

## VERIFIKASI RANCANGAN REAKTOR MAJU ANALISIS UNJUK KERJA KISI BAHAN BAKAR

Hilman Ramli, As Natio Lasman  
Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

### ABSTRACT

**DESIGN VERIFICATION OF ADVANCED REACTOR. FUEL LATTICE PERFORMANCE ANALYSIS.** The neutronics analysis of fuel performance of the advanced reactor, has been successfully done with the computer simulation. In this case, the AP600 reactor, one of a few advanced reactor types, was chosen as an object. The analysis was limited on the fuel lattice characteristics to get connections between the infinity multiplication factor and the atomic ratio of moderator to fuel, and also to determine the characteristic of the moderator temperature coefficients. The simulations were done with using of WIMS-D4 code and assumed that core is regularly arranged by homogeneous cell units within cold, clean, unborated conditions only. The results showed that AP600's fuel lattice has undermoderated behavior and the moderator temperature coefficients are negative and agreed in safety aspects of nuclear reactor operations.

### ABSTRAK

**VERIFIKASI RANCANGAN REAKTOR MAJU. ANALISIS UNJUK KERJA KISI BAHAN BAKAR.** Telah dilakukan analisis neutronik dengan simulasi komputer terhadap unjuk kerja bahan bakar reaktor maju. Dalam kasus ini, dipilih reaktor AP600 sebagai obyek. Analisis dibatasi pada tinjauan karakteristik parameter kisi bahan bakar untuk mendapatkan hubungan di antara faktor pelipatan tak-hingga dengan nisbah atom moderator terhadap atom bahan bakar, dan juga untuk menentukan karakteristik koefisien reaktivitas suhu moderator. Simulasi dilakukan dengan menggunakan program WIMS-D4 dan teras reaktor dianggap tersusun dari satuan-satuan sel bahan bakar yang tercampur serba-sama pada keadaan reaktor dibatasi hanya pada keadaan dingin, tanpa xenon, dan tanpa boron terlarut dalam air. Dari hasil analisis, diperoleh bahwa kisi bahan bakar AP600 bersifat *undermoderated*, dengan koefisien reaktivitas suhu moderator berharga negatif. Dapat disimpulkan bahwa rancangan bahan bakar AP600 memenuhi aspek keselamatan operasi reaktor nuklir.

### PENDAHULUAN

Sejak lebih dari satu dasawarsa yang lalu, BATAN telah merencanakan pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) yang pertama di Indonesia. Kajian dilakukan, baik dari sisi ekonomi maupun keselamatan, terhadap tipe-tipe PLTN yang sudah beroperasi di dunia atau yang ditawarkan oleh pemasok. Untuk itu, studi kelayakan dan studi tapak untuk lokasi PLTN dikerjakan.

Berangkat dari rencana BATAN dan sebagai usaha lebih lanjut dari kegiatan-kegiatan tersebut di atas, penelitian dan kajian dari sisi teknik perancangan (*design*) untuk tipe PLTN tertentu perlu dilakukan. Atas dasar itulah, penelitian ini dilakukan, dengan reaktor

AP600 dipilih sebagai bahan penelitian dan pengkajiannya.

Penelitian dan pengkajian kriteria rancangan suatu reaktor meliputi banyak hal, sejak dari unjuk kerja bahan bakar sampai unjuk kerja reaktor keseluruhan dengan satu sasaran, yaitu menganalisis dan menilai tingkat keselamatan reaktor yang ditinjau. Karena banyaknya kriteria yang perlu diteliti dan dikaji, maka pada umumnya penelitian perlu dilakukan secara bertahap.

Menurut H.W. Graves, Jr.[1], perancangan suatu reaktor nuklir pada umumnya diawali dari perancangan bahan bakarnya. Tahapan pertama dalam perancangan bahan bakar reaktor secara normal terdiri dari kajian terhadap hubungan

antara karakteristik unjuk kerja reaktor dengan parameter-parameter kisi bahan bakar, dan pemilihan terhadap kombinasi parameter-parameter kisi yang memenuhi kriteria rancangan yang terbaik. Dengan menganalisis interaksi antara karakteristik unjuk kerja reaktor dan parameter-parameter rancangan kisi bahan bakar, maka akan dapat dipahami kriteria rancangan manajemen bahan bakar dan operasi reaktor tersebut. Berdasarkan konsep tersebut, maka penelitian ini dilakukan dengan membatasi pokok permasalahan yang dianalisis hanya pada unjuk kerja kisi bahan bakar AP600.

Analisis unjuk kerja kisi bahan bakar AP600 yang dilakukan, dilaksanakan dengan cara simulasi pada komputer dan mempergunakan program WIMS-D4 untuk perhitungan yang dilakukan. Deskripsi tentang program WIMS-D4 dapat dilihat pada acuan [2] dan [3]. Dalam perhitungan, reaktor didekati sebagai satuan-satuan sel bahan bakar homogen yang terdiri dari daerah bahan bakar, sela (*gap*), kelongsong, moderator dan daerah ekstra [1], [3].

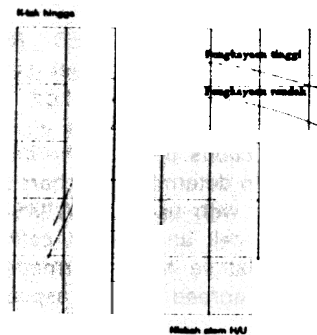
## TEORI

Bahan bakar di dalam teras reaktor nuklir disusun dalam barisan geometris yang teratur. Untuk reaktor air ringan bertekanan atau didihan (PWR atau BWR), barisan bahan bakar ini terdiri dari batang bahan bakar silindris dengan kelongsong Zircaloy yang diletakkan dalam air dan diatur dalam barisan persegi. Barisan ini biasanya dinyatakan sebagai kisi (*lattice*) reaktor, dan diameter batang bahan bakar, jarak antara pusat batang bahan bakar (*pitch*), bahan dan ketebalan kelongsong, serta volume air di antara batang bahan bakar dinyatakan sebagai parameter-parameter kisi.

### Nisbah Antara Moderator dan Bahan Bakar

Air di antara batang bahan bakar berfungsi sebagai zalir (*fluid*) kerja

dalam sistem pembawa panas dan sebagai bahan moderator untuk perlambatan neutron. Dari segi sebagai bahan moderator, perlu diketahui harga nisbah atom hidrogen terhadap atom bahan bakar (atom  $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$ ) yang merupakan fungsi kerapatan air, kerapatan bahan bakar dan geometri kisi.



Gambar 1. Kurva  $k_{\infty}$  versus  $N^H/N^U$  untuk dua jenis pengkayaan.

Nisbah atomik moderator terhadap bahan bakar mempengaruhi faktor perlipatan neutron dalam sistem. Tinjau persamaan faktor perlipatan neutron untuk sistem tak-berhingga [4]:

$$k_{\infty} = \eta \cdot f \quad (1)$$

dengan

$$\eta = \frac{\nu \sum_f^F}{\sum_a^F} \quad (2)$$

$$f = \frac{\sum_a^F}{\sum_a^M} = \frac{N^F \sigma_a^F}{N^M \sigma_a^M} \quad (3)$$

sehingga

$$k_{\infty} = \frac{N^F}{N^M} \frac{\nu \sigma_f^F}{\sigma_a^M} \quad (4)$$

Dengan  $N^M/N^F$  meningkat, neutron akan lebih banyak termoderasi sehingga fraksi neutron yang mencapai energi termal bertambah. Dengan neutron termal meningkat, lebih banyak fisi yang terjadi dalam bahan bakar sehingga  $k_{\infty}$  menjadi lebih besar. Meskipun demikian, harga  $N^M/N^F$  yang besar menyebabkan fraksi neutron termal yang diserap oleh moderator juga bertambah. Sehingga, dengan  $N^M/N^F$  bertambah besar,  $k_{\infty}$

meningkat hingga ke suatu harga  $N^M/N^F$  di mana neutron termal cenderung menjadi jenuh dan  $k_{\infty}$  kemudian berkurang karena bertambahnya serapan neutron termal dalam moderator.

Perubahan harga  $k_{\infty}$  terhadap perubahan harga nisbah moderator/bahan bakar dapat dilihat pada Gambar 1. Grafik pada Gambar 1 merupakan grafik yang digunakan untuk meninjau unjuk kerja parameter kisi bahan bakar. Kisi bahan bakar untuk nisbah moderator/bahan bakar yang terletak di bagian kiri puncak grafik dinyatakan sebagai *undermoderated* dan di kanan puncak grafik dinyatakan sebagai *overmoderated*.

Seluruh reaktor dengan moderator air adalah bersifat *undermoderated* pada kondisi operasi daya. Karena, didasarkan pada aspek keselamatan reaktor, reaktor *undermoderated* akan mempunyai koefisien reaktivitas suhu negatif. Dengan daya reaktor naik, suhu air meningkat yang mengakibatkan kerapatan air berkurang lebih cepat daripada kerapatan bahan bakar atau struktur sehingga  $N^H/N^U$  berkurang. Dengan pengurangan  $N^H/N^U$ ,  $k_{\infty}$  akan berkurang, suatu konsekuensi yang diinginkan dari titik dasar keselamatan operasi. Sebaliknya untuk reaktor *overmoderated*,  $k_{\infty}$  akan bertambah dengan suhu moderator bertambah, sehingga memperbesar pembangkitan panas dalam reaktor. Hal ini tidak dikehendaki dalam operasi reaktor karena tidak memenuhi kriteria keselamatan melekat (*inherently safety*) pada reaktor.

Di samping itu, reaktor air ringan dirancang untuk bersifat *undermoderated* karena lebih ekonomis. Nilai  $N^H/N^U$  yang rendah akan memperbesar nisbah konversi, menyebabkan lebih banyak  $^{239}\text{Pu}$  yang dihasilkan. Karena  $^{239}\text{Pu}$  dapat menyebabkan fisi, peningkatan  $^{239}\text{Pu}$  dalam reaktor akan menurunkan biaya susutan (*depletion cost*).

## Pengaruh Tingkat Pengkayaan Bahan Bakar

Perubahan tingkat pengkayaan bahan bakar mempengaruhi besar dan bentuk kurva  $k_{\infty}$  terhadap  $N^H/N^U$  seperti pada Gambar 1. Untuk tingkat pengkayaan yang lebih tinggi, kandungan isotop fisil dalam bahan bakar akan lebih banyak sehingga serapan relatif di dalam moderator akan berkurang. Konsekuensinya, harga  $k_{\infty}$  akan lebih besar daripada tingkat pengkayaan yang rendah untuk harga  $N^H/N^U$  yang sama.

Perubahan tingkat pengkayaan memainkan peranan penting, baik dalam kriteria rancangan maupun operasi reaktor. Dalam perancangan reaktor, dengan menjaga kompatibilitas mekanis terhadap rancangan internal teras reaktor, lebih mudah 'memainkan' tingkat pengkayaan bahan bakar untuk mendapatkan unjuk kerja bahan bakar terbaik daripada 'memainkan' diameter batang bahan bakar ataupun jarak antara batang bahan bakar [1]. Di samping itu, dalam pengoperasian reaktor, tingkat pengkayaan memegang peranan dalam pengaturan agihan daya agar didapatkan agihan yang relatif rata di semua posisi teras.

## METODE DAN BATASAN-BATASAN PERHITUNGAN

Analisis ini dilakukan dengan metode simulasi komputer menggunakan program perhitungan konstanta group WIMS-D4. Data-data yang digunakan dalam perhitungan diambil dari pustaka untuk reaktor AP600 (lampiran 1) [5]. Perhitungan yang dilakukan meliputi :

1. Penentuan model sel kisi bahan bakar.
2. Perhitungan  $k_{\infty}$  dengan volume moderator divariasikan.
3. Perhitungan  $k_{\infty}$  dengan volume pelet divariasikan.
4. Perhitungan  $k_{\infty}$  dengan suhu moderator divariasikan.

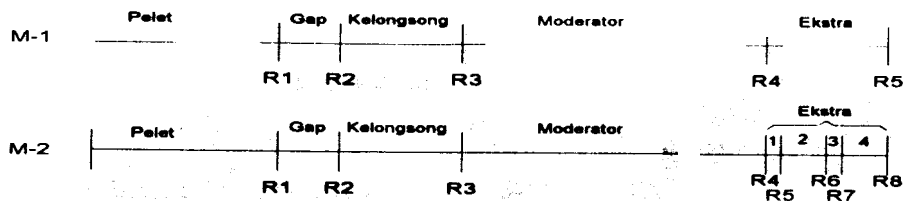
Penentuan model sel dilakukan untuk mendapatkan model sel yang akan dipakai dan

mudah divariasikan pada perhitungan-perhitungan selanjutnya. Dalam perhitungan ini, ditinjau 3 model sel yang mungkin :

1. Model M-1 : daerah ekstra dalam sel diasumsikan sebagai bahan yang tercampur secara homogen dan sel diperlakukan sebagai *pin-cell* dalam WIMS-D4.

2. Model M-2 : daerah ekstra dalam sel diasumsikan tercampur heterogen dan sel diperlakukan sebagai *pin-cell* dalam WIMS-D4.

3. Model M-3 : sel diperlakukan sebagai *cluster* dalam WIMS-D4.



Gambar 2. Model sel yang digunakan (model M-1 dan M-2)

Tabel 1. Data geometri dan komposisi bahan dalam sel (untuk penkayaan 3.0 % <sup>235</sup>U)

Jari-jari luar	Model M-1	Model M-2	Komposisi (% berat)	Model M-1	Model M-2
R1	0.410	0.410	1. Pelet <sup>235</sup> U <sup>238</sup> U O	2.64 85.35 11.83	2.64 85.35 11.83
R2	0.418	0.418			
R3	0.475	0.475			
R4	0.711	0.711			
R5	0.743	0.712			
R6	-	0.731	2. Gap He (asumsi)	100	100
R7	-	0.736			
R8	-	0.743			
			3. Kelongsong Zircaloy-4	100	100
			5. Moderator H <sub>2</sub> O	100	100
			6. Daerah ekstra H <sub>2</sub> O Zircaloy-4	60.02	100 (2 dan 4)
				39.98	100 (1 dan 3)

Tabel 2. Hasil Perhitungan k<sub>∞</sub> untuk model sel yang ditinjau.

	Westinghouse	Model M-1	Model M-2	Model M-3
k <sub>∞</sub>	1.394	1.396807	1.396894	1.392926
Deviasi <sup>*)</sup> (%)	-	0.201	0.208	-0.066

$$^*) \text{Deviasi} = \frac{k_{\text{model}} - k_{\text{Westinghouse}}}{k_{\text{Westinghouse}}} * 100\%$$

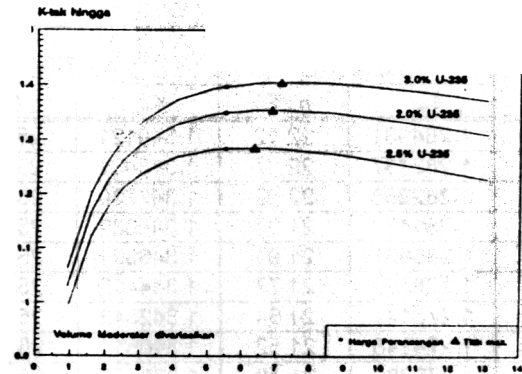
Data geometri model sel M-1 dan M-2 dapat dilihat pada Gambar 2 dan Tabel 1. Sedangkan untuk model M-3, data geometrinya sama seperti pada perangkat bahan bakar (*fuel assembly*) AP600 (lampiran 2).

Perhitungan  $k_{\infty}$  dengan volume moderator atau volume pelet bervariasi dilakukan untuk mendapatkan kurva  $k_{\infty}$  versus Nisbah  $N^H/N^U$ . Sedangkan perhitungan keempat dilakukan untuk mendapatkan karakteristik koefisien suhu moderator. Perhitungan 1 sampai 3 diperlakukan untuk keadaan reaktor *clean, cold, unborated*.

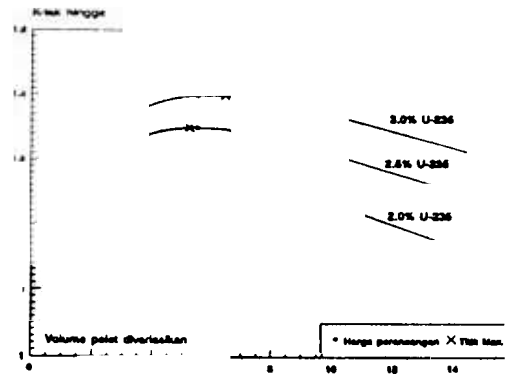
### HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan untuk penentuan model sel disajikan dalam Tabel 2. Hasil perhitungan menunjukkan model M-3 memberikan hasil yang mendekati nilai yang disajikan oleh Westinghouse dengan deviasi sebesar -0.066% terhadap nilai rancangan Westinghouse. Hal ini dapat dipahami karena model M-3 lebih mampu menggambarkan perilaku reaksi neutron di dalam *cluster*. Meskipun demikian, dengan pertimbangan kemudahan untuk memvariasikan besaran-besaran parameter kisi dan dengan deviasi terhadap nilai rancangan Westinghouse yang relatif kecil (0.201%), dipilih model M-1 sebagai model sel untuk perhitungan-perhitungan selanjutnya.

Hasil dari perhitungan kedua ditampilkan dalam Gambar 3. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa AP600 bersifat *undermoderated*. Dari perhitungan yang keempat, yang hasilnya diberikan pada Tabel 3, diperoleh karakteristik koefisien reaktivitas suhu moderator untuk AP600 yang bernilai negatif. Kedua hasil tersebut memberikan gambaran bahwa AP600 memenuhi aspek keselamatan operasi dan mempunyai karakteristik keselamatan melekat, suatu hal yang diharapkan dari segi operasi reaktor.



Gambar 3. Kurva  $k_{\infty}$  vs  $N^H/N^U$  dengan volume moderator divariasikan.



Gambar 4. Kurva  $k_{\infty}$  vs  $N^H/N^U$  dengan volume pelet divariasikan.

Pada perhitungan ketiga, yang hasilnya ditampilkan pada Gambar 4, harga rancangan dari perhitungan terletak di daerah *overmoderated* dan dekat titik puncak kurva untuk tingkat pengkayaan 2.0% dan 2.5%. Sedangkan tingkat pengkayaan 3.0% masih terletak di daerah *undermoderated*, meskipun mendekati titik puncak kurva. Dalam kasus ini, karakteristik *overmoderated* dapat diabaikan karena pengaruh perubahan diameter batang bahan bakar (setara dengan perubahan volume pelet) terhadap faktor perlipatan tak-hingga relatif kecil dibandingkan efek yang ditimbulkan dari perubahan volume moderator [1].

Tabel 3. Perubahan  $k_{\infty}$  terhadap perubahan suhu moderator.

Suhu °F	2.0% <sup>235</sup> U		2.5% <sup>235</sup> U		3.0% <sup>235</sup> U	
	$k_{\infty}$	$\rho$ (%)	$k_{\infty}$	$\rho$ (%)	$k_{\infty}$	$\rho$ (%)
68.0	1.284031	22.12	1.349121	25.88	1.396807	28.41
104.0	1.283137	22.07	1.348437	25.84	1.396237	28.38
140.0	1.282293	22.02	1.347739	25.80	1.395671	28.35
176.0	1.281421	21.96	1.347032	25.76	1.395090	28.32
212.0	1.280567	21.91	1.346321	25.72	1.394514	28.29
302.0	1.278290	21.77	1.344412	25.62	1.392857	28.21
392.0	1.276141	21.64	1.342543	25.52	1.391248	28.12
482.0	1.274148	21.52	1.340811	25.42	1.389722	28.04
572.0	1.272289	21.40	1.339175	25.33	1.388249	27.97
$\rho_{2n}(T) = 0.22219E+02 - 0.11897E-02.T \rightarrow \alpha_T = -0.11897E-02$ $\rho_{25}(T) = 0.25957E+02 - 0.13411E-02.T \rightarrow \alpha_T = -0.13411E-02$ $\rho_{3n}(T) = 0.28488E+02 - 0.16136E-02.T \rightarrow \alpha_T = -0.16136E-02$						

#### KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan yang diperoleh, dapat disimpulkan :

1. Model sel yang digunakan untuk perhitungan  $k_{\infty}$  memberikan hasil yang sesuai dengan nilai yang diberikan oleh Westinghouse.

2. Kisi bahan bakar AP600 bersifat *undermoderated* dengan koefisien suhu moderator mempunyai harga negatif sehingga memenuhi aspek keselamatan dalam operasi reaktor.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Harvey W. Graves Jr., Nuclear Fuel Management, John Wiley & Sons, 1977.
2. J.R. Askew, F.J. Fayers, P.B. Kemshell, A General Description of the Lattice Code WIMS, Reprinted from the October issue of the Journal of the British Nuclear Energy Society, Diklat Regional Training Course on Calculation and Measurement of Neutron Flux Spectrum for Research Reactor, 27 September-15 Oktober 1993, PRSG-BATAN, Serpong.
  3. T. Kulikowska, Lattice Cell Calculations, Slowing Down Theory and Computer Code WIMS, Diklat Regional Training Course on Calculation and Measurement of Neutron Flux Spectrum for Research Reactor, 27 September-15 Oktober 1993, PRSG-BATAN, Serpong.
  4. J.J. Duderstadt, L.J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons, 1976
- Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program, AP600 Standard Safety Analysis Report, 4th Volume, DE-AC03-90SF18495, Westinghouse Electric Corporation, June 26, 1992.

Lampiran 1

**DESKRIPSI PARAMETER TERAS REAKTOR AP600 (Siklus Pertama) [6]**

**Teras aktif**

Diameter ekuivalen (in.)	115.0
Tinggi teras aktif (in.), cold	144.0
Nisbah tinggi terhadap diameter	1.25
Total luasan melintang (ft <sup>2</sup> )	72.17
Nisbah molekuler H <sub>2</sub> O/U, sel, cold	2.40

**Ketebalan dan komposisi reflektor**

Atas: water plus steel (in.)	10.0
Bawah : water plus stell (in.)	10.0
Samping : primarily steel plus water (in)	15.0

**Perangkat bahan bakar (fuel assembly)**

Jumlah	145
Barisan batang bahan bakar	17 x 17
Batang bahan bakar per perangkat	264
Jarak antara titik pusat batang bahan bakar ( <i>pitch</i> ) (in.)	0.496
Dimensi keseluruhan (in.)	8.426 x 8.426

**Jumlah grid per perangkat**

Atas dan bawah (ni-Cr-Fe Alloy 718)	2
Intermediete (Zircaloy-4)	7 atau 7 ZIRLO™
Intermediate flow mixing (Zircaloy-4)	4 atau 4 ZIRLO™

**Guide thimble :**

Jumlah per perangkat	24
Komposisi	Zircaloy-4 atau ZIRLO™
Diameter, bagian teratas (in.)	0.442 ID x 0.474 OD
Diameter, bagian terbawah (in.)	0.397 ID x 0.430 OD

**Instrument guide thimble :**

Jumlah per perangkat	1
Komposisi	Zircaloy-4 atau ZIRLO
Diameter (in.)	0.442 ID x 0.474 OD

**Batang bahan bakar (fuel rod)**

OD (in.)	0.374
Gap diametris (in.)	0.00325
Tebal kelongsong (in.)	0.0225
Material kelongsong	Zircaloy-4 atau ZIRLO™

**Pelet bahan bakar**

Material	UO <sub>2</sub>
Kerapatan (% kerapatan teoritis)	95

Pengkayaan bahan bakar (% berat)	
Daerah/Region 1	2.00
Daerah/Region 2	2.50
Daerah/Region 3	3.00
Diameter (in.)	0.3225
Panjang (in.)	0.387
Massa UO <sub>2</sub> per satuan panjang batang bahan bakar (lb/ft)	0.364

**Perangkat batang kendali pengatur (RCCA=Rod Cluster Control Assembly)**

Material penyerap neutron	Ag-In-Cd
Diameter (in.)	0.341
Kerapatan (lb/in. <sup>3</sup> )	Ag-In-Cd 0.367
Material kelongsong	SS-304
Tebal kelongsong (in.)	0.0185
Jumlah cluster	45
Jumlah batang penyerap per cluster	24

**Perangkat batang kendali kompensasi (GRCA=Gray Rod Cluster Assembly)**

Material penyerap neutron	Ag-In-Cd / SS-304
Diameter (in.)	0.341
Kerapatan (lb/in. <sup>3</sup> )	Ag-In-Cd 0.367 / SS-304 0.285
Material kelongsong	SS-304
Tebal kelongsong (in.)	0.0185
Jumlah cluster	16
Jumlah batang penyerap per cluster	4 Ag-In-Cd / 20 SS-304

**Penyerap dapat bakar (burnable absorber)**

Jumlah	1424
Tipe	WABA
Material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -B <sub>4</sub> C
OD (in.)	0.381
Tabung dalam, OD (in.)	0.267
Material kelongsong	Zircaloy
Material tabung dalam ( <i>inner tube</i> )	Zircaloy
Kandungan B <sup>10</sup> (Mg/cm)	6.03

**Reaktivitas**

**Reaktivitas lebih (tanpa satuan)**

k <sub>max</sub> maksimum untuk perangkat bahan bakar (cold, clean, unborated water)	1.394
Reaktivitas teras maksimum (cold, zero power, BOC, zero soluble boron)	203

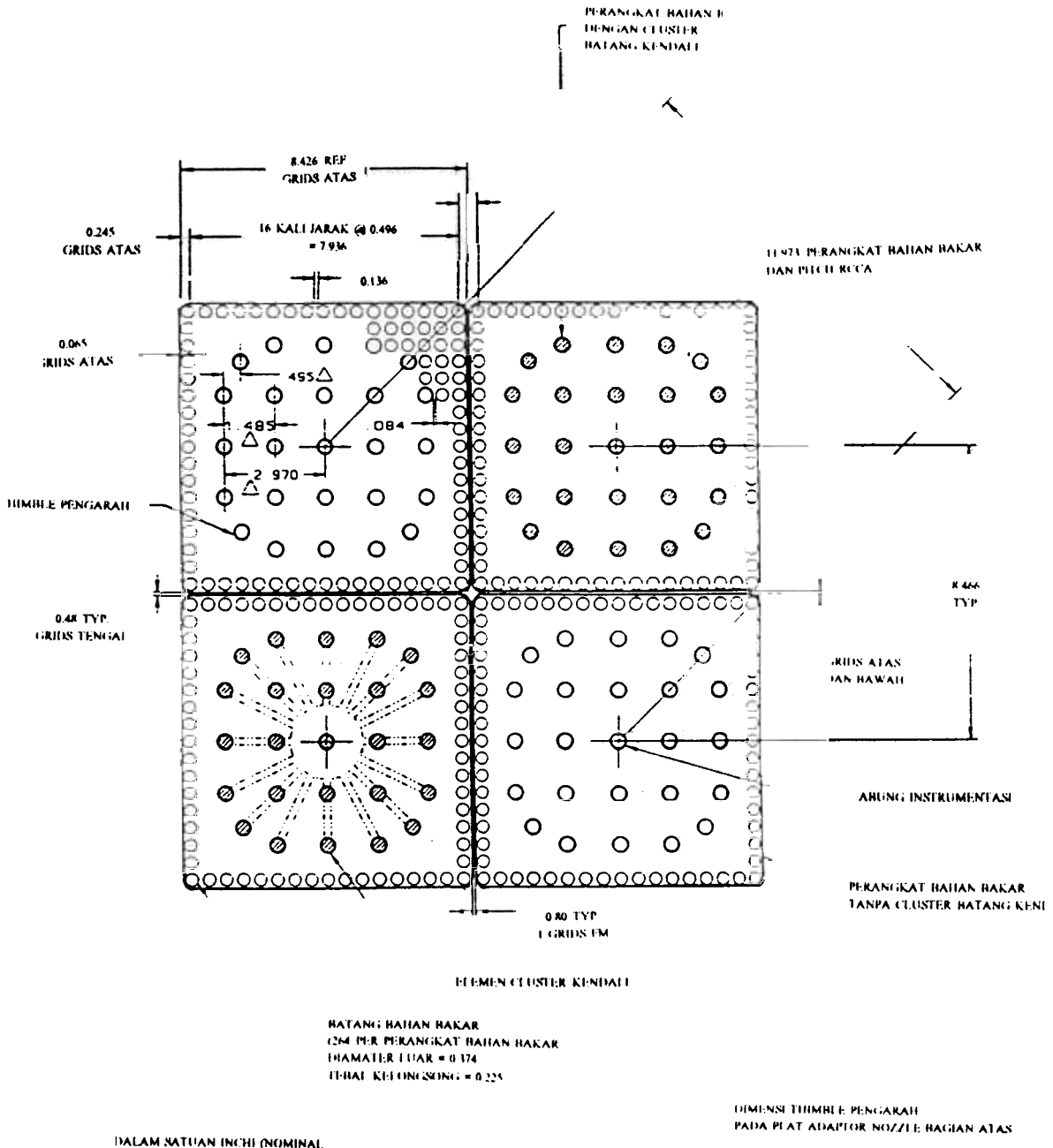
**Reaktivitas padam (%)**

a. Seluruh RCCA dan GRCA (61 cluster) disisipkan (BOC)	10.99
b. Satu cluster paling kuat di keluarkan, 60 cluster disisipkan (BOC)	8.46



Lampiran 2.

Tampang lintang perangkat bahan bakar AP600 [5]



## DISKUSI

Penanya : Utaja

- a. Apakah keadaan boron sudah dipertimbangkan ?
- b. Kapan koefisien reaktivitas moderator menjadi positif ?

Jawaban

- a. Keadaan boron tidak dipertimbangkan. Perhitungan hanya meninjau sistem pada keadaan clean, cold, unborated.
- b. Koefisien reaktivitas suhu moderator menjadi positif pada kondisi  $N^H/N^U$  yang besar. Kondisi  $N^H/N^U$  (sebagai fungsi geometri, densitas pendingin dan bahan bakar) dapat membesar bila :

- geometri sistem berubah : volume moderator >> dari volume bahan bakar,
- adanya boron di dalam sistem.

Untuk sistem PWR, perubahan suhu yang ekstrim (yang menyebabkan terjadinya didihan) tidak terjadi. Tetapi pada BWR, perubahan ini dapat mempengaruhi koefisien reaktivitas suhu moderator karena terbentuknya didihan pada sistem.

2. Penanya : Arief H. Kuncoro

- a. Program WIMS-D4 dapat dipakai untuk simulasi apa saja ?
- b. Bagaimana tingkat keakuratan hasil simulasi dengan program tersebut ?

Jawaban

- a. Program WIMS-D\$ dapat digunakan untuk simulasi "cell calculation". Tujuan dari program tersebut sebenarnya adalah generasi konstanta group yang akan digunakan pada perhitungan teras dengan program CITATION atau UM2DB. Sehingga secara umum, WIMS-D\$ dapat digunakan untuk simulasi satuan sel bahan bakar.
- b. Tingkat akurasi hasil simulasi dapat dipercaya. Ini didasarkan hasil benchmark test untuk program tersebut yang ada di RSG. Test ini dilakukan oleh sdr. Ir. Tagor M. Sembiring untuk kejelasan lebih lanjut, dapat menghubungi sdr. Tagor.

3. Penanya : M. Sugiyanto

- a. Mengapa verifikasi ini tak sekaligus dilakukan dalam kondisi hot, Xe equilibrium dan water borated dengan sistem WABA-nya, supaya analisis kisi bahan bakar AP-600 menjadi lebih utuh dan lengkap ?
- b. Apakah ada kendala yang menyebabkan tidak dilakukannya kondisi seperti tersebut di atas? Mohon penjelasannya !

Jawaban

- a. dan b. Verifikasi untuk kondisi hot, Xe equilibrium dan borated serta dengan sistem WABA tidak dilakukan karena tidak ada data dari Westinghouse untuk sel bahan bakar pada kondisi-kondisi tersebut. Data-data dari Westinghouse untuk kondisi hot, Xe-equil., borated serta sistem WABA adalah data untuk perhitungan teras, bukan pada perhitungan sel. Meskipun demikian perhitungan-perhitungan tersebut akan dilakuakn. Demikian juga

verifikasinya yang diberikan untuk Westinghouse. Hanya hal tersebut memerlukan waktu komputasi yang cukup lama. Untuk tahap-tahap selanjutnya, verifikasi tersebut akan dilakukan.

4 Penanya : Zaki Su'ud

- a. Apakah perbedaan/kelebihan kisi bahan bakar AP-600 dibandingkan dengan PWR-PWR generasi sebelumnya secara netronik ?
- b. Fasilitas pemodelan kluster PWR pada WIMS-D\$ (apakah satu assembly dapat dihitung sekaligus ?)

Jawaban

- a. Perbedaan/kelebihan kisi bahan bakar AP-600 dengan PWR generasi sebelumnya secara teknis belum dibandingkan karena kendala waktu untuk melakukan studi banding dari sisi netronik.
- b. Satu assembly (cluster bahan bakar dalam hal ini) dapat dimodelkan pada WIMS-D4, dengan adanya option-option di WIMS-D4. Secara garis besarnya option-option pada program tersebut untuk melakukan perhitungan/model 1 cluster antara lain :
  - option Cell : CLUSTER (untuk tipe sel yang ditinjau)
  - option ARRAY, ANNULUS dan RODSUB untuk menentukan geometri sel dan posisi-posisi tiap batang bahan bakar di dalam cluster.