkalom során személyesen irányítottuk a reaktor működését a mérésvezető felügyelete mellett.

Egy atomreaktorban önfenntartó nukleáris láncreakciót valósítanak meg, amely ezáltal energiát termel. A termikus reaktorok azok, amelyekben a maghasadások nagyrészt termikus neutronok hozzák létre. A termikus reaktorok működésének és elvének részletes bemutatása megtalálható a mérésleírásban [1], itt csupán röviden összefoglaljuk az alapfogalmakat.

A nukleáris láncreakció akkor lesz önfenntartó, ha a maghasadásokban keletkező neutronok közül átlagosan legalább egy neutron további maghasadást eredményez. Effektív sokszorozási tényezőnek (k_{eff}) nevezzük azt a mennyiséget, hogy egy neutronciklus alatt hánszorosára nő a neutronok száma. Egy szabályzott reaktor esetében a legfőbb cél, hogy a maghasadások száma ne ugorjon meg, így azt kell elérni, hogy hasadásonként pontosan egy darab neutron váltson ki további maghasadást, a többi keletkező neutron pedig vagy befogódik hasadás nélkül, vagy elszökik a reaktor felületén. Tehát, egy reaktor akkor működik üzemszerűen, ha $k_{\text{eff}} = 1$.

Az effektív sokszorozási tényező 1-től való relatív eltérésére bevezethetünk egy új mennyiséget, a reaktivitást:

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \quad (1)$$

Azt az állapotot, amikor $\rho = 0$, kritikusnak nevezzük. Ha $\rho < 0$, akkor a reaktor szubkritikus, ha $\rho > 0$, akkor szuperkritikus. Ha a reaktor szuperkritikus, akkor a hasadást előidéző neutronok száma, így a teljesítmény is időben nő.

A pontos dinamikai leírásban azonban nagy szerepük van a késő neutronoknak, amelyek nem azonnal a maghasadáskor lépnek ki, hanem a hasadványok β^- -bomlása után. Ha a késő neutronok részarányát β_{eff} -fel jelöljük, akkor a reaktorteljesítmény változásának sebessége $\rho = \beta_{\text{eff}}$ környezetében ugrásszerűen megnő, mivel ekkor a promptneutronok (azaz a rögtön a hasadáskor keletkező neutronok) is kritikussá teszik a reaktort. Éppen ezért fontos mennyiség ρ -nak a β_{eff} -hez képesti relatív értéke. Ezt mennyiséget dollárban (1 \$, vagy 100 ¢) szokták mérni. Azt az állapotot, amikor $\frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} = 1$ promptkritikusnak nevezzük. Ha $0 < \frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} < 1$, akkor a reaktor szuperkritikus, de promptkritikus alatti, ha $\frac{\rho}{\beta_{\text{eff}}} > 1$, akkor a reaktor promptkritikus fölötti.

További fontos mennyiség még a neutronsűrűség változása is. Ha a reaktor szuperkritikus, akkor a neutronsűrűség időben elvileg exponenciálisan nő. Periódusidőnek nevezzük az az időt, amennyi idő alatt a mérhető neutronfluxus (ami a neutronsűrűséggel arányos) az e-szeresére nő. Erre biztonságvédelmi okokból van szükség, ugyanis, ha a neutronok száma túl gyorsan kezdene el nőni, akkor a láncreakció elszabadulhat, és az irányítóknak

közbe kell lépni. (Ezen okok miatt, a periódusidőt folyamatosan mérjük, és ha lecsökken 10 s alá, akkor a biztonságvédelmi rudak automatikusan elengednek, és a reaktor leáll.)

2. Mérés menete

A gyakorlat során a feladatokat az irányítópultnál páronként végeztük, egyikünk az operátor, másikunk a másodoperátor szerepét foglalta el, és a feladatokat a mérésvezető irányítása alatt végeztük.

A feladatunk a reaktor működésének elindítása, a névleges teljesítmény elérése, majd leállítása volt, miközben egyes mennyiségeket meg is mértünk. Először a biztonságvédelmi rudakat húztuk fel, majd a szabályzórudakat is feljebb húztuk a szuperkritikus állapot elérésének érdekében. Ezután fokozatosan vettük feljebb a teljesítményt, megvárva, hogy bizonyos teljesítményértékeken beálljon az egyensúly. A teljesítmény növelését mindig úgy végeztük, hogy a kritikus állapotból az automata rúd irányítását átvéve följebb emeltük, ezzel szuperkritikus állapotba víve a reaktort, majd a várt teljesítményt elérve, visszaállítottuk az automata rúd szabályozását az automatikus módba, hogy az adott teljesítmény fennmaradjon. Ezzel a módszerrel felvittük a teljesítményt 100 kW-ra, majd a biztonsági rudak visszaeresztésével leállítottuk a reakciót.

Amikor a reaktor 10 kW teljesítménnyel működött, a reaktorzónába fölülről belenézve szabad szemmel is megfigyeltük a Cserenkov-sugárzást, amit a vízben a közeg-beli fénysebességnél nagyobb sebességgel közlekedő elektronok okoznak. A Cserenkov-sugárzás nagyobb teljesítménynél még intenzívebben látszódott, de ezt biztonsági okokból csak kamerán, a vezérlőpult mögül figyeltük.

A vezérlőpult panelén több műszert kellett figyelnünk párhuzamosan, hiszen ha bármelyik olyan tartományba érne, ami a veszélyes lehet, a biztonsági rudak visszaesnek a helyükre, és a reaktor leáll. Hogy ezt megakadályozzuk, időnként állítani kellett a mérés-határt, vagy a szabályzórudak helyzetén módosítani.

A neutronfluxust két módon lehetett mérni. Az első, hogy a neutronokat gáztöltésű detektorokra irányítva impulzusokat számláljuk. Ezt a mérést két számlálón, az I1 és I2 jelű számlálón mértük. Nagy neutronfluxus esetén azonban nem lehet őket egyesével leszámolni, így csak a kialakult egyenáramból lehet rá következtetni. Ezt szintén két műszer méri, az E4 és E5 egyenárammérők. 500 W teljesítmény alatt párhuzamosan figyeltük I1, I2, E4 és E5 mérőket a redundancia miatt, de 500 W fölött már csak az egyenáram mérésre tudtunk támaszkodni. Emellett, mértük a teljesítménnyel arányos áramerősséget az E6 jelű mérőn keresztül, amely alapján egy W-ra való átszámítását is folyamatosan figyeltük. Ezek számunkra csak tájékoztató jellegű adat volt, hiszen az oktatóreaktor által termelt energiát nem hasznosítják sehol.

	Emelési idő [s]	Esési idő [ms]
BV-1	61	398
BV-2	60	380

1. táblázat. A biztonságvédelmi rudak emelési- és esési ideje

3. Mért adatok

3.1. Biztonságvédelmi rudak esési ideje

A reaktor működése során minden nap az első teendő, hogy a biztonságvédelmi rudak esési idejét kell lemérni. Ehhez felhúzzuk az egyiket, majd a BV gomb megnyomásával kikapcsoljuk a rudat tartó elektromágneket, és a rúd visszaesik az eredeti helyére. Ugyanezt a mérést végezzük el a másik rúd esetén is. Az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

3.2. Reaktor elindítása

A biztonsági ellenőrzés után első célunk az volt, hogy elérjük a reaktor teljesítményével először az 1 W-os, majd a 10 W-os értéket. Ehhez teljesen felhúztuk a biztonsági rudakat, majd P1Be neutronforrást beeresztettük a reaktor aktívzónájába, hogy a láncreakció elindulhasson. Mivel a szabályzó rudak még ezután is gátolták a láncreakció önfenntartását, ezért azokat is feljebb emeltük. A kézi rudat 430 mm-es pozícióba állítottuk, majd az automata rudat is el kezdtük emelni. Amikor az automata rúd 400 mm-es pozícióba ért, a teljesítmény növekedése hirtelen megindult, úgyhogy megvártuk amíg a teljesítmény eléri az 1 W-ot, majd bekapcsoltuk az automatikus irányítást, ami az automata rudat automatikusan olyan pozícióba mozgatja, hogy a beállított teljesítmény a beállított érték maradjon.

Mivel az automata irányítás bekapcsolásakor a teljesítmény éppen emelkedett, logikus módon az automata rudat vissza kellett nyomni ahhoz, hogy az 1 W teljesítmény stabilizálódjon. Ahhoz, hogy a teljesítmény állandó értéke mellett az automata rúd állása is állandó legyen, várni kellett egy kicsit, hiszen a láncreakció fennmaradását a késő neutronok is befolyásolják, amik a bomlás után keletkeznek. A reaktorban legnagyobb felezési idejű bomlás 56 s felezési idejű, vagyis néhány perc várakozás után már stabilizálódott az automata rúd állása. (A gyakorlatban ez azt jelentette, hogy 1 perc után már nem mozgott el 1-2 mm-nél jobban.) Az 1 W teljesítményhez az automatikus rúd állása 363 mm-es pozícióba került. A rudak állását, a többi műszer mért értékével együtt a 2. táblázat tartalmazza.

Mivel a reaktor 1 W-on már stabilan működött, kivettük a zónából a neutronforrást, mert arra számítottunk, hogy a láncreakció enélkül is fennmarad. A forrás kivételével valóban kissé feljebb kellett húzni az automata rudat, ennek pozíciója feljebb ment 369-

P [W]	I1 [pps]	I2 [pps]	log E4 [mA]	log E5 [mA]	E6 [mA]	K [mm]	A [mm]
1	$1,1 \cdot 10^3$	$0,23 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$0,38 \cdot 10^{-5}$	430	363 / 369 *
10	$1,1 \cdot 10^4$	$0,122 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$0,37 \cdot 10^{-4}$	430	369

2. táblázat. A különböző mérők mért értékei 1 W és 10 W esetén. *: A forrás kivétele előtt az automata rúd állása 363, után 369 mm-nél volt

re, de a reaktor működése tovább folytatódott.

A reaktorra kimérték, hogy az automata rúd különböző állásai mellett mekkora a hozzá tartozó reaktivitás (mivel ezek negatív értékek, ezek jelentése gyakorlatilag, hogy mekkora reaktivitást nyel el), és ezek az adatok egy táblázatban rendelkezésünkre álltak. 363 mm-es pozícióban ez az érték $-31,04 \text{ \textcent}$, 369 mm-es pozícióban $-29,54 \text{ \textcent}$. A kettő különbsége $1,5 \text{ \textcent}$, tehát a neutronforrás ekkora reaktivitással járul hozzá a reaktor működéséhez.

Ezután kikapcsoltuk az automata irányítást, és feljebb húztuk az automata rudat. Ezzel a reaktor ismét superkritikus állapotba került, vagyis a teljesítménye el kezdett nőni. Amikor elérte a 10 W teljesítményt visszakapcsoltuk az automata irányítást, és megvártuk, hogy a rúd állása megint állandósuljon. A műszerek mért értékeit ez esetben is a 2. táblázat tartalmazza. Mint látható, a szabályozó rúd állása megegyezik az előző esettel, ami azt jelenti, hogy az 1 W-os és 10 W-os állapotok között az aktív zónában lévő moderátorok reaktivitáscsökkentése nem változott.

3.3. A kétszereződési idő mérése

Ezek után az automata rúd mozgását megint visszavettük manuális üzemmódba, és 363 mm-ről felemeltük 440 mm-es pozícióba. Mivel ezzel a reaktivitás ismét pozitív lett, a teljesítmény el kezdett nőni. Az elmélet szerint a növekedés exponenciális, aminek tulajdonsága, hogy mindig ugyanannyi idő alatt nő adott konstans-szorosára az érték. Mi telefonos stopperórával mértük a teljesítmény kétszerezési idejét, ez $t_{2\times} = 39,13 \text{ s}$ -nak adódott.

Mivel a reaktor dinamikáját a reaktivitás egyértelműen meghatározza, a kétszerezési idő és a reaktivitás között kölcsönösen egyértelmű megfeleltetés van, amit a reaktor paramétereinek ismeretében ki lehet számolni. Ez az elméletből kiszámolt összefüggés szintén a rendelkezésünkre állt egy táblázatban, és eszerint a mért kétszerezési időhöz szükséges reaktivitás értéke: $\rho_{39,13 \text{ s}} = 14,97 \text{ \textcent}$. Az automata rúd 369 mm-es értékéhez tartozó reaktivitás $\rho_{363} = -29,54 \text{ \textcent}$, a 440 mm-es értékhez tartozó reaktivitás $\rho_{440} = -13,97 \text{ \textcent}$. Mivel a 363 mm-es pozícióban a reaktivitás biztos, hogy 0 volt, ezért ez alapján az új reaktivitás $\rho = 15,57 \text{ \textcent}$. Ez a számolt értéktől $0,6 \text{ \textcent}$ -tel tér el, ami csupán 4%-os hiba.

Ezután ismét bekapcsoltuk az automatikus szabályzást (ekkor a teljesítmény 65,6 W volt), és a kézi rudat 430 mm-ről 390 mm-re állítottuk. Megvártuk, hogy az automata rúd helyzete stabilizálódjon, hiszen ekkor a reaktivitás ismét pontosan 0, és ekkor az

K [mm]	A_0 [mm]	A_1 [mm]	$\rho_{\Delta A}$ [ϕ]	$t_{2\times}$ [s]	$\rho_{t_{2\times}}$ [ϕ]	$\delta\rho$ [%]
430	369	440	15,57	39,13	14,97	3,8
390	472	542	6,93	35,49	7,59	9,5

3. táblázat. A reaktivitás értéke az automata rúd pozíciójából illetve a kétszereződési időből mért értéke, illetve ezek eltérése a két esetben

P [kW]	$\log E4$ [mA]	$\log E5$ [mA]	$E6$ [mA]	K [mm]	A [mm]
10	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$0,36 \cdot 10^{-1}$	430	404
100	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,36	455	516

4. táblázat. A különböző mérők mért értékei 10 kW és 100 kW esetén

automata rúd pozícióját a 472mm-es pozícióból 542mm-es pozícióba mozgattuk. Ismét megmértük a kétszereződési időt, ami ezúttal $t_{2\times} = 35,49$ s lett. Az ehhez elméletileg tartozó reaktivitás $\rho_{35,49s} = 7,59\phi$. Az automata rúd két állásánál a reaktivitások $\rho_{472} = -8,75\phi$ és $\rho_{542} = -1,82\phi$. A különbség, azaz a valódi reaktivitás $\rho = 6,93\phi$, ami a kétszerezési időből számolt értéktől 0,66ϕ-tel tér el, ami 10%-nyi eltérés.

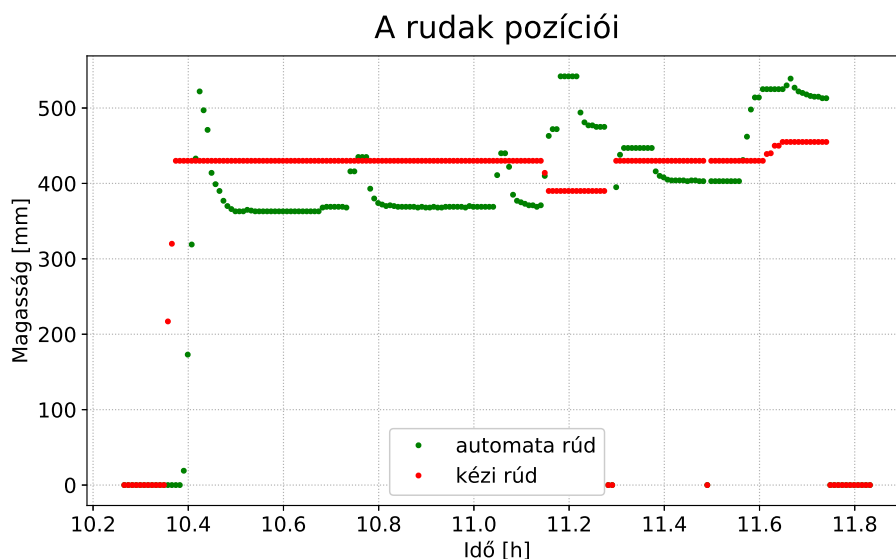
3.4. Névleges teljesítmény elérése

A végső célunk az volt, hogy még jobban megnöveljük a reaktor teljesítményét, először 10 kW-ra, majd hogy ténylegesen felmenjünk a névleges teljesítményig, 100 kW-ig. A teljesítmény emelése ilyenkor is az előzőekhez hasonlóan történt: az egyensúlyi helyzethez képest följebb húztuk az automata rudat, aminek hatására nőtt pozitív lett a reaktivitás, majd a kívánt teljesítmény elérésekor átváltottunk automatikus kezelésre.

A különbség az előzőekhez képest, hogy most már a stabil teljesítményérték elérésével az automata rúd nem ugyanarra a helyre állt vissza, hanem egyre magasabbra. Ez azt jelenti, hogy minél magasabb a teljesítmény, annál kevesebb reaktivitást kell kivenni a reaktorból a szabályzórudakkal, mert annál kisebb reaktivitás van önmagától a zónában. Ez azért van, mert a teljesítmény növekedésével a reaktor is melegedik, így a neutronbefogási rezonanciák kiszélesednek, és több neutron fogódik be újabb hasadás keltése nélkül. Ennek azért van fontos szerepe, mert így a reaktor önszabályozóvá válik, hiszen a teljesítmény hirtelen megugrásával nem fog még tovább nőni, hanem lelassulni, ezáltal negatív visszacsatolást létrehozva.

10 kW eléréséhez az automata szabályzórudat a 404 mm-es pozícióba kellett állítani (a kézi továbbra is 430 mm-nél volt). A többi műszer mért értéke megtalálható a 4. táblázatban (I1 és I2 mérések ekkor már kialaktak).

Amikor a reaktor 10 kW teljesítmények üzemelt, jól lehetett látni már szabad szemmel is a Cserenkov-sugárzást a vízben. A teljesítményt tovább növelve látható volt, hogy a Cserenkov-sugárzás egyre intenzívebb, és a víz is jobban hullámszik (a hevesebb hőáramlás



1. ábra. A szabályzó rudak pozíciói a gyakorlat során az idő függvényében

miatt).

A 100 kW eléréséhez már a kézi rudat is feljebb kellett húzni, mert az automata rúd hatása kezdett telítésbe menni. A rudak végső pozíciója a névleges teljesítmény elérésekor 455 mm és 516 mm volt. A többi adatot ez esetben is a 4. táblázat tartalmazza.

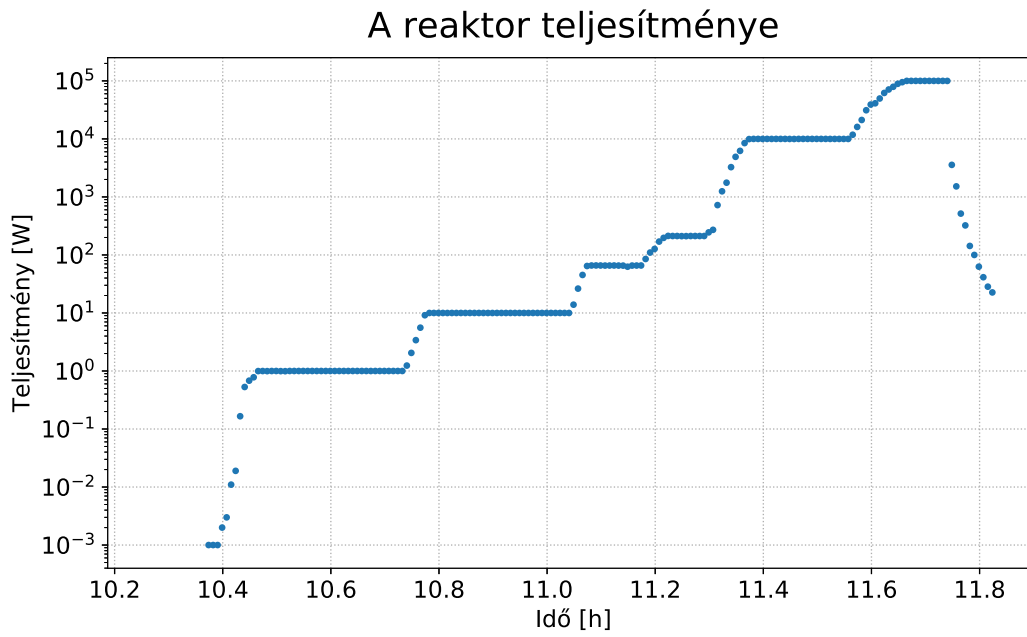
3.5. Reaktor leállítása

A reaktor úgy állítottuk le, hogy egy látszólagos vészjelzést idéztünk elő. A másodoperátor paneljén lévő E5 mérő műszer mellett lévő potméter tekerésével állítható, hogy mi legyen az adott mennyiség elérni kívánt értéke. Biztonsági okok miatt, ha egy mért érték meghaladja a beállított cél 120%-át, akkor a biztonságvédelmi rudak visszaesnek. Mi a log E5 műszer névleges értékét kezdtük el lejjebb tekerni (ezáltal a mutató egyre följebb mászott), így amikor elértük a 110%-ot figyelmeztetőjelzést, majd amikor a 120%-ot, vészjelzést adott, és a biztonsági rudakat elejtette. Az elejtés után a reaktor teljesítménye néhány perc alatt visszaesett 0 W-ra.

A reaktort üzemeltető rendszer folyamatosan naplózta a szabályzórudak és az elért teljesítmény értékét. Ezeket grafikusán is ábrázoltuk az 1. és a 2. ábrákon.

4. Konklúzió

A gyakorlat során a megismertük a reaktor működésének alapjait, és az elméleti alapfogalmakat. Személyesen tapasztalhattuk, hogyan kell üzemeltetni a reaktort, és vizsgáltuk a reaktivitás változását. Emellett zárásként megtekinthettük a Cserenkov-sugárzást is.



2. ábra. A reaktor teljesítménye a gyakorlat során az idő függvényében

Hivatkozások

- [1] *Reaktor üzemeltetési gyakorlat* – mérésleírás. Elérhető [ezen a linken](#)