

VALIDASI PROGRAM DIFUSI NEUTRON STANDARD BATAN DENGAN HASIL EKSPERIMEN PERANGKAT KRITIS HITACHI TRAINING REACTOR

TA Budiono, Tagor M. Sembiring, Zuhair, R. Muhammad Subekti

ABSTRAK

VALIDASI PROGRAM DIFUSI NEUTRON STANDARD BATAN DENGAN HASIL EKSPERIMEN PERANGKAT KRITIS HITACHI TRAINING REACTOR. Telah dilakukan validasi modul perhitungan penyerap kuat dari program difusi neutron standard BATAN, Batan-2DIFF, dengan hasil eksperimen perangkat kritis Hitachi Training Reactor. Modul tersebut menerapkan prinsip syarat batas dalam (*inner boundary condition*) untuk menyelesaikan persamaan difusi di daerah penyerap kuat dengan menggunakan koefisien kehitaman (*blackness coeficient*) atau konstanta derivatif logaritmik. Berdasarkan koefisien kehitaman dan parameter difusi efektif yang dihitung dengan metoda pembobotan sederhana, maka dilakukan perhitungan reaktivitas penyisipan boron di teras Hitachi Training Reactor dengan program Batan-2DIFF. Perbandingan antara reaktivitas hasil perhitungan dengan parameter difusi efektif dan hasil eksperimen memberikan perbedaan relatif 2,00 % - 10,84 %, sedangkan perbandingan antara reaktivitas hasil perhitungan dengan konstanta derivatif dan parameter difusi efektif memberikan perbedaan relatif 1,39 % - 5,88 %. Hasil perbandingan itu mengindikasikan bahwa modul perhitungan penyerap kuat dari program Batan-2DIFF telah bekerja dengan baik.

ABSTRACT

VALIDATION OF BATAN'S STANDARD NEUTRON DIFFUSION PROGRAM WITH EXPERIMENTAL RESULTS ON CRITICAL ASSEMBLY HITACHI TRAINING REACTOR. Validation of strong absorber calculation modul of Batan's Standard Neutron Difusi Program, Batan-2DIFF, has been conducted with experimental results on critical assembly Hitachi Training Reactor. The modul applies inner boundary condition to solve neutron diffusion equation in strong absorber region by means of blackness coefficient or logarithmic derivative constant. Based on the blackness coefficient and effective diffusion parameter calculated by simple weighting method, reactivity calculation of poison sheet insertion in the Hitachi Training Reactor was performed by Batan-2DIFF. The relative difference of effective diffusion parameter-based calculation results and experimental results was 2.00 % - 10.84 %, while effective diffusion parameter-based and logarithmic derivative constant-based calculation results in 1.39 % - 5.88 relative difference. The results indicates that the strong absorber calculation modul of Batan-2DIFF works properly.

PENDAHULUAN

Salah satu persoalan yang sering dihadapi dalam perhitungan reaktor adalah perhitungan reaktivitas penyerap kuat. Adanya penyerap kuat dalam sistem yang dihitung menyebabkan pendekatan teori difusi menjadi tidak berlaku. Hal ini disebabkan karena salah satu asumsi dasar teori difusi adalah tidak adanya penyerap kuat di dalam sistem yang ditinjau.

Untuk mengatasi masalah tersebut, terdapat beberapa pendekatan yang menjadikan teori difusi tetap dapat diberlakukan untuk menghitung reaktivitas penyerap kuat. Diantara pendekatan yang umum dipakai adalah dengan menerapkan syarat batas dalam (*inner boundary condition*) atau dengan parameter difusi efektif.

Program difusi neutron standard BATAN, yaitu Batan-2DIFF menggunakan pendekatan syarat batas dalam untuk menangani perhitungan reaktivitas penyerap kuat [1]. Secara garis besar pendekatan tersebut dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung koefisien kehitaman (*blackness coefficient*) dan selanjutnya koefisien kehitaman itu digunakan untuk menentukan syarat batas dalam. Oleh karena itu, sebelum melakukan perhitungan reaktivitas penyerap kuat, terlebih dahulu harus dihitung koefisien kehitaman. Dalam hal ini metoda pembobotan sederhana [2] yang telah diimplementasikan dalam sebuah rutin [3] digunakan untuk menghitung nilai rerata koefisien kehitaman termal dan epitermal serta parameter difusi efektif yang bersesuaian.

Penelitian ini ditujukan untuk memvalidasi modul perhitungan penyerap kuat dalam program difusi Batan-2DIFF dengan hasil eksperimen perangkat kritis Hitachi Training Reactor (HTR). Nakamura dan Mitsui [4] telah melakukan

eksperimen penentuan reaktivitas berbagai penyerap kuat yang dimasukkan dalam teras HTR. Hasil eksperimen ini akan dipakai sebagai data pembanding dalam validasi program difusi Batan-2DIFF.

TEORI

Di dalam medium penyerap kuat, fluks neutron berubah secara cepat terhadap variabel ruang. Dalam hal seperti ini, anggapan dasar teori difusi menjadi tidak berlaku sehingga teori difusi tidak dapat digunakan untuk menghitung reaktivitas penyerap kuat. Meskipun demikian, teori kehitaman memberikan cara untuk memodifikasi teori difusi biasa (*ordinary*) melalui koefisien kehitaman. Teori difusi yang termodifikasi ini dapat diterapkan untuk menghitung reaktivitas penyerap kuat yang berbentuk papan (*slab*).

Definisi dan Perhitungan Koefisien Kehitaman

Koefisien kehitaman, α and β , diperkenalkan oleh Goldsmith et. al. [5], dan didefinisikan oleh persamaan:

$$\alpha = \frac{J_l + J_r}{\phi_l + \phi_r} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{J_l - J_r}{\phi_l - \phi_r} \quad (2)$$

dimana ϕ_l dan ϕ_r merupakan fluks neutron asimptotis disebelah kiri dan kanan permukaan penyerap dan J 's adalah arus neutron yang mengarah ke papan penyerap (Gambar 1), yang dapat dihitung secara tepat dengan teori ransport.

Untuk papan penyerap kuat ($\Sigma_s = 0$) dengan tebal τ , koefisien kehitaman pada energy E didekati dengan persamaan:

$$\alpha(E) = \frac{1 - 2E_3(z)}{2[1 - 3E_4(z)]} \quad (3)$$

$$\beta(E) = \frac{1 + 2E_3(z)}{2[1 - 3E_4(z)]} \quad (4)$$

dimana

$$z = \Sigma_a(E)\tau \quad (5)$$

dan

$$E_{n+2} = \int_0^1 \mu^n \exp(-z/\mu) d\mu \quad (6)$$

Metoda pembobotan sederhana yang telah diimplementasikan dalam sebuah rutin digunakan untuk menghitung nilai rerata koefisien kehitaman termal dan epitermal serta parameter difusi efektif yang bersesuaian. Untuk kelompok cepat, α dan β dapat dihitung langsung dari tampang lintang rerata sel.

Kelompok epitermal;

$$\langle \alpha \rangle_e = \frac{\int_{0.625}^{5530} \frac{\alpha(E)}{1 + \sqrt{3}\alpha} \cdot \frac{dE}{E}}{\int_{0.625}^{5530} \frac{1}{1 + \sqrt{3}\alpha} \cdot \frac{dE}{E}} \quad (7)$$

$$\langle \beta \rangle_e \approx \frac{1}{4 \langle \alpha \rangle_e} \quad (8)$$

Kelompok termal;

$$\langle \alpha \rangle_t = \frac{\int_0^{0.625} \alpha(E)\phi(E)dE}{\int_0^{0.625} \phi(E)dE} \quad (9)$$

$$\langle \beta \rangle_t \approx \frac{1}{4 \langle \alpha \rangle_t} \quad (10)$$

Spektrum neutron epitermal asimptotis diasumsikan sebagai $1/E$ dalam persamaan 7 dan spektrum neutron termal dalam persamaan 9 dianggap sebagai spektrum Maxwell.

Parameter Difusi Efektif

Teori kehitaman memodifikasi parameter-parameter difusi untuk penyerap kuat, yaitu koefisien difusi D

dan tampang lintang serapan Σ_a . Parameter ini merupakan fungsi dari lebar mesh (h), ketebalan penyerap (τ) dan koefisien kehitaman (α dan β).

$$D = \frac{h}{2}(\alpha + \beta) \frac{\tanh(k\tau)}{\sinh(kh)} \left(\frac{1}{2}(1 + \cosh(kh)) \right) \quad (11)$$

$$\Sigma_a = \frac{2D}{h^2} [\cosh(kh) - 1] \quad (12)$$

dimana

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \left(\frac{\beta^{1/2} + \alpha^{1/2}}{\beta^{1/2} - \alpha^{1/2}} \right) \quad (13)$$

EKSPERIMEN LEMBARAN PENYERAP DI HTR

Validasi modul perhitungan penyerap kuat dilakukan dengan cara membandingkan reaktivitas hasil perhitungan modul tersebut dengan data reaktivitas pengukuran yang telah tersedia. Data tersebut merupakan hasil pengukuran reaktivitas akibat penyisipan penyerap kuat boron di Hitachi Training Reactor. Dari Gambar 2 terlihat bahwa teras tersusun atas 41 perangkat bahan bakar yang ditempatkan dalam kisi 4.8-cm dan dikelilingi oleh reflektor grafit. Masing-masing perangkat terdiri atas 4 batang aluminium berdiameter 0.8-cm yang berisikan pelet-pelet uranium oksida diperkaya 10% (Gambar 3). Panjang efektif perangkat adalah 40.0 cm dan mengandung 74 gram U^{235} . Fraksi volume masing-masing penyusun perangkat bahan bakar dan reflektor ditunjukkan dalam Tabel 1. HTR memiliki 4 batang kendali; satu batang pengatur (*regulating rod*) terbuat dari stainless steel, satu batang shim (*shim rod*) dari boron dan lainnya adalah batang pengaman dari boron. Ukuran batang pengatur adalah 3.0 cm x 4.0 cm x 0.5 cm dan lainnya adalah 4.5 cm x 40.0 cm x 0.5 cm.

Reaktivitas penyerap diukur dengan batang shim, yang dikalibrasi

dengan metoda perioda positif menggunakan $\beta_{\text{eff}} = 0,0082$. Penyerap kuat yang disisipkan berupa lembaran epoksi yang mengandung boron 0.086 g/cm^2 . Ukuran lembaran penyerap adalah $0,2\text{-}0,6\text{-cm}$ tebal, $3,9 \text{ cm}$ lebar dan $20,0 \text{ cm}$ panjang. Sebanyak enam pengukuran dilakukan pada posisi C-3 dan D-3 (Gambar 4) seperti yang tercantum dalam Tabel 2.

LANGKAH PERHITUNGAN

Perhitungan Sel

Perhitungan sel ditujukan untuk membangkitkan konstanta sel, berupa tampang lintang makroskopik bahan bakar dan reflektor. Program WIMS D/4 dipilih untuk perhitungan sel karena WIMS merupakan program kalkulasi sel yang didasarkan atas teori transport, bersifat umum dan mampu menangani berbagai jenis reaktor [6]. Perhitungan sel dikerjakan dalam 4 kelompok energi neutron dengan model *pincell* seperti yang terlihat dalam Gambar 1.

Perhitungan Koefisien Kehitaman dan Parameter Difusi Efektif

Sebuah rutin telah dikembangkan untuk menghitung nilai rerata koefisien kehitaman termal dan epitermal serta parameter difusi efektif yang bersesuaian. Prosedur untuk menentukan koefisien ini terdiri atas tiga langkah utama, yaitu membaca tampang lintang serapan 69 kelompok energi dari pustaka WIMS D/4, perhitungan koefisien kehitaman 69 kelompok diikuti dengan pembobotan untuk memperoleh koefisien kehitaman 4 kelompok, dan terakhir koefisien kehitaman 4 kelompok beserta lebar mesh di dalam papan penyerap serta ketebalan penyerap digunakan untuk menghitung parameter difusi efektif (D dan Σ_a) 4 kelompok.

Perhitungan Reaktivitas Penyerap

Perhitungan reaktivitas akibat penyisipan lembaran penyerap boron ke dalam teras HTR dilakukan dengan program Batan-2DIFF dalam 4 kelompok energi neutron untuk kondisi batang kendali terangkat penuh. Perhitungan dapat dilakukan dengan dua cara: (1) koefisien kehitaman yang telah dihitung diinputkan ke dalam program Batan-2DIFF dengan kartu *DERIVATIVE CONSTANT, (2) parameter difusi efektif diinputkan ke dalam program Batan-2DIFF dengan kartu *CITATION-XS.

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN.

Perhitungan dilakukan untuk masing-masing kasus dengan menggunakan parameter difusi efektif. Kebocoran neutron dalam arah vertikal diwakili dengan buckling aksial yang sebelumnya dihitung dengan program difusi 3 dimensi Batan-3DIFF. Kriteria konvergensi baik untuk $k\text{-eff}$ maupun fluks neutron adalah 10^{-4} .

Table 2 menunjukkan perbandingan antara reaktivitas hasil perhitungan dengan parameter difusi efektif dan data eksperimen. Selisih relatif antara hasil perhitungan dan data eksperimen adalah relatif $2,00\% - 10,84\%$. Tabel 3 memuat perbandingan antara dua cara perhitungan reaktivitas penyerap kuat yang dapat dilakukan oleh Batan-2DIFF, yaitu dengan menggunakan parameter difusi efektif dan konstanta derivatif logaritmik. Selisih relatif antara kedua cara perhitungan adalah $1,39\% - 5,88\%$.

Sebenarnya, hasil perhitungan reaktivitas dengan program Batan-2DIFF akan sangat bergantung kepada ketepatan input data koefisien kehitaman atau konstanta derivatif. Koefisien atau

konstanta ini harus dihitung dengan program lain, yang dalam hal ini menerapkan metoda pembobotan sederhana [7]. Metoda ini mengandung dua faktor yang mengurangi ketepatan hasil perhitungan yaitu (1) koefisien kehitaman yang dinyatakan oleh persamaan 3 dan 4 merupakan pendekatan P_1 yang diterapkan untuk penyerap kuat berbentuk papan ($\Sigma_s = 0$). Pendekatan P_1 merupakan rumus pendekatan terhadap arus neutron yang paling sederhana, (2) spektrum pembobot dalam persamaan 7 dan 9 adalah spektrum kontinu $1/E$ dan Maxwellian yang tidak menggambarkan spektrum neutron di teras secara tepat. Oleh karena itu, reaktivitas hasil perhitungan dengan data input program berupa konstanta derivatif yang dihitung dengan metoda pembobotan sederhana akan mengandung kesalahan bawaan. Dengan demikian validasi modul perhitungan penyerap kuat dengan data eksperimen sulit dilakukan karena terdapat input kesalahan (*error*) yang tidak bisa dihindari.

Meskipun demikian, secara logis validasi program dapat dilakukan dengan prosedur berikut. Pertama, dilakukan perhitungan reaktivitas penyerap dengan menggunakan parameter difusi efektif. Dengan cara ini maka program Batan-2DIFF akan berlaku sebagai program difusi neutron biasa (*ordinary*), dimana modul perhitungan penyerap kuat yang menerapkan prinsip syarat batas dalam tidak berperan dalam perhitungan. Parameter difusi efektif diinputkan ke dalam program Batan-2DIFF dengan kartu *CITATION-XS. Hasil perhitungan selanjutnya dibandingkan dengan data eksperimen dalam Tabel 2. Perbedaan relatif sebesar 2,00 % - 10,84 % menunjukkan bahwa metoda pembobotan sederhana memberikan hasil yang cukup baik. Kedua, dilakukan perhitungan reaktivitas penyerap dengan konstanta derivatif logaritmik

menggunakan kartu *DERIVATIVE CONSTANT. Berdasarkan data konstanta derivatif logaritmik yang diinputkan dengan kartu tersebut maka modul perhitungan penyerap kuat akan menentukan syarat batas dalam dan selanjutnya menghitung reaktivitas penyerap. Tabel 3 memuat perbandingan antara kedua cara perhitungan penyerap dan diperoleh selisih relatif sebesar 1,39 % - 5,88 %. Selisih yang cukup kecil antara kedua cara perhitungan merupakan indikasi bahwa modul perhitungan penyerap kuat di dalam program Batan-2DIFF bekerja secara baik.

KESIMPULAN

Perbandingan antara reaktivitas hasil perhitungan dengan parameter difusi efektif dan hasil eksperimen memberikan perbedaan relatif 2,00 % - 10,84 %, sedangkan perbandingan antara reaktivitas hasil perhitungan dengan konstanta derivatif dan parameter difusi efektif memberikan perbedaan relatif 1,39 % - 5,88 %. Hasil perbandingan itu mengindikasikan bahwa modul perhitungan penyerap kuat dari program Batan-2DIFF telah bekerja dengan baik

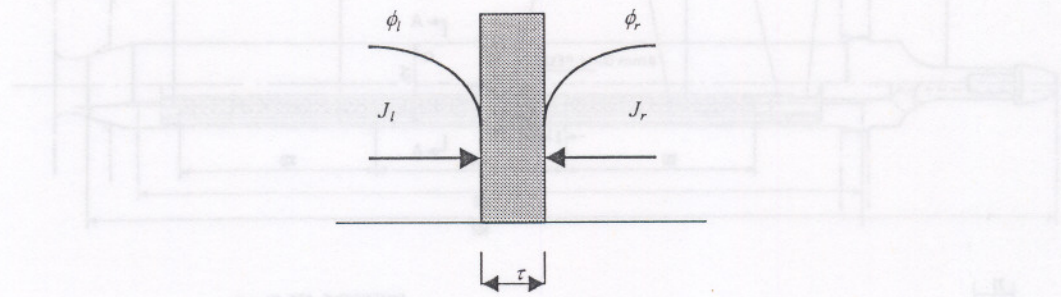
UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Dr. Liem Peng Hong serta staf Bidang Fisika Reaktor atas diskusi dan sumbangan pemikiran yang sangat membantu dalam penyelesaian penelitian dan penulisan makalah ini.

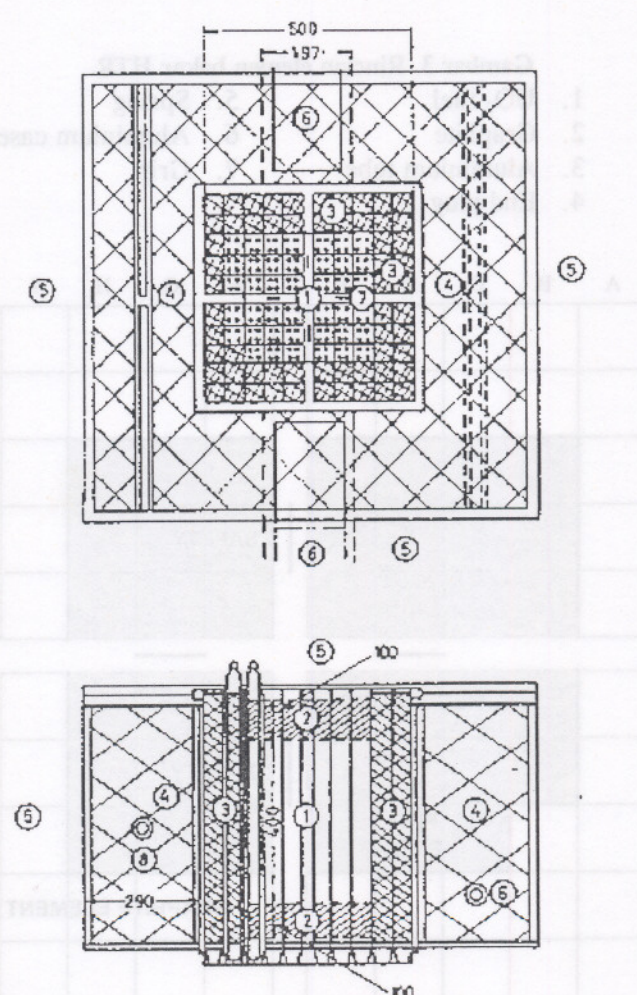
DAFTAR PUSTAKA

1. LIEM, P.H., *Validation of Batan's Standard Neutron Diffusion Codes for Control Rod Worth Analysis*, Atom Indonesia, Vol. 23, No. 2, Jakarta, 1997
2. HENRY, A.F., *A Theoretical Method for the Determining of the Worth of Control Rods*, USAEC Report. WAPD-218, 1959
3. BUDIONO, T.A., *Calculation Of Blackness Coefficients Using Simple Weighting Method*, Seminar Reaktor Temperatur Tinggi dan Teknologi Nuklir, 1998/1999
4. NAKAMURA, S., MITSUI, H., *Calculations and Experiments on The Poison Sheet Reactivity in The Hitachi Training reactor*, Physics and Material Problems of Reactor Control Rods
5. GOLDSMITH, M., JONES, R.T., RYAN, T.M., KAPLAN, S., VOOHIS, A.D., *Theoretical Analysis of Highly Enriched Light Water Moderated Critical Assemblies*, Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Vol. 12, pp. 534-445, United Nations, Geneva, 1958
6. ASKEW, J.R., FAYERS, F.J., KEMSHALL, P.B., *A General Description of the Lattice Code WIMS*, Journal of the British Nuclear Energy Society, Vol. 5 No. 4., 1966.
7. HENRY, A.F., *A Theoretical Method for the Determining of the Worth of Control Rods*, USAEC Report. WAPD-218, 1959

LAMPIRAN

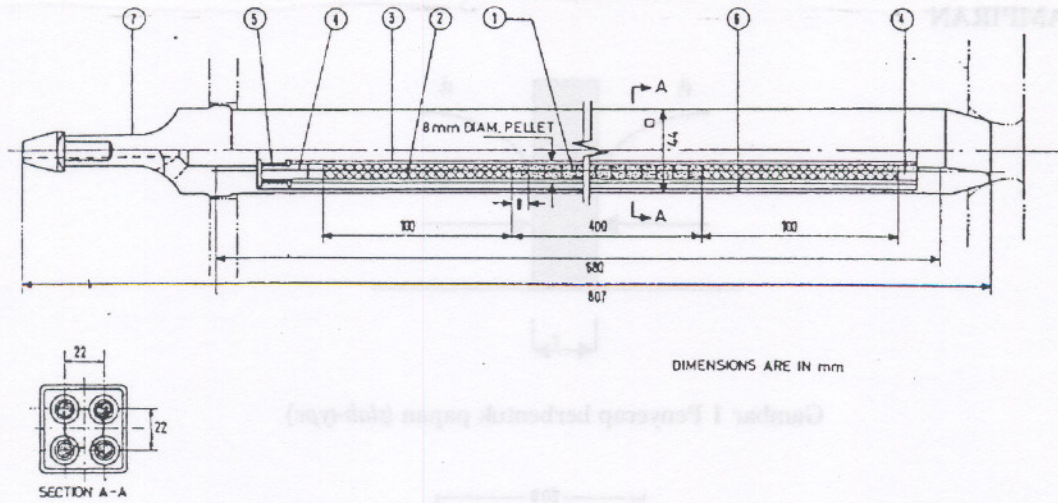


Gambar 1 Penyerap berbentuk papan (*slab-type*)



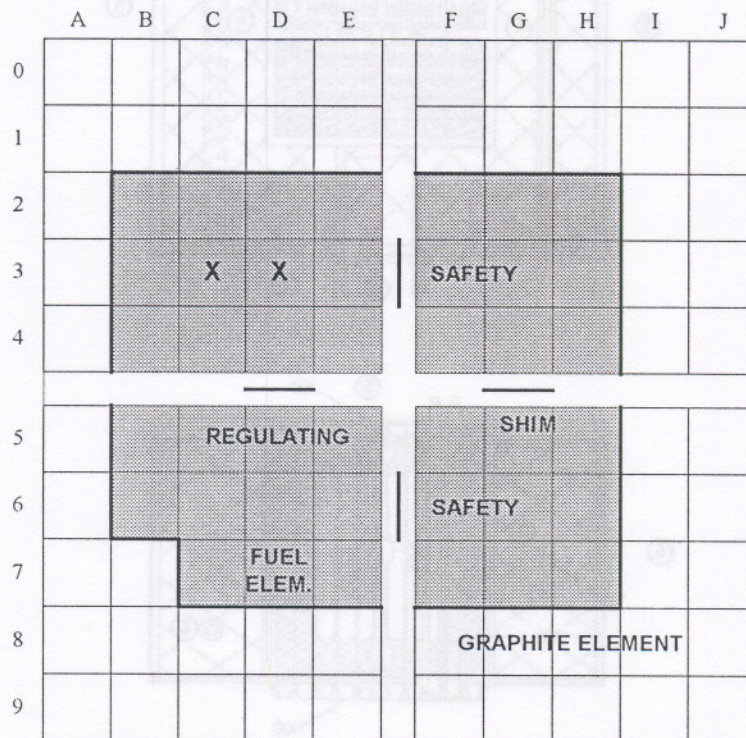
Gambar 2 Konfigurasi teras dan reflektor HTR

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| 1. Core | 5. Light Water |
| 2. Reflector | 6. Beam port |
| 3. Reflector element | 7. Control rods |
| 4. Graphite reflector | 8. Pneumatic tubes |

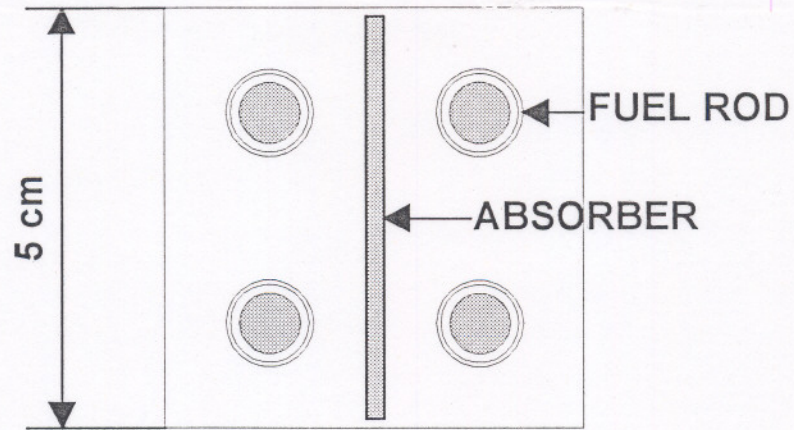


Gambar 3. Rincian elemen bakar HTR

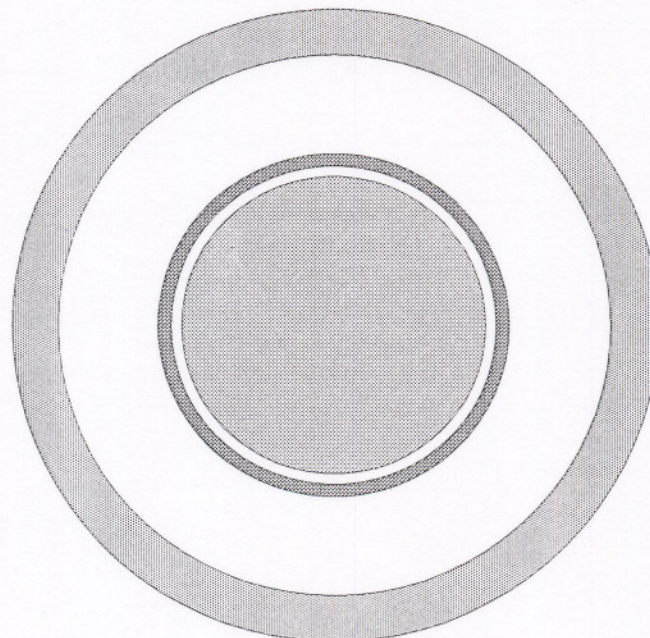
- | | |
|-------------------------|-------------------|
| 1. UO ₂ fuel | 5. Spring |
| 2. Graphite | 6. Aluminium case |
| 3. Aluminium tube | 7. Grip |
| 4. End plug | |



Gambar 4. Konfigurasi teras referensi HTR



Gambar 5 Posisi penyerap di dalam perangkat bahan bakar HTR



- Fuel: $r_F = 0.4 \text{ cm}$
- Gas gap: $r_G = 0.41018 \text{ cm}$
- Cladding: $r_C = 0.46738 \text{ cm}$
- Moderator: $r_M = 1.18634 \text{ cm}$
- Extra region: $r_E = 1.35402 \text{ cm}$

Gambar 6 Model pincell untuk perhitungan sel bahan bakar HTR