

866

PENGUKURAN REAKTIVITAS DAN FLUKS NEUTRON PADA ELEMEN BAKAR SILISIDA TERAS RSG-GAS

Amir Hamzah

ABSTRAK

PENGUKURAN REAKTIVITAS FLUKS NEUTRON PADA ELEMEN BAKAR SILISIDA TERAS RSG-GAS. Dalam rangka pembuatan karakterisasi pelat elemen bakar dispersi U_3Si_2 -Al (Uranium terdepleksi) dengan tingkat muat 4,8 gr U/cm^3 dan 5,2 gr U/cm^3 maka dilakukan pengukuran perubahan reaktivitas dan depresi fluks neutron saat penyisipan elemen bakar silisida tersebut. Pengukuran perubahan reaktivitas dilakukan dengan metoda kalibrasi batang kendali dan pengukuran distribusi fluks neutron dilakukan dengan metoda aktivasi keping. Pengukuran dengan penyisipan elemen bakar uji silisida tipe-A dengan tingkat muat di atas, karena satu dan lain hal tidak dapat dilakukan, maka dilakukan pengukuran pada elemen bakar silisida ukuran penuh dengan tingkat muat 2,96 gr U/cm^3 . Hasil pengukuran perubahan reaktivitas teras pada saat penyisipan dua buah elemen bakar uji silisida pada posisi A-9 dan C-3 adalah sebesar +2,67 sen. Hasil pengukuran perubahan fluks neutron rerata di elemen bakar silisida pada posisi A-9 lebih besar secara rerata sebesar 1,69 bagian dan di posisi C-3 lebih kecil 0,68 bagian dibandingkan dengan di elemen bakar oksida.

ABSTRACT

REACTIVITY AND NEUTRON FLUX AT SILICIDE FUEL ELEMENT IN THE CORE OF RSG-GAS. In order to 4.8 and 5.2 gr U/cm^3 loading of U_3Si_2 -Al fuel plates characterization, the core reactivity change and neutron flux depression had been done. Control rod calibration method was used to reactivity change measurement and neutron flux distribution was measured using foil activation method. Measurement of insertion of A-type of testing fuel element with U-loading above cannot be done due to technical reason, so the measurement using full type silicide fuel element of 2.96 gr U/cm^3 loading. The reactivity change measurement result of insertion in A-9 and C-3 is +2.67 cent. The flux depression at silicide fuel in A-9 is 1.69 times bigger than oxide and in C-3 is 0.68 times lower than oxide.

PENDAHULUAN

Elemen bakar dispersi U_3Si_2 -Al dengan tingkat muat 2,96 gr U/cm^3 pengayaan 19,75% U^{235} berhasil diproduksi di Pusbang Teknologi Bahan Bakar Nuklir dan Daur Ulang (Pusbang TBDU), dan telah diiradiasi di RSG-GAS hingga fraksi bakar sekitar 50%. Unjuk kerja elemen bakar selama iradiasi dan hasil uji pasca iradiasi cukup memuaskan sehingga mendorong penelitian lanjut untuk pengembangan ke tingkat muat Uranium yang lebih tinggi agar reaktivitas teras reaktor dapat ditingkatkan minimal sama seperti penggunaan bahan bakar dengan pengayaan tinggi (>90% U^{235}).

Elemen bakar U_3Si_2 -Al adalah suatu elemen bakar alternatif yang diharapkan dapat menggantikan elemen bakar U_3O_8 -Al di masa mendatang karena beberapa faktor keunggulan yang dimiliki oleh U_3Si_2 -Al. Faktor keunggulan tersebut antara lain, densitas U_3Si_2 -Al yang lebih besar dari pada U_3O_8 -Al sehingga menghasilkan

angka muat uranium yang lebih tinggi pada volume muatan yang sama. Di samping itu U_3Si_2 -Al lebih stabil dibandingkan dengan U_3O_8 -Al sehingga tingkat fraksi bakarnya dapat ditingkatkan secara teoritis hingga 90%. Dengan begitu dapat dilakukan penghematan dalam hal elemen bakar teras RSG-GAS.

Dalam rangka mencapai tujuan di atas direncanakan pembuatan dan karakterisasi pelat elemen bakar dispersi U_3O_8 -Al (uranium terdepleksi) dengan tingkat muat 4,8 gr U/cm^3 dan 5,2 gr U/cm^3 . Pengujian karakteristik iradiasi akan dilakukan dengan menggunakan pelat elemen bakar berukuran penuh (*full size*). Tiga buah pelat elemen bakar U_3Si_2 -Al disusun dan dimasukkan ke dalam *stringer* tepat di tengah sedangkan sembilan pelat pada sisi kiri dan kanannya diisi dengan pelat aluminium yang berukuran sama. Susunan seperti itu dikenal dengan sebutan elemen bakar uji tipe-A yang menjadi pilihan terbaik sesuai dengan hasil analisis neutronik dan termohidrolik. Dua buah *stringer* dengan masing-masing tingkat muat di

atas direncanakan akan diiradiasi di teras reaktor pada 2 posisi iradiasi ($IP = Irradiation Position$) pada posisi D-9 dan E-4.

Pengoperasian RSG-GAS dibatasi oleh kriteria keselamatan tertentu dengan demikian maka penyisipan *stringer* berisi pelat elemen bakar dengan tingkat muat tinggi ini ke dalam teras RSG-GAS perlu ditinjau dari aspek keselamatan secara eksperimen. Eksperimen yang dilakukan meliputi pengukuran gangguan reaktivitas dan depresi fluks saat penyisipan elemen bakar uji tersebut untuk memastikan keselamatan operasi reaktor.

Komposisi unsur utama yaitu U-235, U-238 dan Al-27 pada elemen oksida dan silisida adalah sama dan komposisi yang berbeda adalah unsur O-16 pada elemen bakar oksida terhadap Si-28 pada elemen bakar silisida. Kerapatan atom unsur O-16 sebesar $2,0050E-2$ atom/(barn*cm) dan unsur Si-28 sebesar $5,01267E-3$ atom/(barn*cm). Berdasarkan kerapatan per barn tiap unsur tersebut dapat diperkirakan bahwa nilai reaktivitas dan fluks neutron pada elemen bakar silisida akan lebih besar dari pada di elemen bakar oksida karena dengan kerapatan atom per barn yang lebih besar maka penyerapan neutron pada elemen bakar oksida lebih besar dari pada di elemen bakar silisida.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar perubahan reaktivitas teras dan perubahan distribusi fluks neutron karena penyisipan elemen bakar silisida. Pengukuran perubahan reaktivitas dilakukan dengan metoda kalibrasi batang kendali. Pada metoda ini diamati perubahan posisi batang kendali yang disebabkan oleh bertukarnya elemen bakar oksida dengan elemen bakar silisida pada posisi teras yang sama. Sedangkan pengukuran distribusi fluks neutron dilakukan dengan metoda aktivasi keping, yaitu pengukuran fluks neutron yang menggunakan detektor aktivasi keping emas.

TEORI

Secara pengukuran, reaktivitas teras suatu reaktor ditentukan berdasarkan tingginya posisi batang kendali pada kondisi reaktor kritis bebas sumber. Kondisi reaktor kritis bebas sumber didefinisikan sebagai suatu keadaan dimana posisi batang kendali tidak berubah walaupun daya reaktor dinaikkan. Namun kondisi bebas sumber yang dimaksud pada pengukuran reaktivitas adalah pada daya reaktor yang sangat rendah dan hampir pada daya 0. Semakin tinggi posisi batang kendali

saat pengoperasian reaktor maka semakin kecil reaktivitas teras. Dengan demikian, maka perubahan reaktivitas teras yang disebabkan oleh adanya perubahan komposisi teras secara keseluruhan dicerminkan oleh perubahan posisi batang kendali dibandingkan dengan keadaan semula. Berdasarkan hasil kalibrasi batang kendali reaktor, suatu posisi batang kendali dapat langsung ditentukan besarnya reaktivitas teras secara pengukuran.

Perubahan reaktivitas teras yang disebabkan oleh penyisipan elemen bakar uji silisida ditentukan dengan selisih antara reaktivitas teras dalam kondisi awal (ρ_0) dengan reaktivitas teras setelah penyisipan elemen bakar uji (ρ_1), yaitu :

$$\Delta\rho = \rho_0 - \rho_1 \quad (1)$$

Kondisi awal yang dimaksud di sini adalah kondisi teras dengan elemen bakar yang selama ini digunakan yaitu elemen bakar oksida.

Secara pengukuran, depresi fluks neutron termal karena penyisipan elemen bakar uji silisida ditentukan sebagai perubahan antara fluks neutron termal pada kondisi awal (ϕ_{th0}) pada posisi yang sama dengan fluks neutron termal setelah penyisipan elemen bakar uji silisida (ϕ_{th1}), yaitu :

$$H = \frac{\phi_{th0}}{\phi_{th1}} \quad (2)$$

Berdasarkan metoda aktivasi keping, pengukuran fluks neutron ditentukan dari hasil pengukuran aktivitas keping yang telah diiradiasi selama waktu tertentu. Besarnya aktivitas keping sebanding dengan besarnya fluks neutron dan lamanya iradiasi. Semakin besar fluks neutron dan semakin lama keping aktivasi diiradiasi maka semakin besar aktivitas keping tersebut. Karena besarnya aktivitas keping dapat diukur dengan suatu peralatan sistem spektrometri gamma, maka besarnya fluks neutron dapat ditentukan berdasarkan hasil pengukuran aktivitas keping.

Bila suatu keping aktivasi diiradiasi di dalam medan fluks neutron yang berenergi beraneka ragam dari neutron termal, epitermal hingga neutron cepat, maka aktivitas yang ditimbulkan keping disebabkan oleh semua jenis neutron tersebut. Dalam hal ini penentuan fluks neutron menjadi agak sulit. Maka untuk mengukur fluks neutron termal digunakan dua buah keping dengan pembungkus cadmium pada salah satu keping

tersebut. Penggunaan pembungkus Cd, yang merupakan penyerap kuat neutron termal, dimaksudkan untuk mendapatkan harga aktivitas keping yang disebabkan hanya oleh hasil reaksi dengan neutron epitermal dan neutron cepat. Selisih dari aktivitas keping yang tidak dibungkus Cd dan aktivitas keping yang dibungkus Cd merupakan aktivitas yang disebabkan hanya oleh neutron termal.

Berdasarkan hasil pengukuran aktivitas keping emas yang digunakan, besarnya fluks neutron termal pada kondisi awal maupun pada kondisi setelah penyisipan elemen bakar uji silisida ditentukan dengan persamaan :

$$\phi_{th} = \frac{BA}{mN_0} \frac{(A_{bare} - A_{cd})}{\sigma_{th} G_{th} (1 - e^{-\lambda t_i})} \quad (3)$$

dengan :

BA = berat atom emas [gr/atom],

A_{bare} = aktivitas keping tidak terbungkus Cd [detik⁻¹],

A_{cd} = aktivitas keping terbungkus Cd [detik⁻¹],

m = massa keping emas [gr/mol],

N_0 = bilangan avogadro [atom/mol],

σ_{th} = tampang lintang aktivasi unsur emas [cm²],

G_{th} = faktor perisai diri termal keping emas [],

λ = konstanta peluruhan isotop Au¹⁹⁸ [detik⁻¹],

t_i = waktu iradiasi keping emas [detik].

TATA KERJA

Pengukuran perubahan reaktivitas teras karena penyisipan elemen bakar uji dilakukan dengan metoda kalibrasi batang kendali sedangkan depresi fluks diukur dengan metoda aktivasi keping. Pengukuran dengan penyisipan elemen bakar uji silisida tipe-A, karena satu dan lain hal tidak dapat dilakukan, maka dilakukan pengukuran pada elemen bakar silisida ukuran penuh dengan tingkat muat 2,96 gr U/cm³. Langkah-langkah pengukuran yang dilakukan adalah sebagai berikut.

Pengukuran perubahan reaktivitas teras karena penyisipan elemen bakar silisida.

- Reaktor dikritisikan pada kondisi awal, yaitu posisi elemen bakar oksida A-9 dan C-3 berisi elemen bakar oksida. Besarnya reaktivitas teras pada kondisi ini ditentukan berdasarkan hasil kalibrasi batang kendali.
- Elemen bakar pada posisi A-9 dan C-3 diganti dengan elemen bakar silisida dan

selanjutnya reaktor dikritisikan. Dengan cara yang sama reaktivitas teras dapat ditentukan.

- Perbedaan reaktivitas teras di atas merupakan perubahan reaktivitas teras karena penyisipan elemen bakar silisida seperti pada persamaan (1).
- Pengukuran depresi fluks neutron termal karena penyisipan elemen bakar uji.
 - Pengukuran distribusi fluks neutron pada posisi elemen bakar oksida A-9 dan C-3 dengan delapan buah keping emas yang disusun secara selang seling ke arah aksial dibungkus dengan cadmium dan aluminium.
 - Pengukuran distribusi fluks neutron pada posisi elemen bakar silisida A-9 dan C-3 dengan delapan buah keping emas yang disusun secara selang seling ke arah aksial dibungkus dengan cadmium dan aluminium.
 - Perbedaan distribusi fluks neutron pada elemen bakar oksida dengan elemen bakar silisida merupakan depresi fluks seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (2).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran reaktivitas teras pada kondisi awal adalah sebesar 375,45±23,46 sen sedangkan hasil pengukuran reaktivitas teras setelah penyisipan elemen bakar silisida pada posisi A-9 dan C-3 sebesar 378,12±23,63 sen. Dengan demikian, reaktivitas teras bertambah sebesar 2,67±0,24 sen karena penyisipan elemen bakar silisida pada posisi A-9 dan C-3 dibandingkan dengan elemen bakar oksida. Dengan hasil pengukuran perubahan reaktivitas di atas dapat dilihat bahwa dibandingkan dengan elemen bakar oksida, penyisipan elemen bakar silisida pada posisi A-9 dan C-3, reaktor mengalami perubahan reaktivitas yang positif sebesar 2,67±0,24 sen. Pertambahan reaktivitas tersebut cukup kecil dan masih dalam batas keselamatan operasi reaktor, yang dibuktikan dengan kondisi "stuck-rod" terpenuhi.

Komposisi atom elemen bakar silisida dan oksida 250 gram adalah sebagai berikut dalam satuan (atom/(barn*cm)) :

U₃Si₂-Al

U-235	1,50015E-3
U-238	6,01895E-3
Si-28	5,01267E-3
Al-27	4,3031E-2

U₃O₈-Al

U-235	1,50025E-3
U-238	6,01895E-3
O-16	2,00507E-2
Al-27	3,1251E-2

Pada tabel komposisi atom elemen bakar silisida dan oksida di atas terlihat bahwa komposisi Si-28 lebih kecil dibandingkan dengan komposisi O-16 dengan demikian dapat dipahami bahwa reaktivitas elemen bakar silisida akan menjadi lebih positif dibandingkan dengan elemen bakar oksida.

Hasil pengukuran distribusi fluks neutron pada posisi elemen bakar oksida dan silisida A-9 diplot pada Gambar 1 sedangkan hasil pengukuran distribusi fluks neutron termal pada posisi elemen bakar oksida dan silisida C-3 diplot pada Gambar 2. Pada Gambar 1 terlihat bahwa fluks neutron termal rerata pada posisi A-9 pada elemen bakar silisida sebesar $5,51E13 \pm 5,27E12$ n/cm²det sedangkan pada elemen bakar oksida sebesar $3,45E13 \pm 3,30E12$ n/cm²det pada posisi yang sama. Dengan demikian terlihat bahwa fluks neutron termal pada elemen bakar silisida lebih besar secara rerata sebesar $1,69 \pm 0,23$ bagian dibandingkan pada elemen bakar oksida pada posisi yang sama. Di posisi C-3 pada elemen bakar silisida besarnya fluks neutron termal adalah $7,56E13 \pm 7,23E12$ n/cm²det sedangkan pada elemen bakar oksida sebesar $1,09E14 \pm 1,04E13$ n/cm²det pada posisi yang sama. Dengan demikian terlihat bahwa fluks neutron termal pada elemen bakar silisida lebih kecil secara rerata sebesar $0,68 \pm 0,09$ bagian dibandingkan pada elemen bakar oksida.

Sesuai dengan hasil pengukuran perubahan reaktivitas teras karena penyisipan elemen bakar silisida sebesar positif $2,67 \pm 0,24$ sen maka dengan sendirinya secara umum fluks neutron menjadi lebih besar. Akan tetapi menurut gambar 2, fluks neutron pada elemen bakar silisida terdepresi sebesar $0,68 \pm 0,09$ bagian dibandingkan dengan pada elemen bakar oksida. Hal itu mungkin disebabkan adanya pengaruh lingkungan yang banyak menyerap neutron. Pada Gambar 3 terlihat bahwa posisi C-3 lebih dekat dengan batang kendali reaktor dibandingkan dengan posisi A-9, maka neutron termal pada posisi C-3 lebih banyak terserap oleh batang kendali.

Deviasi pengukuran reaktivitas ditentukan dari hasil akar terhadap penjumlahan kwadrat deviasi tiap-tiap parameter dalam rumusan penentuan reaktivitas. Namun karena penentuan reaktivitas ditentukan dari posisi batang kendali

maka deviasi reaktivitas ditentukan dari besarnya deviasi penentuan posisi batang kendali saat pengukuran baik pada kondisi awal maupun saat penyisipan elemen bakar silisida. Deviasi perubahan reaktivitas teras karena penyisipan elemen bakar silisida ditentukan dari hasil akar terhadap penjumlahan kwadrat deviasi reaktivitas pada kondisi awal dan saat penyisipan elemen bakar silisida.

Deviasi pengukuran fluks neutron termal ditentukan dari hasil akar terhadap penjumlahan kwadrat deviasi tiap-tiap parameter dalam rumusan penentuan fluks neutron. Namun dari sekian parameter yang ada, tidak semua parameter memiliki data deviasinya dan deviasi dari parameter massa telah dimasukkan ke dalam deviasi aktivitas pada saat pencacahan, sehingga hanya beberapa parameter saja yang dapat dimasukkan ke dalam perhitungan deviasi pengukuran. Dengan demikian deviasi pengukuran fluks neutron ditentukan dari hasil akar terhadap penjumlahan kwadrat deviasi aktivitas dan waktu iradiasi keping. Dan deviasi dari depresi fluks neutron termal ditentukan hasil akar terhadap penjumlahan kwadrat deviasi fluks neutron pada kondisi awal dan saat penyisipan elemen bakar silisida.

KESIMPULAN

Penyisipan elemen bakar silisida pada posisi yang sama di dalam teras menyebabkan bertambahnya reaktivitas teras dibandingkan dengan elemen bakar oksida. Namun pertambahan reaktivitas teras tersebut cukup kecil dan masih dalam batas keselamatan operasi reaktor.

Fluks neutron termal pada elemen bakar silisida di posisi yang sama lebih besar dibandingkan dengan elemen bakar oksida. Atau fluks neutron pada elemen bakar silisida terdepresi tidak sebanyak pada elemen bakar oksida.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-

besarnya kepada semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini. Khususnya kepada Sdr. Jaka Iman yang telah membantu secara teknis penelitian, demikian pula kepada Supervisor dan operator reaktor yang sangat membantu dalam pengoperasian reaktor. Demikian pula kepada teman-teman peneliti di BPTR-P2TRR Batan yang dengan sangat antusias mendukung keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR ACUAN

- 1). K.H. BECKURTS and K. WIRTZ, "Neutron Physics", Springer-Verlag, New York, 1964.
- 2). IAEA TECH. REP., SERIES NO. 107, "Neutron Fluence Measurement", 1970.
- 3). E.M. ZSOLNAY, "Neutron Flux and Spectrum Measurement by Activation Method", Lecture note for the RTC on Calculation and Measurement of Neutron Flux for Research Reactors, Jakarta, September 27 to October 15, 1993.
- 4). AMIR HAMZAH dkk., "Pengukuran Distribusi Fluks Neutron di RSG-GAS",
- 5). Laporan penelitian tahun 1996/1997, Pusat Reaktor Serba Guna – BATAN.
- 6). AMIR HAMZAH, "Pengukuran Fluks dan Spektrum Neutron di Fasilitas Dopping Silikon RSG-GAS", Prosiding Seminal keempat Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Jakarta 10 – 11 Desember 1996.

Diskusi

Pertanyaan : (Sarwani)

Bagaimana cara/metode pengukuran fluks di teras reaktor.

Jawaban (Amir H)

metoda pengukuran adalah dengan metoda aktivasi keping emas.

Pertanyaan (Pujijanto MS.)

Disebutkan pada kesimpulan ke 2, bahwa fluks reaktor (riset) berbahan uranium silisida U lebih besar daripada berbahan bakar oksida U. Bukankan fluks berbanding dengan daya saja ? mohon penjelesan. Terimakasih.

Jawaban (Amir H)

Saat pengukuran dilakukan pada daya yang sama sehingga besarnya fluks neutron hanya bergantung pada komposisi material yang ada di dalam teras.

Pertanyaan (M. Imron)

Apa yang dimaksud elemen silisida lebih stabil dibanding elemen bakar oksida ?

Jawaban (Amir H)

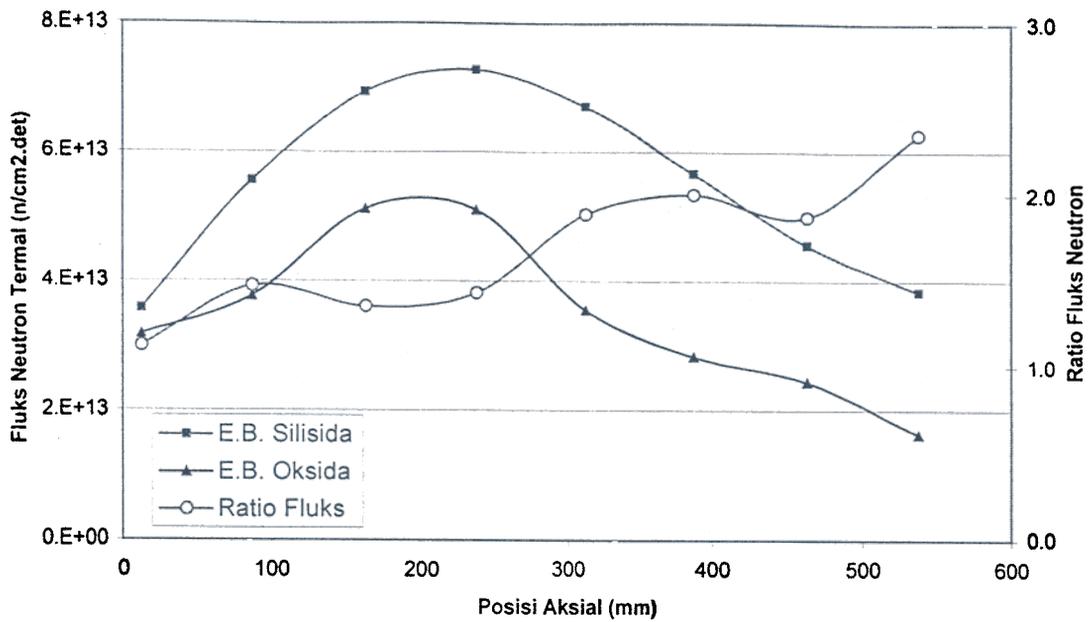
Elemen bakar silisida lebih stabil dibandingkan dengan elemen bakar oksida karena elemen bakar silisida dapat dibakar hingga fraksi bakar yang sangat tinggi.

Pertanyaan (Jati Susilo)

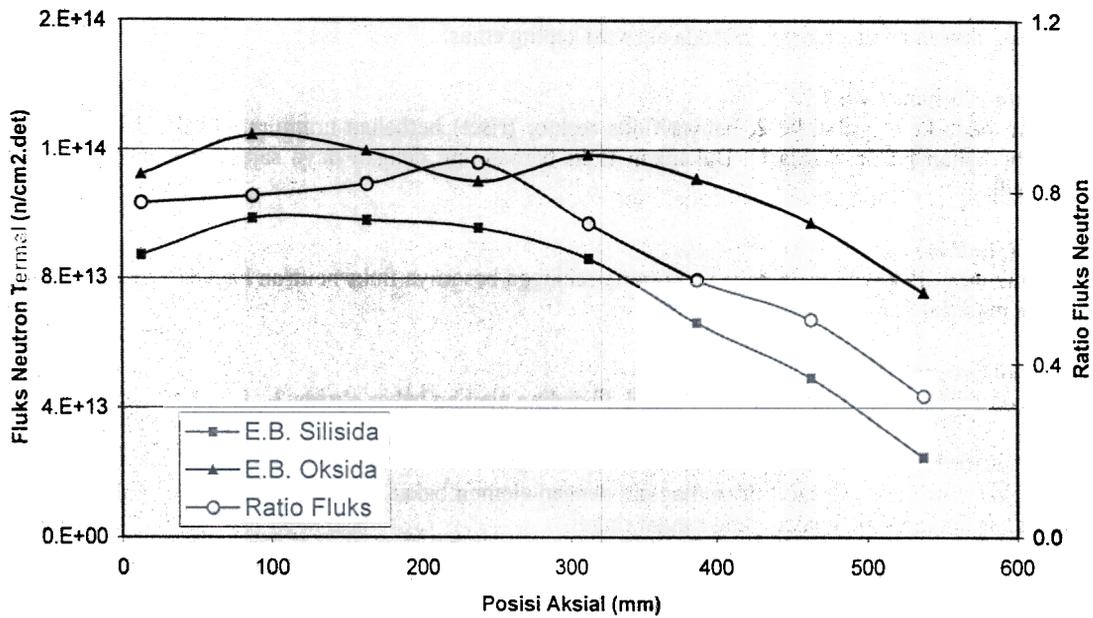
1. Untuk apa/mengapa bapak melakukan pengukuran fluks ?
2. Fluks silisida yang lebih besar dari oksida, apakah lebih baik/kurang baik ?

Jawaban (Amir H)

1. Pengukuran fluks neutron di elemen bakar silisida diperlukan untuk melihat apakah fluks neutron ada lebih besar atau lebih kecil pada elemen bakar silisida dibanding oksida.
2. Bila fluks neutron di elemen bakar silisida lebih besar maka lebih baik karena neutron yang dapat dimanfaatkan lebih banyak.
- 3.



Gambar 1. Distribusi Fluks Neutron di Posisi A-9 pada Elemen Bakar Silisida dan Oksida serta Ratio Fluksnya



Gambar 2. Distribusi Fluks Neutron di Posisi C-3 pada Elemen Bakar Silisida dan Oksida serta Ratio Fluksnya

K	BS+59	B-29	B-30	PRTF	B-20	B-13	B-8	BS+10	B-5	B-2
J	BS+58	BS+58	B-22	PRTF	B-21	B-23	B-24	B-4	BS+52	B-15
H	B 26	F 50 0,0	F 258 6,57	F 239 25,19	F 242 19,30	F 238 25,57	F 51 0,0	B 19	B-17	BS+51
G	B 16	F 247 13,63	F 221 43,46	AL 4	C 193 37,54	F 227 38,24	F 223 30,73	B 40	BS+57	B-14
F	F 256 6,54	F 255 6,33	C 209 13,12	F 235 31,03	F 219 43,14	C 248 6,17	F 230 37,40	F 260 0,0	B-32	PNRA
E	F 250 12,49	C 200 31,71	F 241 20,16	AL 6	AL 3	F 234 31,14	AL 8	F 254 13,33	B-34	HYRA
D	F 236 24,74	AL 2	F 220 41,31	AL 5	AL 7	F 244 19,13	C 201 25,53	F 240 26,41	B-36	HYRA
C	F 259 6,59	F 228 36,19	C 249 0,0	F 233 36,30	F 231 32,10	C 207 19,50	F 251 13,11	ES 224 0,0	B-37	HYRA
B	BS+54	F 232 30,90	F 222 41,84	C 186 43,01	AL 1	F 218 42,39	F 245 18,60	B 6	B-11	HYRA
A	B 10	FS 225 0,0	F 229 37,46	F 243 19,69	F 237 24,64	F 246 13,06	F 257 0,0	B 3	BS+56	B-1
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

REFLEKTOR BLOK BERYLLIUM

Keterangan :

- F xxx = Elemen Bakar Oksida,
- FS xxx = Elemen Bakar Silisida,
- C xxx = Elemen bakar kontrol,
- B xx = Elemen Beryllium,
- BS+xx = Elemen Beryllium Stopper dengan sumbat,
- Al x = Aluminium Stopper tanpa sumbat,
- NS = Sumber Neutron.

Gambar 3. Konfigurasi teras tiga puluh enam penuh beserta fraksi bakar (%).