

ANALISIS NEUTRONIK REAKTOR UJI MATERIAL 25 MW*)
R.S. Lasijo
Pusat Penelitian Teknik Nuklir, BATAN, Bandung.

A B S T R A K :

ANALISIS NEUTRONIK REAKTOR UJI MATERIAL 25 MW. Analisis neutronik untuk reaktor uji material yang diusulkan oleh Interatom GmbH untuk Indonesia telah dilakukan dengan menggunakan sistem perhitungan reaktor Argonne (ARC)¹⁾. Data tampang lintang diolah dengan menggunakan lima dan sepuluh grup energi neutron. Perhitungan dilakukan untuk panjang daur keseimbangan, pembakaran, distribusi fluks neutron, keracunan ^{135}Xe dan ^{149}Sm , harga batang kendali, parameter kinetik, dan koefisien balik reaktivitas isothermal. Panjang daur keseimbangan yang diperoleh besarnya 27 hari, dengan pembakaran bahan bakar rata-rata sebesar 48% untuk elemen bakar standar dan 53% untuk elemen bakar kendali. Fluks neutron termal maksimum di daerah fasilitas iradiasi pusat besarnya $4.2 \times 10^{14} \text{ n.s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Reaktivitas pada daur keseimbangan untuk ^{135}Xe dan ^{149}Sm besarnya masing-masing 3.3% dan 0.6%, sedangkan harga batang kendali besarnya 9.29%. Hasil perhitungan untuk parameter kinetik dan koefisien balik reaktivitas isothermal menunjukkan bahwa operasi secara aman mungkin dapat dilakukan sekalipun dalam kondisi transien, karena timbulnya kenaikan suhu dan mendidihnya moderator akan menyebabkan turunnya reaktivitas teras. Perhitungan di atas dilakukan dengan memakai bahan bakar berbentuk pelat dengan tebal kelongsong aluminium 0.30 mm dan rapat daging uranium 2.29 g/cc. Karena kebanyakan reaktor uji material dengan bahan bakar pelat pada waktu ini mempunyai tebal kelongsong 0.38 mm atau lebih maka, sebagai perbandingan, dalam penelitian ini telah pula dilakukan perhitungan dengan menggunakan tebal kelongsong 0.38 mm dan kerapatan daging uranium 3.2 g/cc. Hasilnya menunjukkan bahwa teras memiliki penampilan yang serupa dengan panjang daur keseimbangan selama 31 hari.

A B S T R A C T :

NEUTRONIC ANALYSIS FOR MATERIALS TESTING REACTOR 25 MW. Neutronic analysis for materials testing reactor 25 MW proposed by Interatom GmbH has been carried out using Argonne Reactor Computation (ARC) System¹⁾. The cross section data were calculated using five and ten groups of neutron energies. Calculations were performed for equilibrium cycle length, burnup, neutron flux distribution, ^{135}Xe - and ^{149}Sm -poisoning, control rod worth, kinetic parameters, and isothermal reactivity feedback coefficients. Equilibrium cycle length obtained was 27 days, with average fuel burnup of 48% for standard fuel elements and 53% for control fuel elements. Maximum thermal neutron flux at central irradiation facility was $4.2 \times 10^{14} \text{ n.s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Reactivities of ^{135}Xe and ^{149}Sm at equilibrium cycle are respectively 3.3% and 0.6%, while control rod worth is 9.29%. Results of the calculations for kinetic parameters and isothermal reactivity feedback coefficients indicate that safe operation might be possibly maintained despite of transient condition, because the increase in temperature and the boiling of moderator decrease the core reactivity. Plate type fuel elements with cladding thickness of 0.30 mm and meat density of 2.29 g/cc was used in the above calculations. Since most materials testing reactors at present use cladding of 0.38 mm thickness or more, hence for comparison, calculations have also been performed using fuel elements with cladding thickness of 0.38 mm and meat density of 3.2 g/cc. The results show that in principle the core has similar performance with equilibrium cycle length of 31 days.

P E N D A H U L U A N :

pada tahun 1982 kontrak pembelian sebuah reaktor telah ditanda tangani oleh Badan Tenaga Atom Nasional dan Interatom GmbH (Jerman Barat). Reaktor tersebut berkapasitas 25 MW termal yang berupa reaktor uji material yang dapat pula dipergunakan untuk produksi isotop, penelitian, pengembangan, dan latihan, sehingga reaktor ini merupakan reaktor serba guna.

Reaktor ini akan memiliki peranan yang penting bukan saja dalam penelitian dan pengembangan tenaga nuklir untuk maksud-maksud damai pada umumnya, tetapi juga penting untuk mempelajari penggunaan reaktor untuk menghasilkan tenaga listrik di Indonesia pada masa-masa yang akan datang. Sebagaimana telah diketahui bahwa tenaga nuklir merupakan salah satu alternatif yang paling layak untuk menanggulangi adanya kekurangan energi pada masa yang akan datang. Maka sepatutnya bahwa sebelum pembangunan reaktor ini dilaksanakan perlu diadakan analisis agak mendalam.

Di bawah ini akan dibahas hasil-hasil analisis neutronik reaktor tersebut berdasarkan spesifikasi yang diberikan oleh Interatom yang dibuat sebelum kontrak pembelian ditanda tangani.

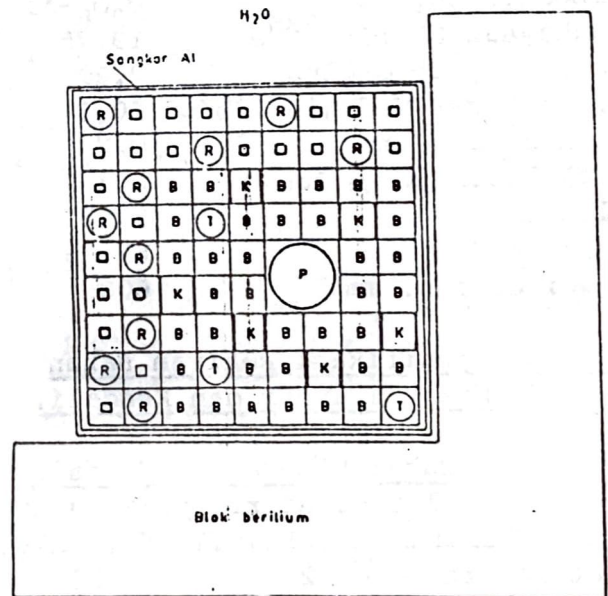
SPESIFIKASI REAKTOR :

Reaktor yang dianalisis ini berupa reaktor uji material dengan tipe kolam dengan moderator air dan dengan daya operasi penuh 25 MW termal. Spesifikasi umum reaktor ini tertera pada Tabel 1, sedang tampang lintang teras, reflektor, dan fasilitas iradiasi tertera pada Gambar 1.

Dari Gambar 1 terlihat bahwa teras terdiri dari 9x9 kisi untuk elemen bakar, elemen kendali, fasilitas iradiasi, dan reflektor elemen berilium. Jarak antara kisi-kisi adalah 8.1 cm x 7.7 cm. Empat posisi dari kisi-kisi yang berada di tengah teras ditempati oleh fasilitas iradiasi pusat (P), 3 posisi oleh fasilitas iradiasi teras(T), 6 posisi oleh rakitan batang

Tabel 1. Spesifikasi Umum Reaktor.

Tipe	reaktor uji material moderator air ringan kolam bahan bakar diperkaya rendah (LEU)
Daya	25 MW termal
Guna material	uji bh. bakar dan produksi radioisotop penelitian : fisika radiokimia radiobiologi latihan
Rapat daya rata-rata	165.6 W/cc daerah bh. bakar efektif homogen



Gambar 1. Penampang lintang teras, reflektor, dan fasilitas iradiasi.

kendali (K), dan 36 posisi oleh rakitan bahan bakar (B). Posisi kisi-kisi yang lain ditempati oleh 22 elemen reflektor berilium (R) dan 10 fasilitas iradiasi reflektor (R). Teras dan daerah elemen reflektor berilium dikelilingi oleh sangkar alumunium setebal 8 mm. Celah berisi air setebal 1.5 cm memisahkan sangkar alumunium dan balok berilium. Dua reflektor balok berilium yang berhadapan dengan sisi-sisi teras dan reflektor elemen berilium tebalnya 35 cm, panjang 122 cm dan tingginya 80 cm. Setiap balok berilium terdiri dari berilium berkualitas nuklir dengan 7.5 volume persen air untuk pendingin. Spesifikasi dari elemen bahan bakar dan rakitan bahan bakar dan kendali terlihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Daging bahan bakar berupa suatu campuran dispersi dari U_3O_8 -Al dengan uranium diperkaya dengan 19.75% ^{235}U . Bentuk dispersi dari daging bahan bakar berupa oksida uranium dalam suatu matriks aluminium.

Tabel 2. Spesifikasi Bahan Bakar.

Komposisi daging	U_3O_8 -Al
Pengkayaan U, b/o ^{235}U	19.75
Rapat U, g/cc daging	2.29
Persen berat U/daging, b/o	50.3
Tebal daging, mm	0.7
Tebal kelongsong, mm	0.3
Celah air, mm	2.557
Lebar daging, mm	62.75
Tinggi daging, mm	600

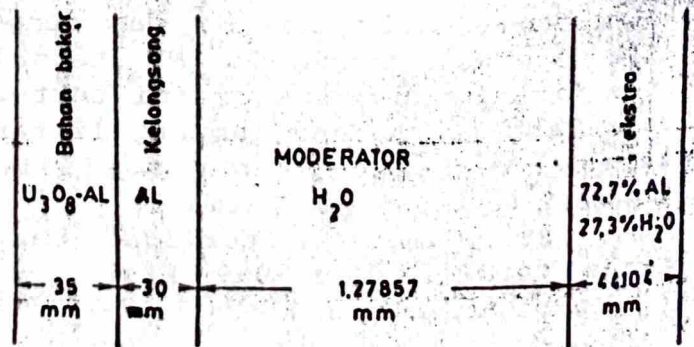
Tabel 3. Spesifikasi Rakitan Bahan Bakar Standar dan Kendali.

	Bakar Standar	Kendali
Tipe	pelat u.mater.	pelat u.mater.
Tampang, mmxmm	80.65x76.1	80.65x76.1
Pelat/rakitan	21	15
Tebal pelat, mm	1.30	1.30
Celah air, mm	2.557	2.557
Isi U/rakitan, g	1265.8	904.2
Isi ^{235}U /rak., g	250	178.6
Bahan kelongsong	Al/AlMg1	Al/AlMg1
Bahan struktur	Al/AlMg3	Al/AlMg3
Tinggi elem., mm	900	1681
Banyaknya pelat Al	-	4
Tinggi aktif, mm	600	600

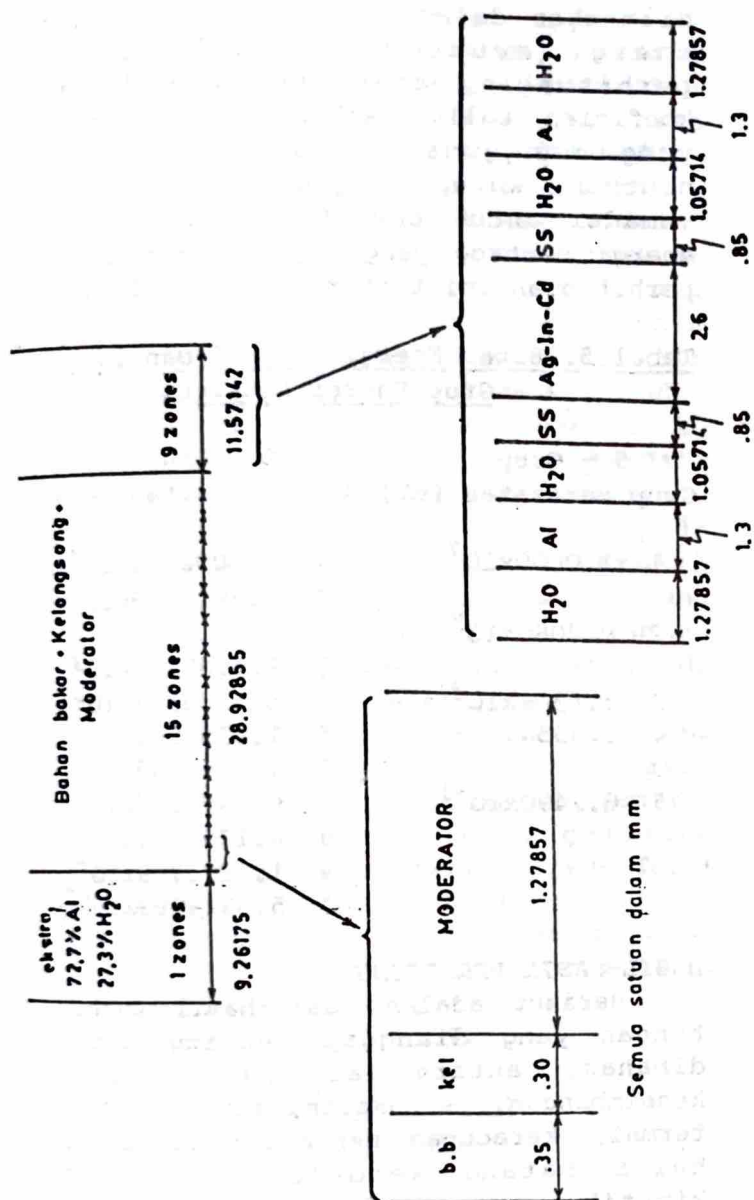
METODE PERHITUNGAN :

Data tampang lintang untuk daerah-daerah yang berlainan di dalam teras dihitung dengan menggunakan program komputer EPRICELL²⁾. Program ini merupakan paduan dan modifikasi dari program-program yang telah dibuat sebelumnya, di antaranya ialah GAM-1³⁾, yaitu program perhitungan untuk neutron cepat dengan persamaan P_1 multigrup, THERMOS⁴⁾, yaitu perhitungan untuk neutron termal dengan teori transport, dan CINDER⁵⁾, yang berupa perhitungan untuk pembakaran dan hasil fisi. Program MC²⁻²⁶⁾ juga dipergunakan untuk menghitung tampang lintang epitermal yang kemudian hasilnya dimasukkan ke dalam EPRICELL melalui masukan faktor perisai.

Perhitungan tampang lintang untuk setiap daerah dilakukan dengan menggunakan sel satuan. Sel-sel satuan untuk menghitung elemen bakar standar dan elemen bakar kendali, misalnya, tertera pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Sel satuan untuk perhitungan bahan bakar.



Gambar 3. Sel satuan untuk perhitungan elemen kendali.

Perhitungan persamaan difusi dilakukan dengan program DIF3D dan DIF2D. Karena hanya geometri XY saja yang dipergunakan dalam perhitungan, maka jarak ekstrapolasi dipergunakan untuk simulasi keadaan tiga dimensi.

Jarak ekstrapolasi ini diperoleh dengan melakukan least-squares-fit terhadap fluks aksial sebagai fungsi dari posisi-z dari perhitungan geometri RZ dengan program DIF3D di mana teras dianggap homogen.

Perhitungan panjang daur dan banyaknya pembakaran bahan bakar dilakukan dengan program REBUS-2⁷⁾ Perhitungan panjang daur bahan bakar ini dimaksudkan untuk menentukan panjang daur keseimbangan teras dengan menggunakan strategi manajemen bahan bakar seperti yang diusulkan oleh Interatom. Panjang daur keseimbangan dihitung dalam REBUS-2 dengan mengguhakan masukan tampang lintang mikroskopik dari pembakaran pada pertengahan daur keseimbangan yang dihasilkan oleh EPRICELL. Pada permulaan dari daur keseimbangan 6 elemen bakar standar baru dan 1 elemen bakar kendali baru dimasukkan ke dalam teras. Masing-masing dari 7 elemen yang baru ini kemudian dipindahkan ke lokasi lain yang unik pada akhir dari setiap daur keseimbangan. Sampai pada akhirnya mereka dikeluarkan dari teras setelah selama 6 daur berada di dalam teras. Pemandahan bahan bakar dimulai dari bagian luar dengan maksud untuk mendapatkan fluks neutron setinggi mungkin pada daerah iradiasi dalam reflektor. Pembakaran yang tertinggi terjadi pada bagian dalam dari teras yang jauh dari posisi iradiasi reflektor. Skema pemandahan bahan bakar ini tertera pada Tabel 4 dengan posisi yang dimaksudkan tertera pada Gambar 4.

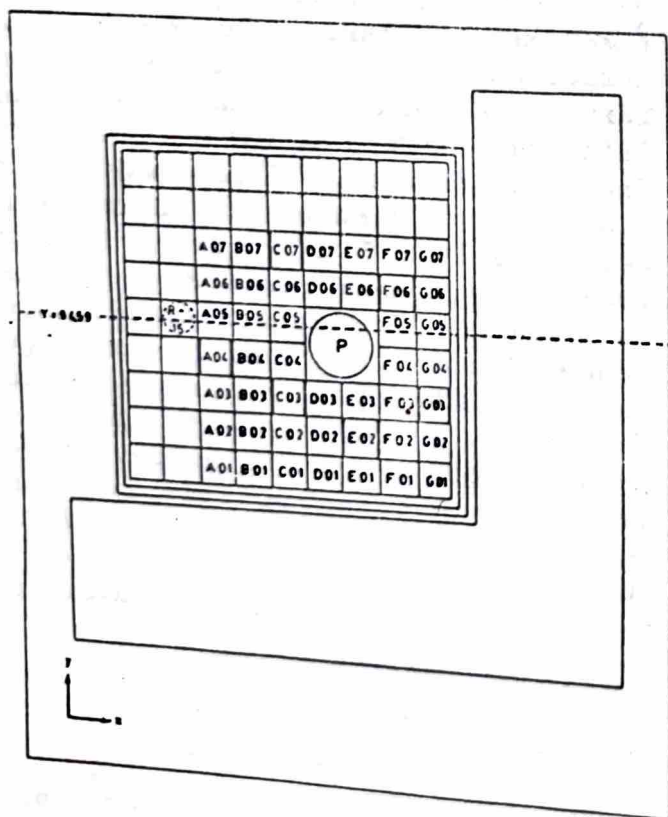
Tabel 4. Pola Pemandahan Bahan Bakar dalam Teras.

Lintasan	Urutan posisi dalam teras.
1	A01, A02, A03, C05, B05, B03
2	A07, A06, A05, C06, D03, B04
3	B07, B01, C01, D01, E03, C02
4	F07, E07, D06, E01, F02, C04
5	G06, F01, D07, E06, F03, D02
6	G07, G02, G05, F05, G04, F04
7	A04, G03, G07, F06, C03, E02

Sebagian besar perhitungan dilakukan dalam 5 grup (broad group) energi neutron, kecuali untuk perhitungan parameter kinetik dan koefisien balik reaktivitas isothermal yang menggunakan 10 grup energi neutron, karena 5 grup masih kurang memadai untuk perhitungan ini. Grup energi neutron yang dipergunakan dalam perhitungan ini tertera pada Tabel 5.

Tabel 5. Batas Energi untuk 5 dan 10 Grup Energi Neutron.

5 - Grup	10 - Grup
Grup Batasatas (eV)	Grup Batasatas (eV)
1 1.0000×10^7	1 1.0000000×10^7
2 8.2080×10^5	2 6.3927889×10^5
3 5.5308×10^3	3 9.1188164×10^3
4 1.8554	4 5.5308398×10^3
5 6.2490×10^{-1}	5 1.8553905
	6 1.1664333
	7 6.2493277×10^{-1}
	8 4.1703504×10^{-1}
	9 1.4572799×10^{-1}
	10 5.6924999×10^{-2}



Gambar 4. Posisi bahan bakar dan kendali.

HASIL-HASIL PERHITUNGAN

Berikut adalah hasil-hasil perhitungan yang dianggap penting untuk dibahas, antara lain panjang daur keseimbangan, pembakaran, fluks neutron termal, keracunan xenon dan samarium, harga batang kendali, parameter kinetik, serta koefisien balik reaktivitas isothermal.

Panjang daur keseimbangan dan pembakaran.

Pada setiap prosedur manajemen bahan bakar, panjang daur maupun banyaknya pembakaran dalam suatu teras tergantung pada besarnya reaktivitas lebih yang diperlukan supaya teras dapat beroperasi secara normal pada daya penuh. Reaktivitas lebih ini misalnya diperlukan untuk mengimbangi adanya eksperimen dalam teras ataupun untuk menanggulangi adanya keracunan xenon, terutama pada waktu menjalankan reaktor kembali.

Salah satu pertimbangan adalah

berdasarkan perkiraan Interatom bahwa untuk penanggulangan xenon diperlukan reaktivitas lebih $\rho=1.0\%$, sedang untuk eksperimen dalam teras dan reflektor diperlukan $\rho=2.0\%$. Yang lain adalah perlunya tambahan reaktivitas berdasarkan hasil-hasil perhitungan yang biasa dilakukan dalam penggunaan sistem perhitungan reaktor Argonne National Lab. yang biasa memerlukan tambahan $\rho=2.0\%$. Maka dalam perhitungan ini pada akhir daur keseimbangan perlu dihasilkan $k_{ef}=1.05$.

Dengan pemindahan 6 elemen bakar standar dan satu elemen bakar kendali pada akhir setiap daur keseimbangan, seperti yang telah diutarakan pada pasal yang baru lalu, diperoleh besarnya panjang daur keseimbangan yang lamanya 27 hari daya penuh. Bilamana dipergunakan anggapan bahwa tidak ada eksperimen maupun penanggulangan xenon maka perhitungan menghasilkan panjang daur yang lamanya sampai 32 hari. Besarnya pembakaran berdasarkan panjang daur 27 hari untuk masing-masing lintasan bahan bakar tertera pada Tabel 6, di mana lintasan ke tujuh adalah untuk pembakaran elemen bakar kendali. Pembakaran rata-rata untuk elemen bakar standar besarnya 48%, sedangkan untuk elemen bakar kendali 53%.

Tabel 6. Karakteristik Daer Keseimbangan.

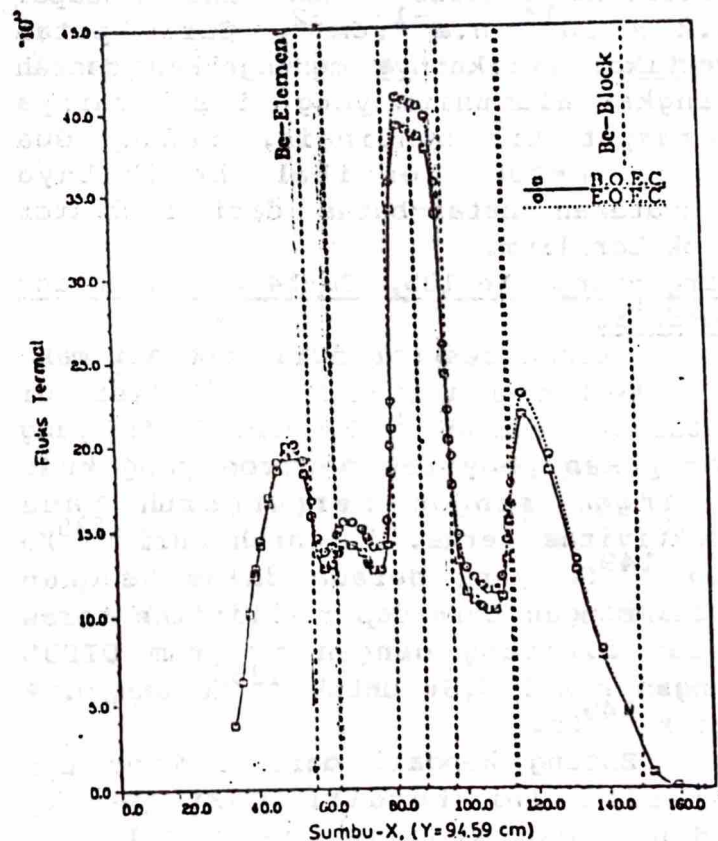
Panjang daur	27 hari
k_{ef} mula-mula (BOL)	1.2264
k_{ef} mula daur (BOEC)	1.0958
k_{ef} akhir daur (EOEC)	1.0499
Lintasan	Banyaknya pembakaran
1	49.7 %
2	51.6 %
3	46.5 %
4	48.1 %
5	47.2 %
6	45.2 %
7	53.0 %

Fluks Neutron.

Distribusi fluks neutron telah dihitung baik untuk bahan bakar baru

(BOL), untuk mula daur keseimbangan (BOEC), maupun untuk akhir daur keseimbangan (EOEC). Pada perhitungan ini batang kendali dianggap tidak ada dan diganti kedudukannya dengan air.

Distribusi fluks neutron termal pada mula daur (BOEC) dan akhir daur (EOEC) sepanjang sumbu-X pada posisi $y=94,59$ cm tertera pada Gambar 5. Garis ini (lihat Gambar 4) melalui bahan bakar standar pada posisi-posisi A05, B05, C05, F05 dan G05, dan fasilitas iradiasi pusat (P) yang berisi air.



Gambar 5. Fluks neutron termal.

Garis (kurva) kontinu pada Gambar 5 yang menghubungkan segi empat menyatakan fluks neutron termal pada mula daur (BOEC), sedangkan garis bertitik-titik yang menghubungkan lingkaran-lingkaran menyatakan fluks neutron termal pada akhir daur (EOEC). Garis-garis lurus patah vertikal menyatakan batas-batas daerah di dalam teras. Garis patah pertama dan kedua dari kiri menunjukkan tempat dari dua batang kendali pada posisi A04.

Dua puncak di sekitar kedua garis vertikal tersebut disebabkan oleh adanya reflektor elemen berilium dan bakan air pada fasilitas iradiasi reflektor pada posisi R-15. Tiga garis-garis patah vertikal berikutnya menunjukkan batas-batas pinggir dan tengah-tengah dari fasilitas iradiasi pusat (P) yang berisi air. Puncak maksimum fluks neutron termal dalam fasilitas iradiasi pusat ini mencapai $4.2 \times 10^{14} \text{ n.s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Garis patah vertikal berikutnya menunjukkan daerah sangkar aluminium yang di sekitarnya terdapat air pendingin, sedang dua garis patah vertikal berikutnya menyatakan batas-batas dari rekletor blok berilium.

Harga-harga Xe-135, Sm-149, dan Batang Kendali.

Selama reaktor dalam operasi maka akan terbentuk inti-inti hasil fisi, di antaranya adalah ^{135}Xe dan ^{149}Sm yang merupakan penyerap neutron yang kuat sehingga sangat berpengaruh pada reaktivitas teras. Pengaruh dari ^{135}Xe dan ^{149}Sm yang berada dalam keadaan keseimbangan terhadap reaktivitas teras telah dihitung dengan program DIF3D dengan hasil 3.3% untuk ^{135}Xe dan 0.6% untuk ^{149}Sm .

Batang kendali dari reaktor uji material ini terdiri dari perak, indium, dan kadmium, yang dilapisi dengan baja tahan karat. Karena batang kendali ini merupakan komponen yang terpenting dalam operasi reaktor, maka perlu diketahui harga atau daya pengendaliannya terhadap reaktivitas teras. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa bila batang kendali keseluruhan-

nya dimasukkan ke dalam teras, maka didapatkan bahwa harga reaktivitas dari batang kendali besarnya 9.3%.

Parameter Kinetik.

Parameter-parameter kinetik telah dihitung baik untuk bahan bakar yang baru (BOL) maupun pada permulaan daur keseimbangan (BOEC). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan 10 grup energi neutron.

Hasil perhitungan yang diperoleh untuk umur neutron senyat dan fraksi neutron kasep (beta efektif) serta konstanta luruh lambda untuk keenam grup neutron kasep tertera pada Tabel 7.

Tabel 7. Parameter Kinetik.

Neutron senyat: Umur $8.50 \times 10^{-5} \text{ s}$ (BOEC)

Neutron kasep (BOEC):

Grup	Beta _{ef}	Lambda (s ⁻¹)
1	2.433077×10^{-4}	1.272361×10^{-2}
2	1.352989×10^{-3}	3.172974×10^{-2}
3	1.197351×10^{-3}	1.163665×10^{-1}
4	2.585617×10^{-3}	3.115779×10^{-1}
5	8.193227×10^{-4}	1.398925
6	1.690091×10^{-4}	3.860998

Koefisien Balik Reaktivitas Isotermal.

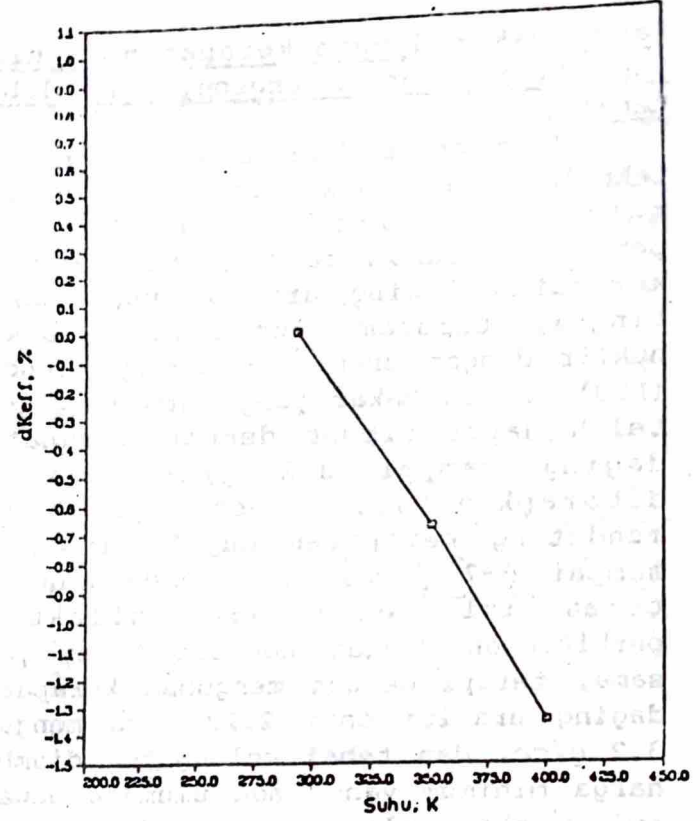
Dalam pengendalian suatu reaktor keselamatan operasi merupakan hal yang tak dapat diabaikan. Keselamatan operasi dapat dijamin antara lain bilamana reaktor cukup stabil terhadap pengaruh transien. Di samping harus diketahui sifat kinetiknya, juga harus diketahui pengaruh perubahan suhu terutama pada bahan bakar dan moderator terhadap reaktivitas dari teras. Untuk suatu operasi yang aman keadaannya harus sedemikian rupa sehingga bilamana suhu bahan bakar dan moderator naik, yang dapat menyebabkan pula kerapatan moderator turun, reaktivitas dari teras juga harus menurun karena kalau misalnya reaktivitas sampai juga ikut naik maka akan sangat membahayakan kestabilan teras.

Dalam kenyataan besaran-besaran transien ini dapat terjadi secara simultan dan interdependen. Untuk sederhananya maka perhitungan-perhi-

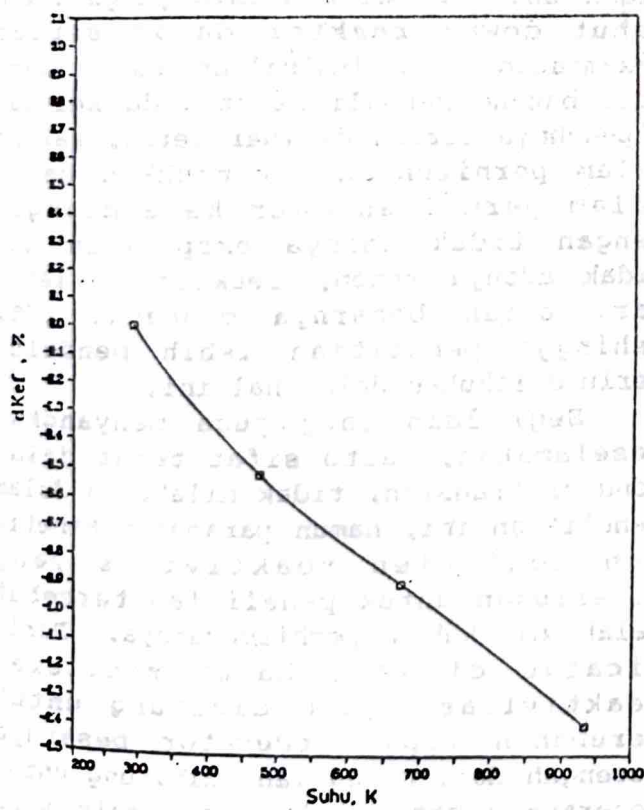
tungan dilakukan satu persatu untuk masing-masing perubahan yaitu perubahan suhu bahan bakar, perubahan suhu moderator, dan perubahan kerapatan moderator. Semua perhitungan dilakukan dengan menggunakan 10 grup energi neutron.

Perubahan besarnya reaktivitas terhadap perubahan suhu bahan bakar tertera pada Gambar 6. Gambar 7 menunjukkan perubahan reaktivitas terhadap perubahan suhu moderator, sedangkan perubahan reaktivitas terhadap kerapatan moderator tertera pada Gambar 8.

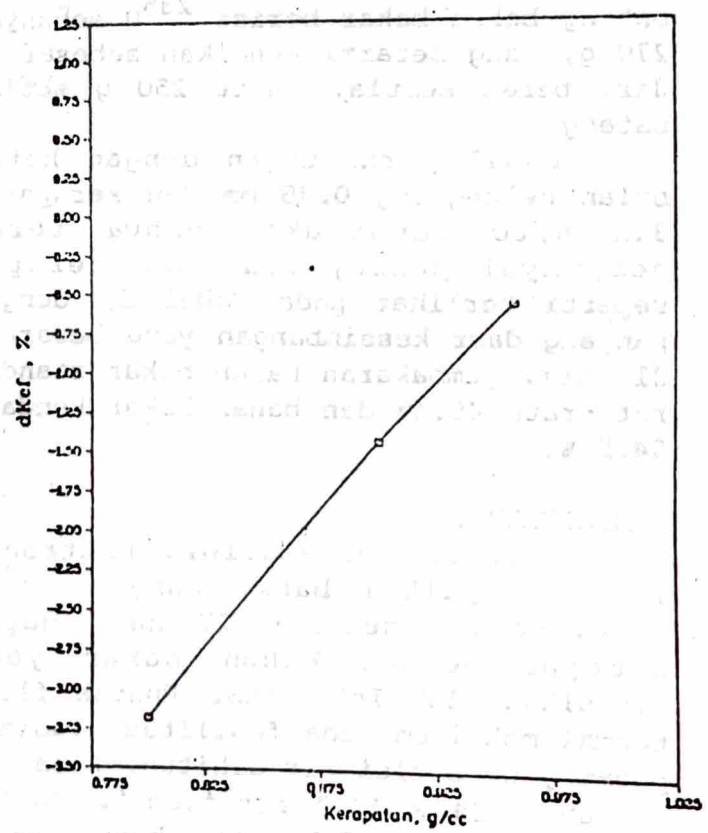
Dari ketiga hasil tersebut di atas terlihat bahwa kenaikan suhu bahan bakar, kenaikan suhu moderator dan penurunan kerapatan moderator, semuanya menyebabkan timbulnya perubahan reaktivitas teras yang negatif.



Gambar 7. Reaktivitas vs suhu moderator



Gambar 6. Reaktivitas vs suhu bh bakar.



Gambar 8. Reaktivitas vs kerapatan moderator.

Bahan bakar dengan kerapatan uranium yang tinggi dan kelongsong yang lebih tebal.

Dengan makin berkembangnya teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir maka makin banyak dikembangkan pembuatan bahan bakar nuklir dengan kerapatan daging uranium yang makin tinggi, terutama untuk bahan bakar nuklir dengan uranium diperkaya rendah (LEU). Bahan bakar yang berupa U_3O_8 -Al telah dapat dibuat dengan kerapatan daging sampai 3.2 g/cc, bahkan diharapkan dalam beberapa tahun mendatang kerapatan dapat dinaikkan sampai 5-7 g/cc. Maka pada analisa teras ini telah pula dilakukan perhitungan dengan kondisi teras yang sama, tetapi dengan mengubah kerapatan daging uranium dari 2.29 g/cc menjadi 3.2 g/cc, dan tebal kelongsong diambil harga minimum yang pada umumnya dewasa ini dipakai dalam reaktor uji material yaitu 0.38 mm. Karena tebal pelat bahan bakar dipertahankan sama, yaitu 1.3 mm, maka tebal daging menjadi 0.54 mm. Dengan ketebalan daging ini setiap batang bahan bakar berisi ^{235}U sebanyak 270 g, yang berarti kenaikan sebesar 8% dari berat semula, yaitu 250 g setiap batang.

Hasil perhitungan dengan ketebalan kelongsong 0.38 mm dan kerapatan 3.2 g/cc menunjukkan bahwa teras mempunyai penampilan yang serupa, seperti terlihat pada Tabel 8, dengan panjang daur keseimbangan yang besarnya 31 hari, pembakaran bahan bakar standar rata-rata 49.4% dan bahan bakar kendali 54.5 %.

KESIMPULAN :

Berdasarkan analisis neutronik ini disimpulkan bahwa panjang daur keseimbangan sebesar 27 hari dapat dicapai dengan bahan bakar yang diusulkan oleh Interatom. Puncak fluks termal maksimum pada fasilitas iradiasi pusat yang berisi air dihitung besarnya adalah 4×10^{14} n.s⁻¹.cm⁻². Jumlah harga batang kendali yang banyaknya 6 buah bila seluruhnya berada di dalam teras besarnya 9.3%. Harga ini dihitung

Tabel 8. Karakteristik Daer Keseimbangan untuk tebal kelongsong 0.38 mm dan kerapatan 3.2 g/cc.

Panjang daur	31.4 hari
k_{ef} mula-mula (BOL)	1.2401
k_{ef} mula daur (BOEC)	1.1005
k_{ef} akhir daur (EOEC)	1.0499
Lintasan	Banyaknya pembakaran (%)
1	53.2
2	55.4
3	49.7
4	51.7
5	50.8
6	48.8
7	56.8

pada teras dengan bahan bakar segar. Untuk teras yang berada dalam keseimbangan dengan sebagian bahan bakar telah terbakar harga batang kendali ini naik sebesar 25% yaitu 11.6%. Namun harga ini diperkirakan tidak cukup untuk menjamin penghentian (shut down) reaktor dalam setiap kesempatan bila dimisalkan salah satu dari batang kendali macet pada keadaan sepenuhnya berada di luar teras, karena dalam perhitungan menunjukkan bahwa dalam permulaan daur keseimbangan dengan tidak adanya eksperimen dan tidak adanya xenon, reaktivitas lebih dari teras besarnya mencapai 10%, sehingga penelitian lebih mendalam perlu dilakukan dalam hal ini.

Segi lain yang juga menyangkut keselamatan, yaitu sifat teras dalam kondisi transien, tidak dilakukan dalam penelitian ini, namun parameter kinetik dan koefisien reaktivitas yang diperlukan untuk penelitian tersebut telah dilakukan perhitungannya. Perlu dicatat di sini bahwa koefisien reaktivitas yang dihitung untuk perubahan rapat moderator besarnya setengah dari harga yang dihitung untuk beberapa reaktor lain dari jenis yang sama, tetapi efeknya sedikit banyak dapat diimbangi oleh umur neutron senyat yang lebih panjang.

Kebanyakan bahan bakar untuk

reaktor uji material yang berbentuk pelat yang dibuat waktu ini menggunakan tebal nominal kelongsong yang besarnya 0.38 mm atau lebih, jadi lebih besar daripada tebal nominal kelongsong 0.30 mm yang diusulkan oleh Interatom. Maka sebagai perbandingan dalam penelitian ini dilakukan pula perhitungan dengan menggunakan bahan bakar dengan kelongsong yang tebalnya 0.38 mm, tetapi dengan ketebalan pelat yang sama, yaitu 1.3 mm, sehingga tebal daging harus dikurangi menjadi 0.54 mm. Rapat uranium yang dipakai dalam perhitungan ini adalah 3.2 g/cc, yang merupakan kerapatan tertinggi yang sudah dapat disediakan oleh pabriknya waktu ini. Dengan mengubah ketebalan kelongsong ini secara neutronik tidak mengubah banyak unjuk kerja dari teras.

DAFTAR PUSTAKA :

1. R.S. Lasijo & J.R. Deen, IAEA Training Report, Argonne National Laboratory, October 1981.
2. W.R. Cobb et al., Advanced Recycle Methodology Program, part II, Chapter 5, October 1975.
3. G.D. Jounou & J.S. Dudek, GAM-1, GA-1850, June 1961.
4. H.C. Honeck, "THERMOS", BNL 5826, September 1961.
5. T.R. England, "CINDER", WAPD-TM-334, Revised June 1964.
6. H. Henryson II, B.J. Toppel, C.G. Sternberg, "MC²-2", ANL-8144, 1976.
7. R.P. Hosteny, The ARC System, Fuel Cycle Analysis Capability, REBUS-2, ANL-7721, 1978.