
PERCOBAAN KEKRITISAN TERAS REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG DENGAN PROGRAM MCNP-4B.

Oleh:
Putranto Ilham Yazid
Puslitbang Teknik Nuklir - BATAN, Bandung

ABSTRAK

ANALISIS PERCOBAAN KEKRITISAN TERAS REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG DENGAN PROGRAM MCNP-4B. Dalam rangka pemuatan elemen bakar yang pertama kalinya ke dalam teras reaktor TRIGA 2000 Bandung, telah dilaksanakan dua macam percobaan kekritisasi yakni: pemuatan sub kritis dan pemuatan kritis. Tujuan dari percobaan tersebut adalah untuk memaksimalkan fungsi reaktor sebagai fasilitas penelitian dan sekaligus untuk mengumpulkan data *benchmark* bagi program komputer neutronik. Dalam percobaan pemuatan sub kritis, teras reaktor dimuati sampai 42 elemen bakar dengan urutan pengisian elemen bakar sebagai berikut: 12 elemen bakar di ring C dan 5 batang kendali di ring D, 13 elemen bakar di ring D, 6 elemen bakar dan 3 elemen grafit *dummy* di ring E, 2 elemen bakar di ring B, 2 elemen bakar di ring B, 1 elemen bakar di ring B dan di akhiri dengan 1 elemen bakar di ring B. Sebaliknya, di dalam percobaan pemuatan kritis teras dimuati dengan elemen bakar sesuai dengan pola yang telah dirancang oleh General Atomics, yakni: 20 elemen bakar di ring B, C dan D serta 5 batang kendali di ring D, 11 elemen bakar di ring D, 6 elemen bakar dan 3 elemen grafit *dummy* di ring E dan selanjutnya secara bertahap ring E dimuati elemen bakar sampai teras mencapai kekritisasi pertama, yakni pada saat terisi oleh 55 elemen bakar. Sebelum percobaan dilaksanakan, program MCNP-4B (*Monte Carlo N-particle transport code*) telah digunakan untuk merancang pola pengisian elemen bakar pada percobaan pemuatan sub kritis, yakni untuk menjamin bahwa teras masih berada dalam keadaan sub kritis pada saat dimuati 42 elemen bakar. Dalam perhitungan diasumsikan bahwa setiap elemen bakar berisi ^{235}U yang massanya sesuai dengan *burnup*nya, massa ^{238}U dianggap seperti elemen bakar baru sedangkan hasil fisi serta bahan racun lainnya diabaikan. Hasil percobaan menunjukkan bahwa perhitungan MCNP-4B sangat baik dalam memprediksi percobaan

pemuatan sub kritis. Untuk percobaan pemuatan kritis, MCNP-4B menunjukkan bahwa teras TRIGA 2000 Bandung akan kritis pada konfigurasi teras berisi 54 elemen bakar. Dapat disimpulkan bahwa program MCNP-4B, bersama-sama dengan pengandaian di atas, sangat cocok digunakan untuk memprediksi karakteristik neutronik teras reaktor TRIGA 2000 Bandung.

Kata kunci: reaktor, kekritisian, MCNP.

ABSTRACT

ANALYSIS OF CRITICALITY EXPERIMENTS OF BANDUNG TRIGA 2000 REACTOR BY USING MCNP-4B CODE. During the first core loading of Bandung TRIGA 2000 reactor, two kinds of criticality experiment have been conducted, i.e., sub critical core loading and critical core loading experiments. The purpose of the experiments is to maximize the utilization of the reactor as well as to provide benchmark data for neutronic computer codes. In the sub critical core loading experiment, the core is loaded up to 42 fuel elements according to the following loading sequence: 12 fuel elements in ring C plus 5 control rods in ring D, 13 fuel elements in ring D, 6 fuel elements and 3 graphite dummies in ring E, 2 fuel elements in ring B, 2 fuel elements in ring B, 1 fuel element in ring B and at last 1 fuel element in ring B. In the other case, during the critical loading experiment, the core is loaded following the loading pattern planned by General Atomics, i.e: 20 fuel elements in ring B, C and D plus 5 control rods in ring D, 11 fuel elements in ring D, 6 fuel elements and 3 graphite dummies in ring E, and then the core is loaded with additional fuel elements, step by step, until the core reached its first criticality, i.e., 55 fuel elements. Prior to conduct of criticality experiments, MCNP-4B code is used to plan the fuel loading pattern of the sub critical loading experiment, i.e. to assure that the core is still in sub critical state with 42 fuel elements in the core. In the calculation is assumed that the mass of ^{235}U in each fuel element depends on the documented burnup data, the mass of ^{238}U is assumed to be the same as the one in fresh fuels. Furthermore, all fission products as well as poisonous materials in each fuel element are ignored. The experiment results showed that the calculations of MCNP-4B matched very well with the sub critical loading experiment data. MCNP-4B also predicted that TRIGA 2000 reactor will be critical with 54 fuel elements in the core. It is concluded that MCNP-4B code,

together with the above assumptions, is appropriate for predicting the neutronic characteristics of Bandung TRIGA 2000 reactor.

Key words: reactor, criticality, MCNP.

I. PENDAHULUAN

Percobaan kekritisian selalu dilaksanakan pada saat teras reaktor diisi dengan elemen bakar untuk pertama kalinya, yang bertujuan untuk menjamin bahwa pemuatan teras benar-benar dilaksanakan secara teratur dan aman, sekaligus sebagai ajang pembuktian pertama bagi rancangan neutronik reaktor. Pada percobaan ini elemen bakar dimasukkan ke dalam teras secara bertahap, sesuai dengan rencana yang telah dibuat sebelumnya, di mana pada setiap tahap dilakukan pengukuran cacah neutron pada saat seluruh batang kendali berada di posisi tertinggi. Hasil pencacahan neutron tersebut selanjutnya akan menjadi acuan bagi penentuan jumlah elemen bakar yang boleh dimasukkan ke dalam teras pada tahap berikutnya.

Umumnya, elemen bakar dimasukkan ke dalam teras dimulai dari pusat/tengah teras, yakni dari ring B, kemudian secara bertahap elemen bakar dimuati ke arah radial, yakni di ring C, D dan seterusnya. Dengan cara ini maka selama proses pemuatan elemen bakar berlangsung, reaktivitas teras akan semakin membesar dengan pertambahan reaktivitas yang semakin mengecil. Hal ini adalah karena reaktivitas lebih yang diberikan oleh elemen bakar pada posisi yang semakin jauh dari pusat teras akan semakin kecil. Dengan demikian maka proses pemuatan elemen bakar menuju kekritisian

semakin aman pula.

Pada reaktor TRIGA 2000 Bandung yang mencapai kritis pertama pada tanggal 13 Mei 2000, pukul 06:32 WIB, telah dilaksanakan dua macam percobaan pemuatan teras, yakni: pemuatan kritis dan pemuatan sub kritis. Tujuan dari percobaan-percobaan di atas adalah untuk memanfaatkan reaktor secara maksimal sebagai fasilitas penelitian dan sekaligus untuk mengumpulkan data *benchmark* bagi perhitungan neutronik dengan program komputer.

Pada percobaan pemuatan kritis, elemen bakar dimasukkan ke dalam teras secara bertahap dengan cara seperti yang telah diterangkan di atas. Dalam setiap tahap, jumlah dan posisi elemen bakar di dalam teras adalah sesuai dengan yang direncanakan oleh pihak General Atomics.

Pada percobaan pemuatan sub kritis, tahap pengisian elemen bakar ke dalam teras tidak mengikuti pola yang lazim, melainkan dimulai dengan pemuatan elemen bakar pada ring C, lalu ring D dan kemudian sebagian ring E. Setelah itu barulah ring B dimuati dengan elemen bakar.

Untuk ini maka sebelum percobaan dilaksanakan telah dilakukan perhitungan neutronik dengan menggunakan program komputer MCNP-4B. Dengan menganggap bahwa elemen bakar yang dimasukkan ke dalam teras adalah semuanya baru/segar, ditentukan jumlah elemen bakar maksimum yang dapat dimasukkan ke dalam teras, di mana teras dipastikan masih berada dalam keadaan sub kritis. Dari perhitungan tersebut diperoleh jumlah maksimum elemen

bakar adalah 42 buah (termasuk 5 batang kendali).

Selanjutnya MCNP-4B dijalankan untuk menghitung harga k_{eff} teras untuk setiap tahap pengisian elemen bakar pada kedua percobaan di atas. Dalam perhitungan ini diasumsikan bahwa: tiap elemen bakar berisi ^{235}U yang massanya sesuai dengan *burnup*nya, massa ^{238}U dalam elemen bakar bekas dianggap sama dengan yang ada di dalam elemen bakar baru, semua hasil fisi serta bahan racun lainnya di dalam elemen bakar diabaikan.

Perbandingan antara hasil perhitungan dengan data percobaan menunjukkan bahwa MCNP-4B, bersama-sama dengan asumsi di atas sangat cocok untuk diterapkan bagi perhitungan karakteristik neutronik reaktor TRIGA 2000 Bandung. Menurut perhitungan MCNP-4B, jumlah elemen bakar pada saat teras mencapai kritis yang pertama kalinya adalah sebanyak 54 buah, sedangkan pada saat percobaan pemuatan kritis diperoleh bahwa teras mencapai kritis pada saat terisi oleh 55 elemen bakar. Hasil ini sangat berbeda dengan perhitungan General Atomics yang memperkirakan teras akan kritis dengan muatan sebanyak 66 elemen bakar.

II. PERHITUNGAN BESARAN k_{eff} TERAS TRIGA 2000 BANDUNG

Reaktor TRIGA 2000 Bandung menggunakan tiga macam elemen bakar. Walaupun semuanya adalah berbahan bakar sama yaitu $\text{UZrH}_{1.6}$ dan memiliki pengayaan ^{235}U yang sama yaitu 20 %, akan tetapi tiap jenis elemen bakar mempunyai kandungan uranium yang berbeda, yakni: 8,5, 12 dan 20% berat uranium dalam tiap elemen bakar. Selain itu teras juga berisi campuran antara elemen

bakar baru dan bekas. Hal terakhir ini akan menyebabkan perhitungan neutronik sulit dilaksanakan secara teliti, karena pengaruh inti hasil fisi maupun inti bahan racun lain yang terdapat di dalam setiap elemen bakar bekas harus turut pula diperhitungkan. Selain itu, data *burnup* elemen bakar yang ada di P3TkN selama ini sebenarnya masih perlu dipertanyakan kebenarannya, karena data tersebut diperoleh dari perhitungan *burnup* yang sangat sederhana.

II.1. Perhitungan Kekritisan Teras TRIGA Mark II - 1000 kW

Bandung

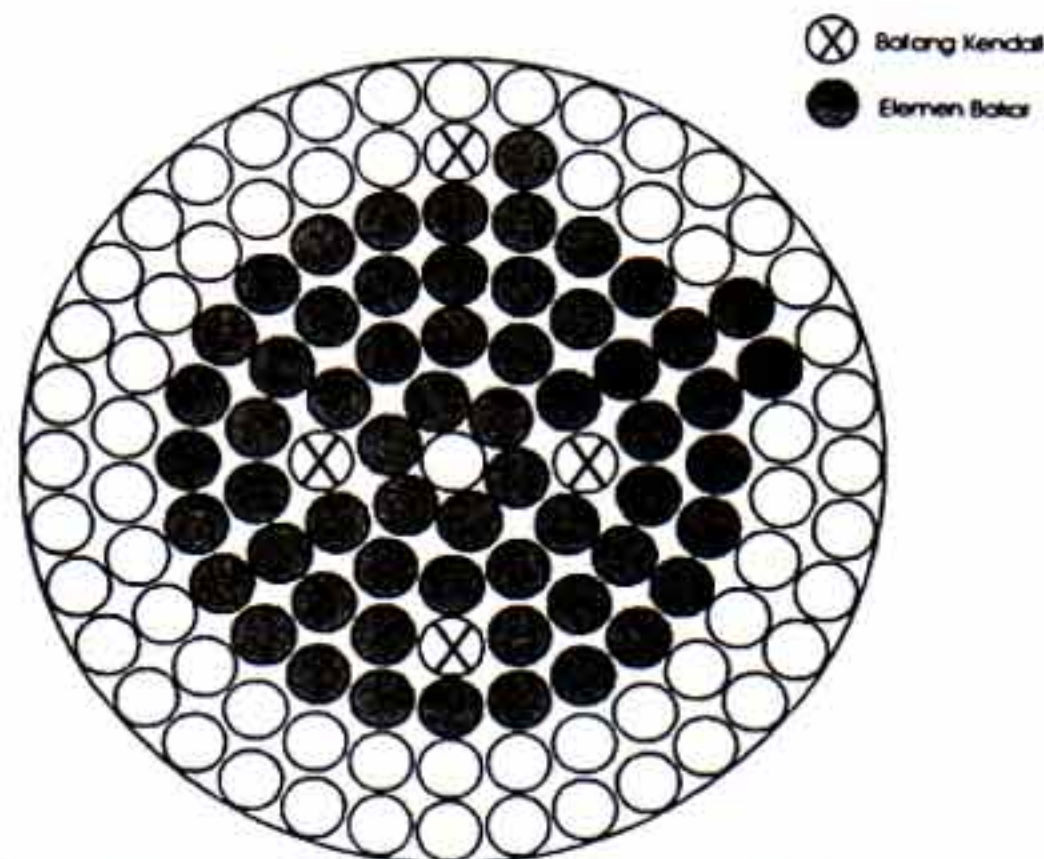
Untuk membuktikan bahwa program MCNP-4B dapat diterapkan untuk memprediksi dengan tepat kekritisan teras reaktor TRIGA, dilaksanakan perhitungan kekritisan untuk teras TRIGA Mark II-1000 kW Bandung. Teras ini mencapai mencapai kekritisan pertama dengan konfigurasi teras seperti tampak pada Gambar 1, yang terdiri dari 64 elemen bakar, termasuk 4 batang kendali, yang seluruhnya adalah baru. Seluruh elemen bakar yang dipakai dalam teras tersebut adalah berjenis sama, yakni memiliki kandungan uranium sebanyak 8,5% berat tiap elemen bakarnya, dengan massa ^{235}U sebesar 38 gram untuk elemen bakar dan 32 gram untuk batang kendali.

Dalam perhitungan ini sistem reaktor TRIGA Mark II 1000 kW Bandung dimodelkan selengkap mungkin. Bentuk dan ukuran setiap komponen dibuat setepat mungkin, sesuai dengan gambar teknik yang diperoleh dari General Atomics. Rincian sistem reaktor yang dimodelkan adalah sebagai berikut:

- a) Elemen bakar yang terdiri dari: kelongsong baja tahan karat, *plug* baja tahan karat di ujung atas dan bawah kelongsong, *plug* grafit di bagian atas dan bawah bahan bakar, bahan bakar $UZrH_{1.6}$ serta batang zirconium di sumbu silinder bahan bakar.
- b) Batang kendali yang terdiri dari: kelongsong baja tahan karat, *plug* baja tahan karat di ujung atas dan bawah kelongsong, bahan bakar $UZrH_{1.6}$ (di bagian bawah), batang zirconium di sumbu bahan bakar, boron karbida B_4C (di bagian atas) serta tangkai pemanjang (*extension tube*) aluminium.
- c) Grafit *dummy* yang terdiri dari kelongsong aluminium yang berisi batang grafit di dalamnya serta *plug* aluminium di ujung-ujung kelongsongnya.
- d) Teras yang terdiri dari: lempeng kisi atas dan bawah serta lempeng keselamatan.
- e) Reflektor yang terdiri dari: selubung aluminium yang menyelimuti seluruh grafit yang berada di dalam reflektor, satu lubang untuk *beamport piercing* dan dua lubang untuk *beamport radial*. Lubang untuk tempat *Lazy Susan* pada reflektor juga dimodelkan secara cermat.
- f) *Lazy Susan* (*rotary specimen rack*) disederhanakan sehingga hanya terdiri dari selubung luar aluminium saja, tanpa rantai baja maupun rak-rak cuplikan di dalamnya.
- g) Tangki reaktor lengkap dengan tiga buah *beamport radial* dan satu *beamport piercing*.
- h) *Thermal* dan *thermalizing column* yang terdiri dari: selubung Aluminium dan tumpukan grafit serta pelindung Pb (di dalam

thermalizing column).

- i) Perisai biologis reaktor termasuk: lubang-lubang berkas, perisai baja (di dalam beton).
- j) Tangki *bulk shielding*, termasuk air kolamnya.
- k) Air di dalam tangki reaktor, termasuk di dalam teras reaktor.



Gambar 1: Konfigurasi teras kritis reaktor TRIGA Mark II 1000 kW.

Hasil perhitungan MCNP-4B untuk teras kritis reaktor TRIGA Mark II 1000 kW Bandung adalah sebagai berikut:

Massa total $^{235}\text{U} = 2408$ gram;

$k_{\text{eff}} = 0.99274 \pm 0.00138$ (dk/k).

dimana k = faktor kelipatan

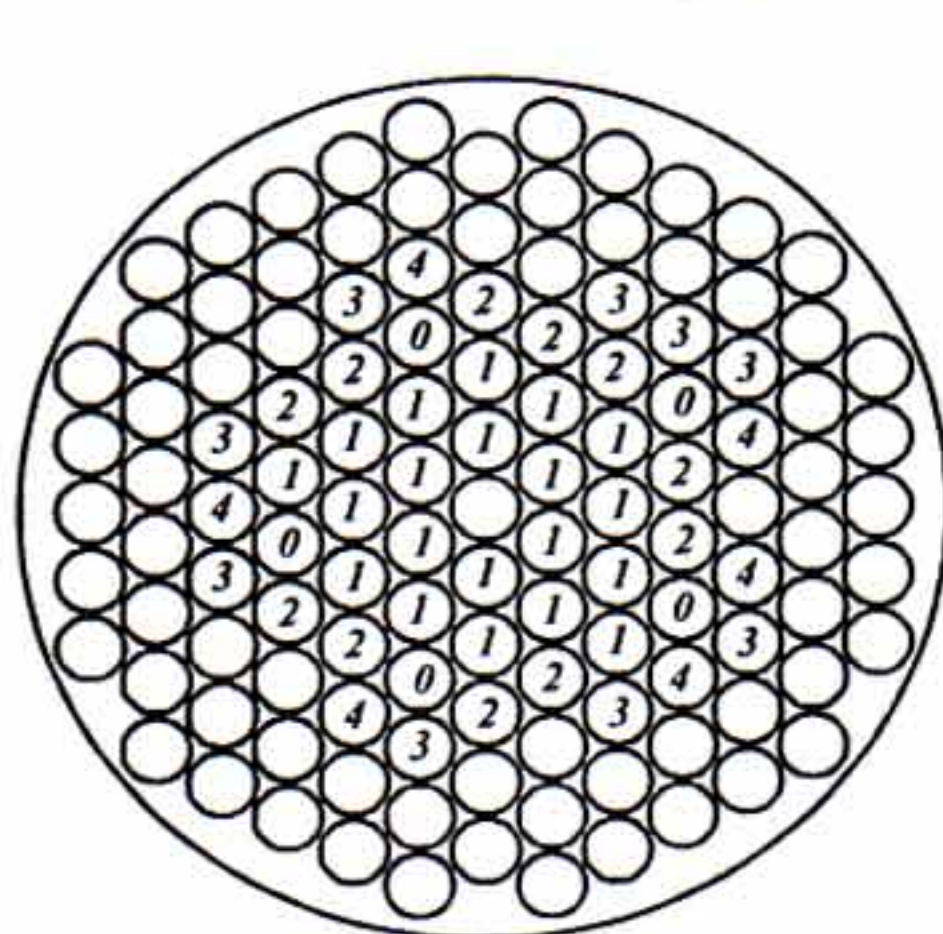
Dari hasil perhitungan harga k_{eff} di atas dapat dinyatakan bahwa MCNP-4B adalah baik/cocok untuk digunakan dalam memprediksi kekritisian reaktor TRIGA Bandung.

II.2. Penentuan Jumlah Elemen Bakar Maksimum dalam Percobaan Pemuatan Sub Kritis

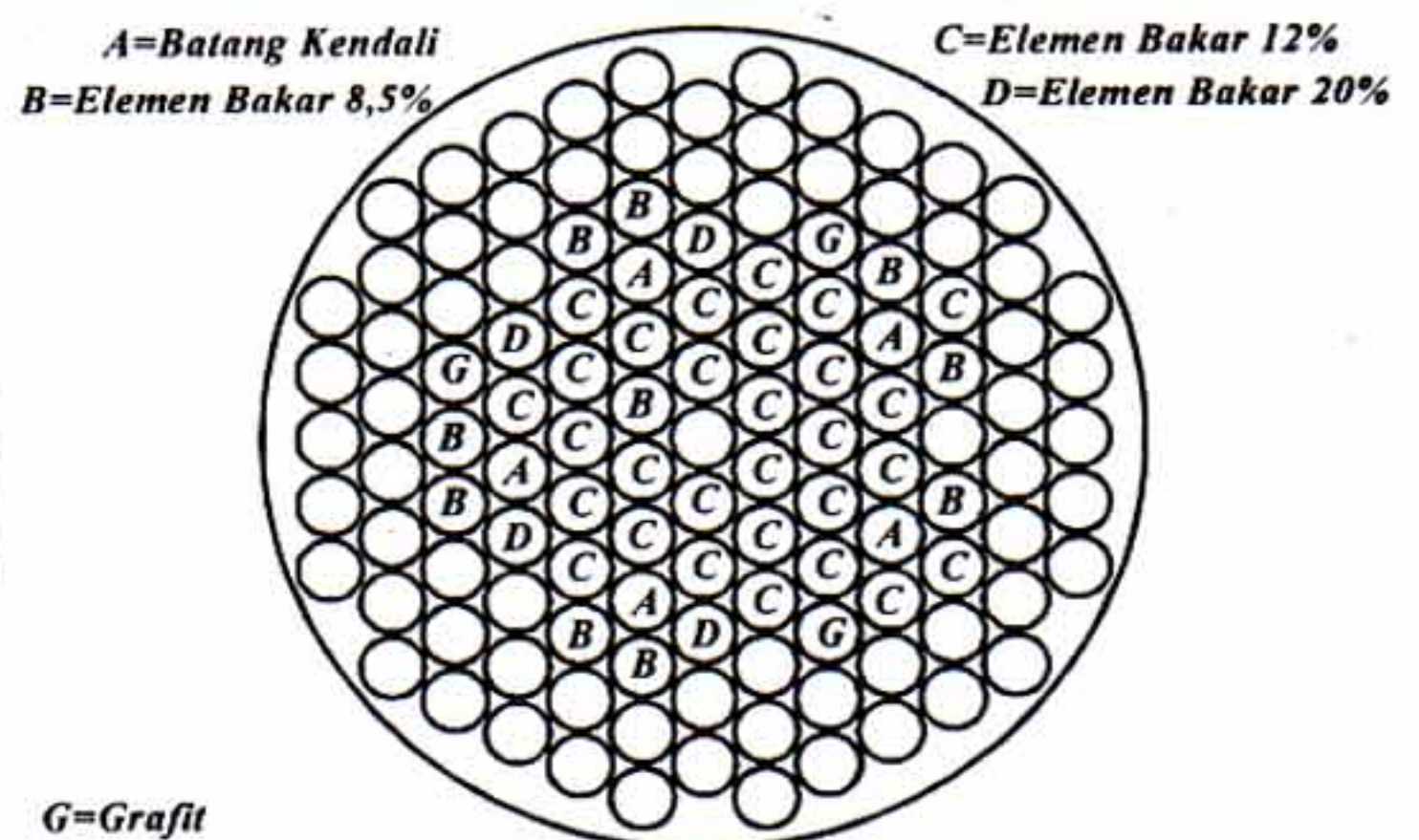
Telah disinggung di atas bahwa dalam percobaan pemuatan sub

kritis, pola pengisian elemen bakar ke dalam teras tidak mengikuti pola yang lazim, yakni ring luar (C, D dan E) yang diisi terlebih dahulu baru kemudian ring dalam (B). Untuk mencegah terjadinya kecelakaan nuklir maka perlu dijamin bahwa selama percobaan dilaksanakan teras tidak pernah berada dalam keadaan kritis atau super kritis.

Dengan mengingat bahwa teras reaktor TRIGA 2000 Bandung tidak diisi seluruhnya dengan elemen bakar baru (bahkan sebagian besar elemen bakar adalah elemen bakar bekas), maka batas maksimum elemen bakar yang dapat dimuatkan ke dalam teras selama percobaan pemuatan sub kritis akan dengan mudah dapat ditentukan secara tepat dan aman apabila dilakukan perhitungan kekritisian dengan MCNP-4B dengan mengandaikan bahwa seluruh elemen bakar yang dipakai adalah baru.



Gambar 2: Tahap pengisian elemen bakar untuk menentukan teras sub kritis



Gambar 3: Komposisi elemen bakar dalam teras sub kritis

Dengan menggunakan pola pemuatan elemen bakar yang telah dirancang oleh *General Atomics* (lihat Gambar 2 dan 3), MCNP-4B digunakan untuk menghitung besaran k_{eff} pada tiap-tiap tahap pemuatan elemen bakar. Dalam perhitungan tersebut digunakan model reaktor yang sama seperti telah dijelaskan pada bab II.1. Seluruh elemen bakar yang digunakan diandaikan masih baru, di mana setiap elemen bakar memiliki kandungan bahan sesuai dengan jenisnya masing-masing, yaitu:

Tabel 1. Data bahan di dalam elemen bakar baru

Bahan	Elemen Bakar			Batang Kendali (12 %-berat)
	8,5 %-berat	12 %-berat	20 %-berat (*)	
^{235}U (gram)	38	55	99	46
^{238}U (gram)	152	220	396	184
ZrH _{1.6} (gram)	2045,2941	2016,6667	1968,3675	1686,6667

(*) Catatan: Bahan erbium di dalam elemen bakar jenis 20 %-berat diabaikan karena ketiadaan pustaka penampang reaksi.

Dengan mengatur posisi elemen bakar dalam teras sesuai dengan konfigurasi yang tampak dalam Gambar 2 dan 3, diperoleh hasil perhitungan MCNP-4B sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil perhitungan MCNP-4B untuk pemuatan teras dengan elemen bakar baru

Tahap	Jumlah Elemen Bakar	Massa ^{235}U (gram)	k_{eff}	σ
0	5 (FFCR)	230	0,22779	0,00143
1	25	1313	0,84672	0,00232
2	36	2094	0,94812	0,00253
3	42	2454	0,98025	0,00259
4	48	2699	1,00886	0,00253

Dari Tabel 2 di atas tampak jelas bahwa teras reaktor TRIGA 2000 Bandung masih akan berada dalam keadaan sub kritis apabila ke dalam terasnya diisikan sejumlah elemen bakar yang tidak melebihi 42 buah. Karena dalam perhitungan di atas seluruh elemen bakar yang digunakan adalah baru/segar, maka perkiraan jumlah maksimum ini sangat aman untuk menentukan jumlah elemen bakar yang dapat digunakan di dalam percobaan pemuatan sub kritis. Hal ini mengingat bahwa dalam percobaan tersebut elemen bakar yang digunakan tidak seluruhnya baru, sehingga reaktivitas total yang diberikan oleh elemen bakarpun akan semakin kecil. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa bagaimanapun bentuk konfigurasi elemen bakar di dalam teras, maka teras reaktor TRIGA 2000 akan aman, yakni berada dalam keadaan sub kritis, selama jumlah elemen bakar di dalam teras (termasuk 5 batang kendali) tidak melebihi 42 buah. Untuk konfigurasi teras yang berisi 42 elemen bakar, seperti tampak pada Gambar 2 dan 3, teras reaktor TRIGA 2000 akan mempunyai reaktivitas sebesar:

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \pm \frac{\sigma}{k_{eff}} = -0,02015 \pm 0,00264 \text{ (dalam } \Delta k / k) \\ &= -2,760 \pm 0,362 \text{ (dalam } \$)\end{aligned}$$

II.3. Simulasi Percobaan Pemuatan Kritis

Pola pengisian elemen bakar ke dalam teras reaktor TRIGA 2000 Bandung untuk menuju kekritisan pertama maupun untuk teras penuh telah direncanakan oleh General Atomics. Karena itulah

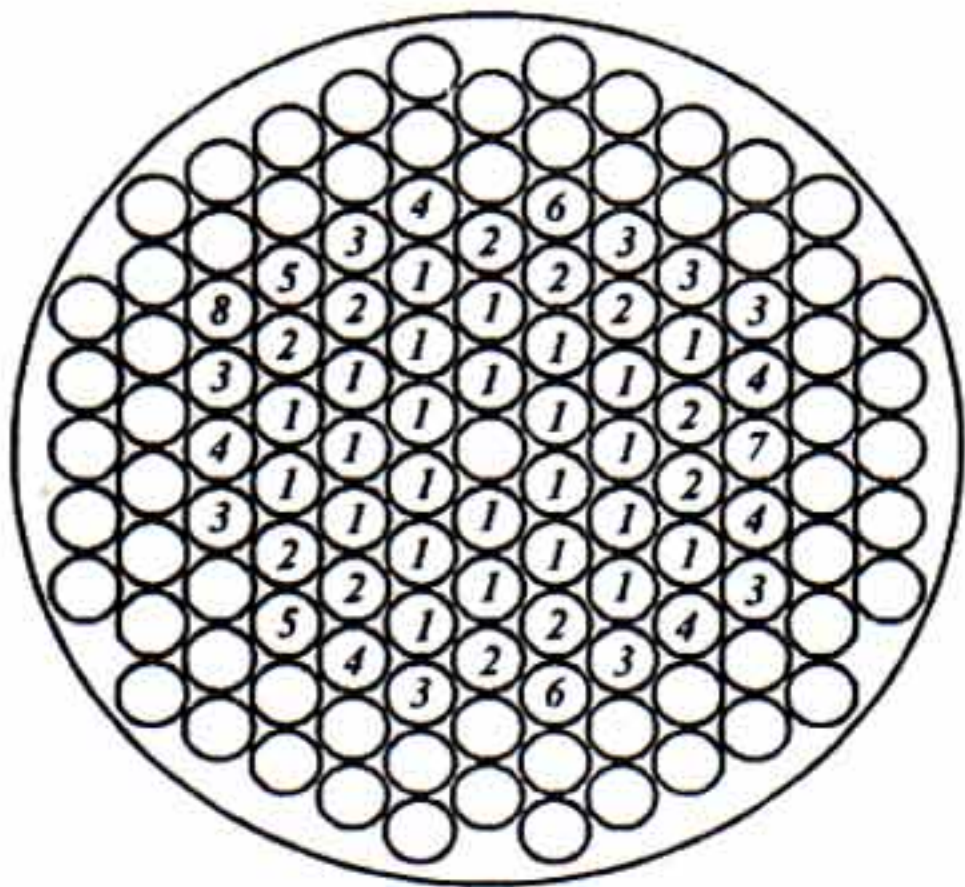
percobaan pemuatan kritis yang dilakukan di P3TkN mengikuti pola pemuatan tersebut.

Untuk mengkaji ulang hasil perhitungan General Atomics, MCNP-4B digunakan untuk memprediksi massa kritis teras TRIGA 2000 Bandung. Hitungan ini juga sekaligus digunakan untuk menjamin bahwa langkah-langkah pengisian elemen bakar selama percobaan pemuatan kritis dilakukan dengan teratur, aman dan terkendali.

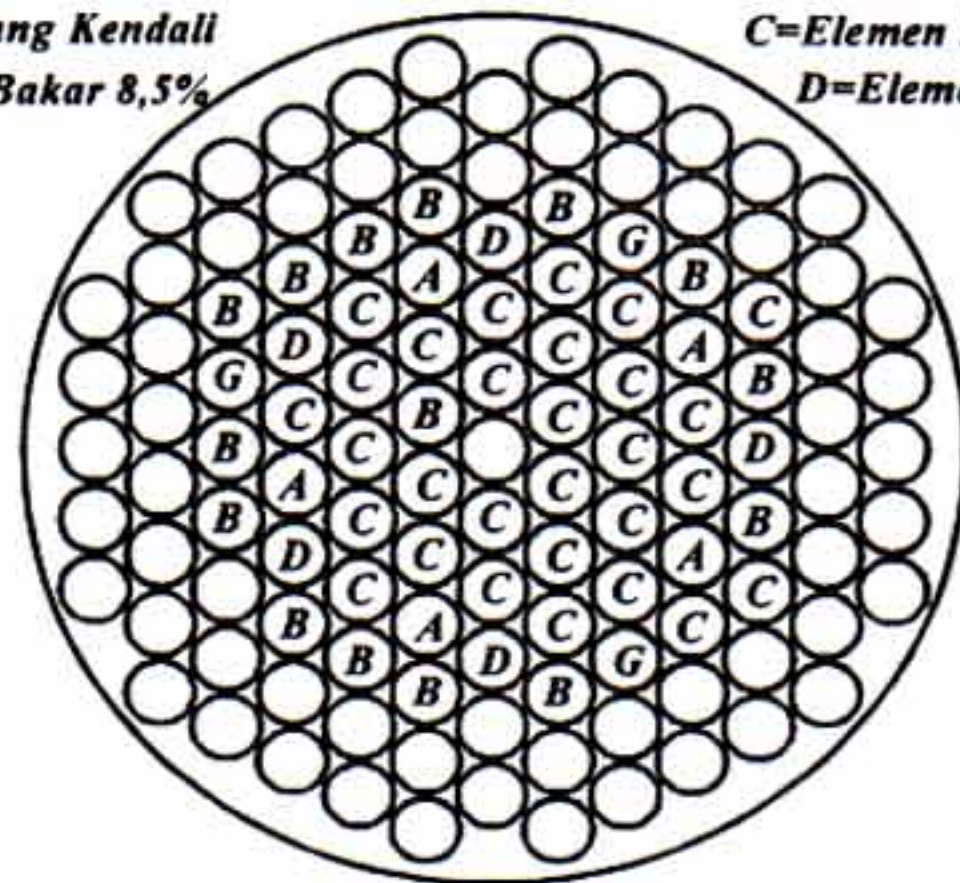
Untuk ini dilakukan simulasi percobaan pemuatan kekritisian, yakni berupa perhitungan reaktivitas teras dengan program komputer MCNP-4B, sesuai dengan langkah-langkah pengisian elemen bakar ke dalam teras yang direncanakan oleh General Atomics. Dalam perhitungan ini sistem reaktor TRIGA 2000 Bandung dimodel sama seperti yang telah diterangkan dalam bab II.1. Akan tetapi, selain berdasarkan dari jenis elemen bakar, massa ^{235}U dalam tiap elemen bakar juga disesuaikan dengan *burnup* elemen tersebut. Massa ^{238}U dalam elemen bakar bekas dianggap sama dengan yang ada di dalam elemen bakar baru. Seluruh hasil fisi maupun bahan racun lainnya yang ada di dalam elemen bakar bekas diabaikan. Selain itu, bahan erbium yang ada di dalam elemen bakar jenis 20 %-berat juga diabaikan. Hal terakhir ini adalah karena ketiadaan pustaka penampang lintang reaksi untuk bahan tersebut di P3TkN.

Mula - mula dilakukan perhitungan harga k_{eff} untuk 3 langkah pengisian elemen bakar, yakni langkah 1 sampai 3. Dari hasil perhitungan ini selanjutnya dibuat sebuah kurva antara harga $1 - k_{\text{eff}}$ terhadap massa ^{235}U . Dari titik data kedua dan ketiga dapat ditentukan prediksi

massa kritis teras, yakni dari perpotongan antara sumbu X (yaitu massa ^{235}U) dengan garis lurus yang melalui titik data kedua dan ketiga. Jumlah massa ^{235}U yang ditambahkan ke dalam teras untuk langkah pengisian selanjutnya (dalam hal ini adalah langkah keempat) ditentukan sebagai setengah kali perbedaan antara prediksi massa kritis tadi dan massa ^{235}U pada tahap terakhir (ketiga). Dengan cara ini maka kita melakukan simulasi percobaan kekritisan, yaitu metode *inverse multiplication*.



A=Batang Kendali
B=Elemen Bakar 8,5%



C=Elemen Bakar 12%
D=Elemen Bakar 20%

G=Grafit

Gambar 4: Tahap pengisian elemen bakar dalam simulasi pemuatan kritis

Gambar 5: Komposisi elemen bakar dalam simulasi percobaan pemuatan kritis

Demikian perhitungan dilaksanakan berulang kali sampai diperoleh konfigurasi teras kritis, yakni harga $k_{\text{eff}} \geq 1$. Untuk konfigurasi teras seperti tampak pada Gambar 4 dan 5, hasil lengkap perhitungan simulasi percobaan pemuatan kritis adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil perhitungan MCNP-4B untuk simulasi percobaan pemuatan kritis:

Tahap	Jumlah Elemen Bakar	Massa ^{235}U (gram)	k_{eff}	σ
1	25	1136,736	0,81495	0,00238
2	36	1898,416	0,92564	0,00251
3	42	2115,231	0,95246	0,00273
4	48	2337,559	0,97899	0,00255
5	50	2413,559	0,98618	0,00173
6	52	2489,599	0,99377	0,00164
7	53	2588,559	1,00048	0,00174
8	54	2626,559	1,00316	0,00174

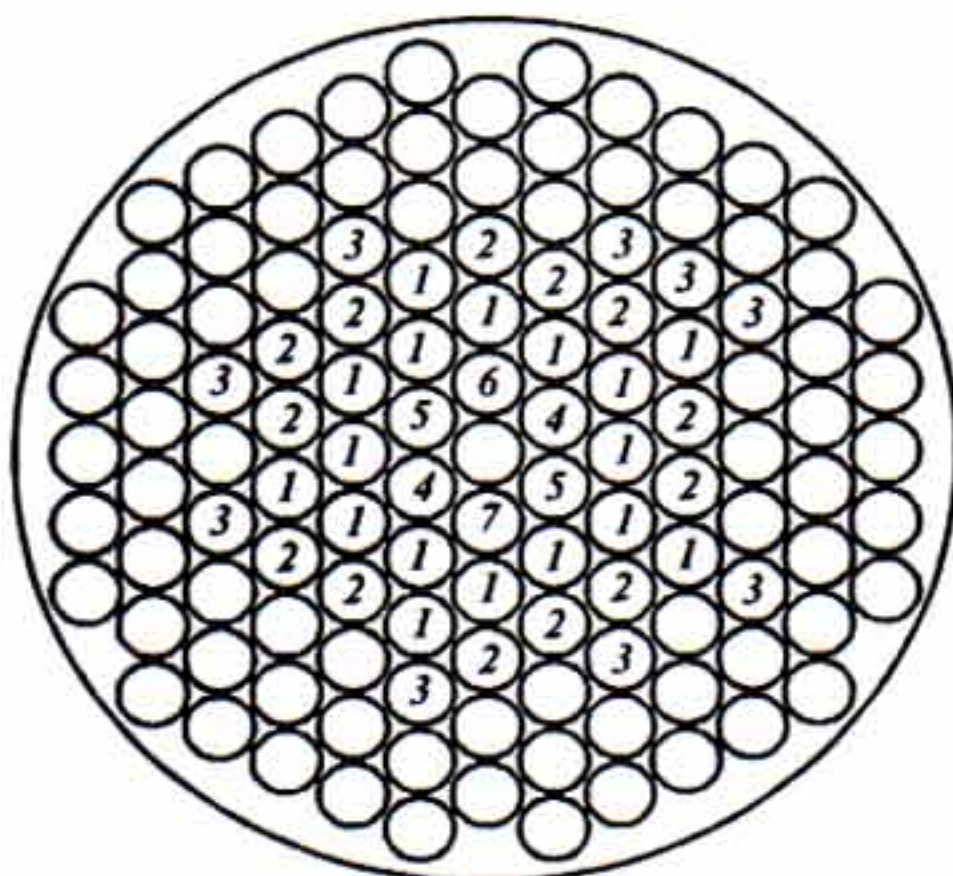
Dari Tabel 3 di atas terlihat bahwa MCNP-4B memperkirakan bahwa teras reaktor TRIGA 2000 Bandung sudah akan kritis saat teras terisi oleh 53 elemen bakar (termasuk 5 batang kendali), yakni dengan harga k_{eff} sebesar 1,00048. Akan tetapi dengan memperhatikan harga standar deviasi σ sebesar 0,00174 maka masih besar kemungkinan bahwa teras belum sepenuhnya mencapai kekritisian. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa teras reaktor TRIGA 2000 Bandung akan mencapai kekritisian yang pertama dengan muatan elemen bakar sejumlah 54 buah, dengan harga k_{eff} sebesar $1,00316 \pm 0,00174$.

III. TATA KERJA

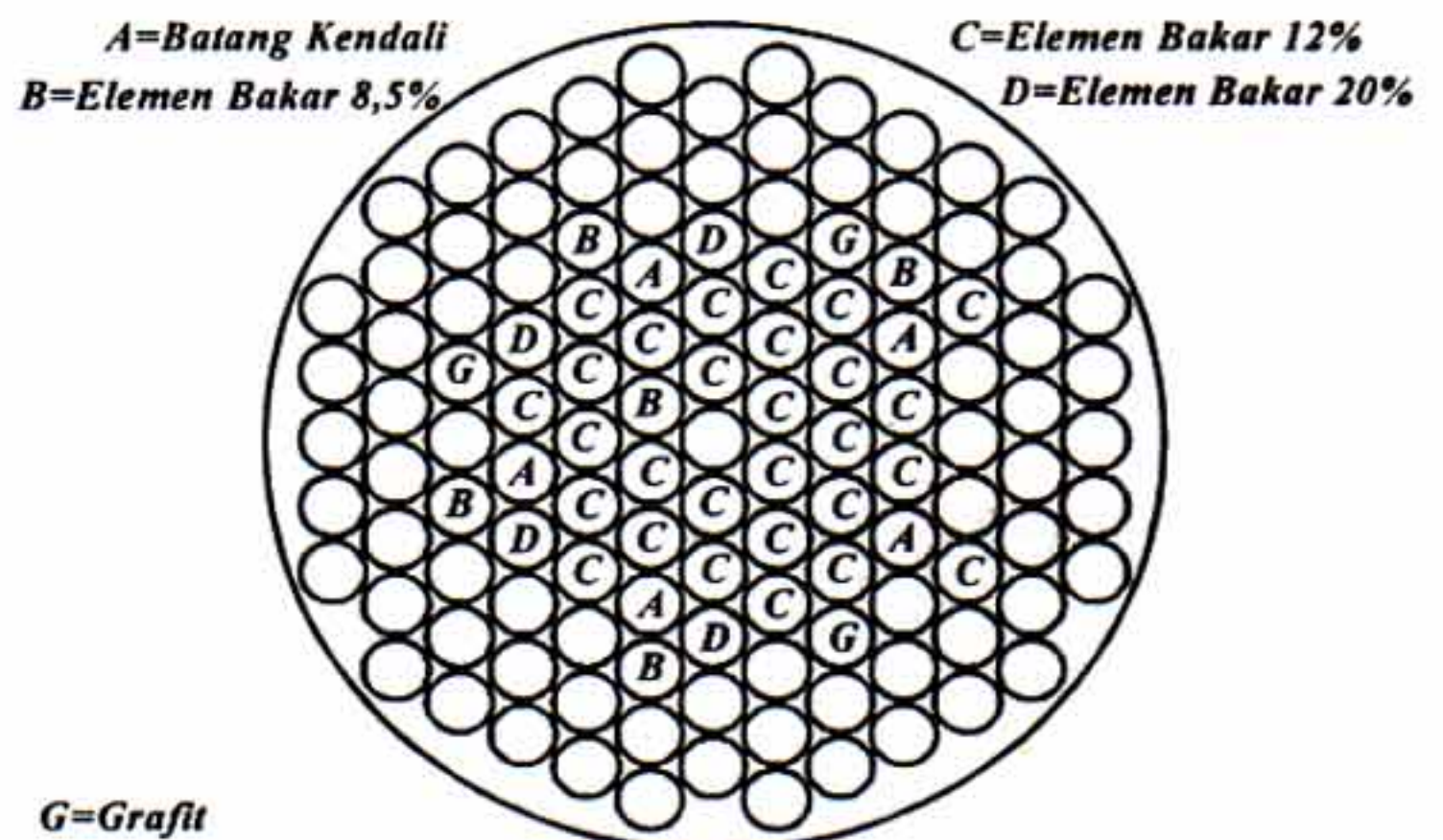
III.1. Percobaan Pemuatan Sub Kritis

Dalam percobaan ini elemen bakar dimasukkan secara bertahap ke dalam teras reaktor. Seperti tampak pada Gambar 6 dan 7, mula-mula ke dalam teras dimasukkan 17 elemen bakar, yakni 5 batang

kendali di ring D dan 12 elemen bakar di ring C. Selanjutnya dimasukkan lagi 13 elemen bakar sehingga seluruh posisi di ring D dipenuhi oleh elemen bakar. Kemudian di ring E dimasukkan 6 elemen bakar dan 3 grafit *dummy*. Pengisian terakhir ini adalah agar pada saat percobaan berakhir maka seluruh teras akan berisi 42 elemen bakar, dengan posisi yang sama seperti yang telah direncanakan oleh General Atomics. Selanjutnya, ke dalam ring B berturut-turut dimasukkan elemen bakar sejumlah: 2 buah, 2 buah, 1 buah dan terakhir 1 buah. Pada saat ini maka teras akan terisi 42 elemen bakar (termasuk 5 batang kendali) dan tiga grafit *dummy*. Sumber neutron diletakkan di ring A, kira-kira di tengah sumbu teras reaktor.



Gambar 6. Tahap pengisian elemen bakar dalam percobaan pemuatan sub kritis



Gambar 7. Komposisi elemen bakar dalam percobaan pemuatan sub kritis

Selama proses pengisian elemen bakar dilaksanakan pencacahan neutron, yang dilakukan pada tiga kanal cacah yang berbeda, yakni: Kanal I yang diperoleh dari penunjukan daya reaktor jangkau lebar (NM-1000) pada panel konsol reaktor, Kanal II yang

berasal dari perangkat cacah yang dihubungkan dengan detektor kamar fisi dan Kanal III yang berasal dari perangkat cacah yang dihubungkan dengan detektor kamar ionisasi.

Dalam setiap langkah pengisian elemen bakar dilaksanakan kegiatan berikut ini:

1. Pada saat semua batang kendali berada pada posisi terendah (*down*), dilakukan pencacahan neutron selama 100 detik. Pencacahan diulang sebanyak 5 kali.
2. Empat batang kendali dinaikkan ke posisi tertinggi (*up*), sedangkan batang kendali yang kelima (batang kendali baru) tetap pada posisi terendah.
3. Pencacahan neutron dilakukan selama 100 detik. Pencacahan diulang sebanyak 5 kali.
4. Batang kendali kelima dinaikkan ke posisi tertinggi.
5. Pencacahan neutron dilakukan lagi selama 100 detik, dan diulang sebanyak 5 kali.
6. Semua batang kendali diturunkan ke posisi terendah.
7. Elemen bakar berikutnya dimasukkan ke dalam teras, sesuai dengan rencana yang telah dibuat.
8. Seluruh langkah di atas diulangi sampai teras terisi 42 elemen bakar.

III.2. Percobaan Pemuatan Kritis

Dalam percobaan pemuatan kritis elemen bakar juga dimasukkan ke dalam teras secara bertahap. Pada tahap-tahap awal, elemen-elemen bakar dimasukkan berturut-turut sebagai berikut: 20

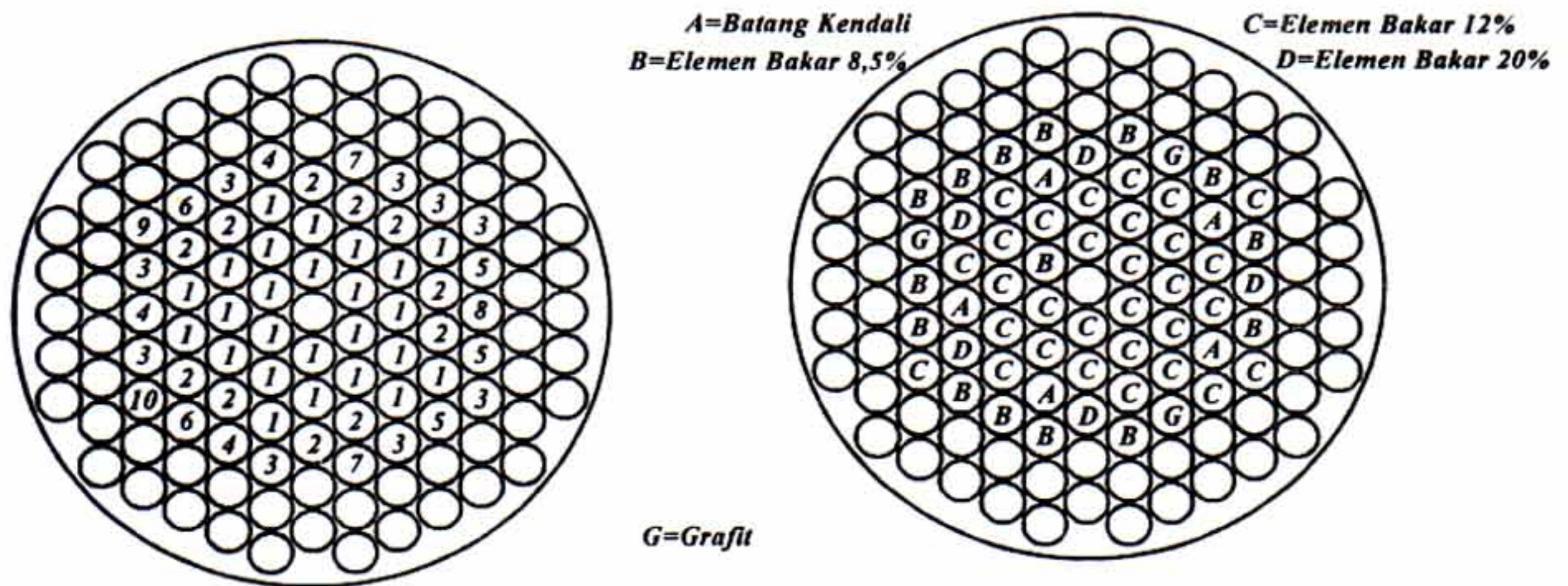
elemen bakar di ring C dan D serta 5 batang kendali di ring D, lalu 11 elemen bakar di ring D sehingga ring ini sepenuhnya terisi elemen bakar. Kemudian ditambahkan lagi 6 elemen bakar dan 3 grafit *dummy* di ring E.

Selama tiga tahap awal pengisian elemen bakar tersebut di atas dilakukan pula pencacahan neutron, persis seperti yang dilakukan pada percobaan pemuatan sub kritis. Mulai tahap ketiga, jumlah elemen bakar berikutnya yang boleh dimasukkan ke dalam teras dapat diperkirakan. Hal ini dilaksanakan sebagai berikut:

1. Membuat kurva antara $1/C$ (C adalah cacahan neutron yang diperoleh pada saat semua batang kendali berada pada posisi tertinggi) dan massa ^{235}U yang ada di dalam teras reaktor.
2. Ditentukan titik potong antara sumbu X (yakni massa ^{235}U) dengan garis lurus yang melewati dua titik data terakhir. Titik potong tersebut merupakan perkiraan massa kritis teras, yakni jumlah massa ^{235}U pada saat teras mencapai kekritisian pertama.
3. Jumlah massa ^{235}U yang boleh ditambahkan/dimasukkan berikutnya ke dalam teras adalah setengah kali perbedaan antara prediksi massa kritis tadi dengan massa ^{235}U pada tahap pemuatan terakhir. Jumlah ^{235}U tersebut dikonversikan ke dalam jumlah elemen bakar yang sesuai.

Demikianlah pemuatan elemen bakar ke dalam teras secara bertahap dilaksanakan, sampai teras mencapai kekritisian pertama, yang ditandai oleh tetap stabilnya daya reaktor walaupun sumber neutron dikeluarkan dari teras reaktor.

Tahap-tahap pengisian dan komposisi elemen bakar selama percobaan pemuatan kritis dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8: Tahap pengisian elemen bakar dalam percobaan pemuatan kritis.

Gambar 9: Komposisi elemen bakar dalam percobaan pemuatan kritis.

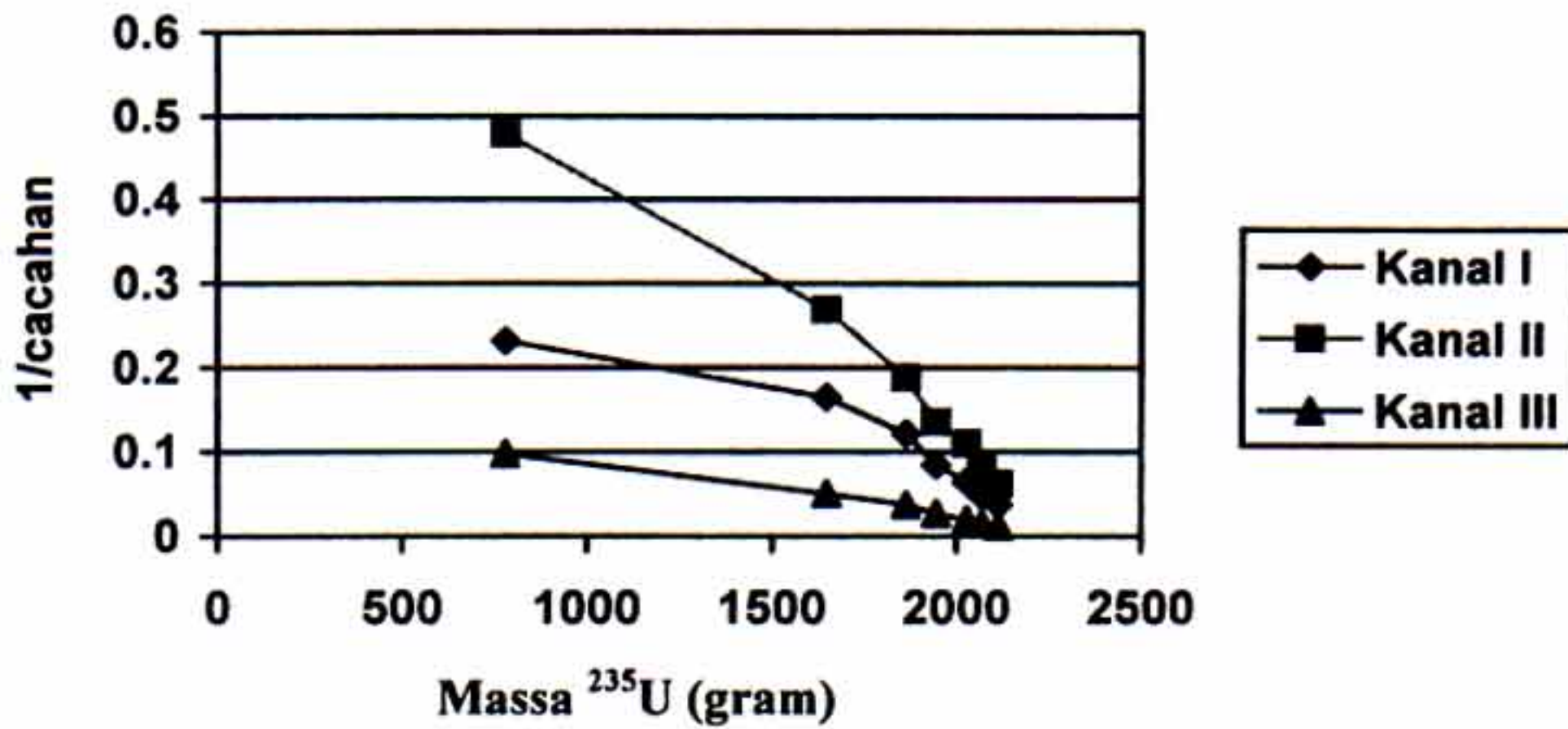
IV. HASIL PERCOBAAN

IV.1.Percobaan Pemuatan Sub Kritis

Hasil percobaan pemuatan sub kritis disajikan dalam Tabel 4 dan Gambar 10 berikut ini:

Tabel 4. Hasil percobaan pemuatan sub kritis untuk ketiga kanal cacah:

Langkah	Massa ²³⁵ U (gram)	Jumlah Elemen Bakar	Cacah per detik		
			Kanal I	Kanal II	Kanal III
1	779,590	17	10,22	4,31	2,09
2	1648,280	30	19,60	6,07	3,72
3	1864,065	36	26,42	8,20	5,33
4	1946,305	38	37,04	11,77	7,39
5	2027,832	40	51,58	15,47	9,11
6	2069,077	41	66,58	20,68	11,90
7	2114,761	42	88,42	26,60	16,17



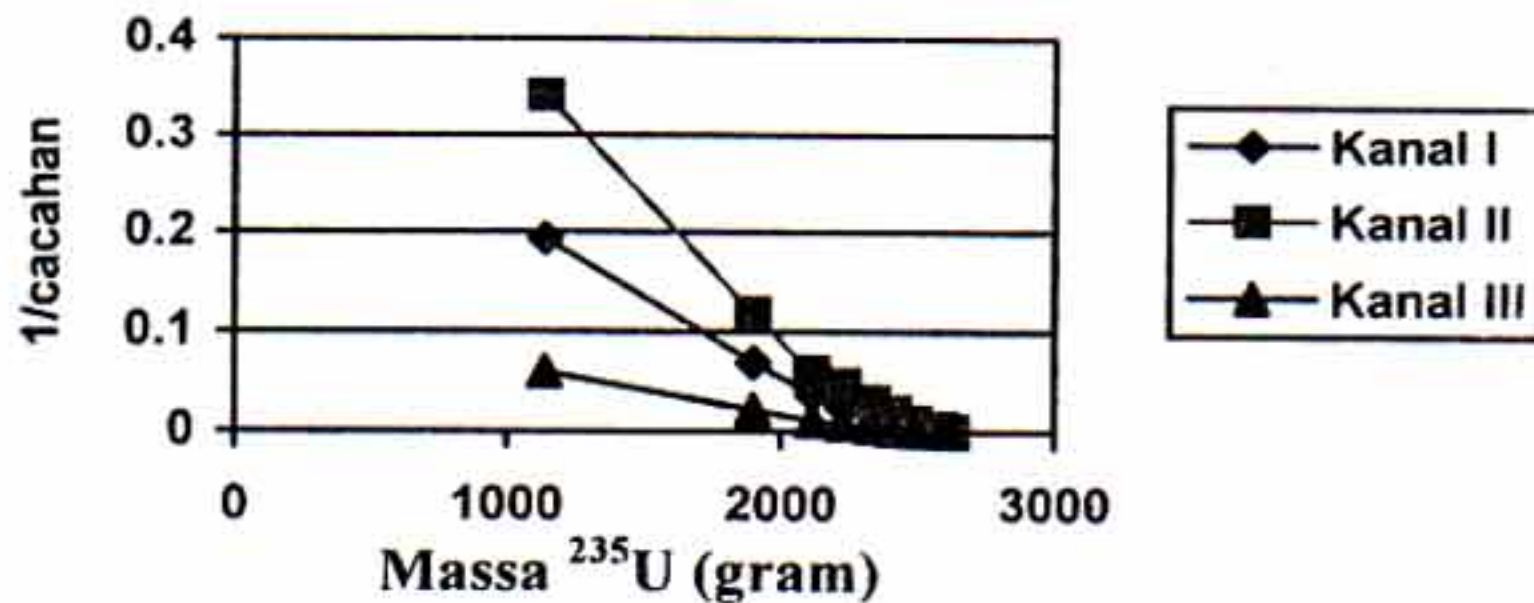
Gambar 10. Kurva 1/cacahan terhadap massa ²³⁵U untuk percobaan pemuatan sub kritis.

IV.2. Percobaan Pemuatan Kritis.

Hasil percobaan pemuatan kritis tersaji dalam Tabel 5 dan Gambar 11 berikut ini:

Tabel 5. Hasil percobaan pemuatan kritis untuk ketiga kanal cacah:

Langkah	Massa ²³⁵ U (gram)	Jumlah Elemen Bakar	Cacah per detik		
			Kanal I	Kanal II	Kanal III
1	1136,426	25	16,74	5,17	2,93
2	1898,976	36	46,34	14,41	8,49
3	2114,761	42	86,10	26,88	16,91
4	2228,601	45	129,14	40,60	21,56
5	2336,629	48	196,74	59,34	33,53
6	2412,219	50	308,00	92,78	50,39
7	2487,919	52	620,80	182,19	106,15
8	2587,129	53	1686,00	489,73	298,17
9	2624,929	54	8501,01	2510,00	1507,70
10	2657,190	55	kritis	kritis	kritis



Gambar 11: Kurva 1/cacahan terhadap massa ²³⁵U untuk percobaan pemuatan kritis.

V. ANALISIS HASIL PERCOBAAN

V.1. Percobaan Pemuatan Sub Kritis

Menurut teori reaktor, apabila sebuah sumber neutron dimasukkan ke dalam teras yang berada dalam keadaan sub kritis, maka cacah neutron yang diterima oleh sebuah detektor akan lebih besar daripada yang diperoleh dari sumber neutron itu sendiri. Dengan kata lain, akan terjadi penguatan sumber neutron. Cacah neutron C tersebut berbanding lurus dengan kuat sumber S dan berbanding terbalik dengan k_{eff} , yaitu:

$$C \propto \frac{1}{1 - k_{eff}} S \quad \text{di mana: } S \text{ adalah kuat sumber neutron.}$$

Dengan demikian dapat diperoleh bahwa:

$$\frac{1}{C} \propto \frac{1 - k_{eff}}{S} \quad (1)$$

Persamaan (1) di atas menghubungkan antara data percobaan pemuatan sub kritis (C) dengan hasil perhitungan MCNP-4B (k_{eff}).

Tabel 6 berikut ini menampilkan harga $1/C$, yang sudah dinormalisasi, yang diperoleh dari masing-masing kanal cacah selama percobaan pemuatan sub kritis. Dalam tabel tersebut juga tertampil harga rerata $1/C$ dari ketiga kanal tersebut.

Tabel 6. Harga $1/C$ ternormalisasi untuk percobaan pemuatan sub kritis:

Langkah	Massa ^{235}U (gram)	$1/C$ ternormalisasi (*)			
		Kanal I	Kanal II	Kanal III	Rerata
1	779,590	1,000	1,000	1,000	1,000
2	1648,280	0,521	0,710	0,562	0,598
3	1864,065	0,387	0,526	0,392	0,435
4	1946,305	0,276	0,366	0,283	0,308
5	2027,832	0,198	0,279	0,229	0,235
6	2069,077	0,153	0,208	0,176	0,179
7	2114,761	0,121	0,162	0,129	0,137

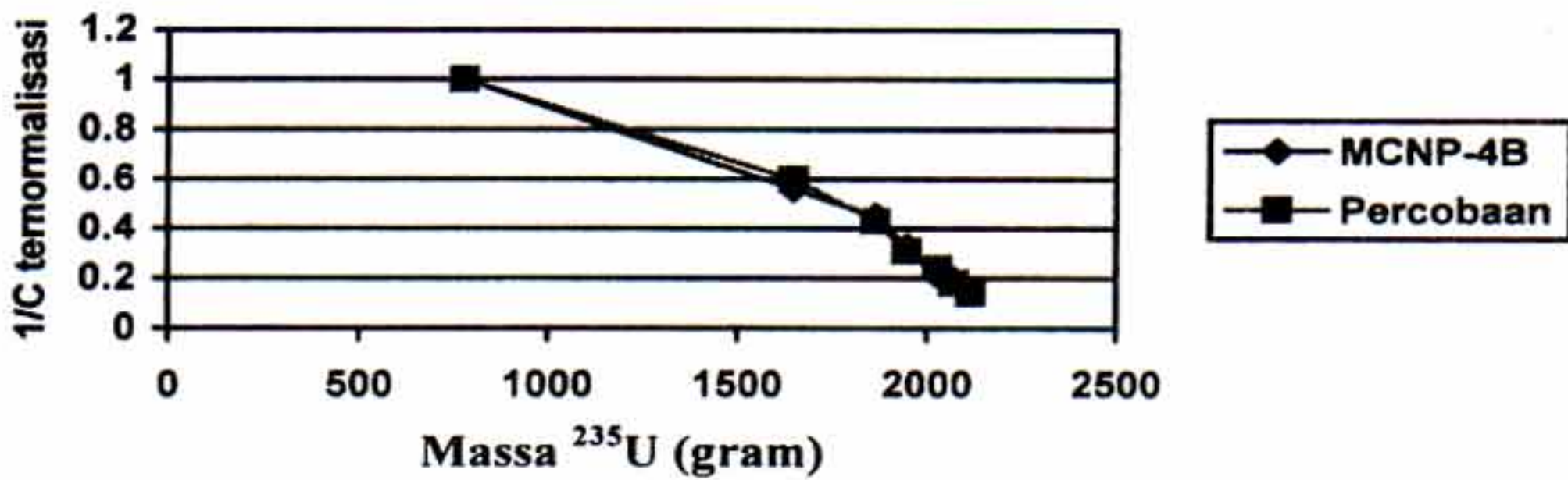
(*) Catatan: harga dinormalisasi dengan data pada langkah 1.

Dari Tabel 6, tampak jelas bahwa ketiga kanal cacah menghasilkan nilai cacah ternormalisasi yang sangat mirip satu dengan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa selama percobaan berlangsung, perangkat cacah bekerja dengan baik dan stabil, sehingga data yang diperolehpun adalah sah.

Perbandingan antara data hasil percobaan pemuatan sub kritis dengan hasil perhitungan MCNP-4B terpampang pada Tabel 7 dan Gambar 12.

Tabel 7. Perbandingan antara data hasil percobaan dengan hasil perhitungan:

Langkah	Massa ^{235}U (gram)	1/C ternormalisasi		Beda (%)
		Percobaan	MCNP-4B	
1	779,590	1,000	1,000	0,00
2	1648,280	0,598	0,559	6,98
3	1864,065	0,435	0,452	3,76
4	1946,305	0,308	0,327	5,81
5	2027,832	0,235	0,216	8,80
6	2069,077	0,179	0,195	8,21
7	2114,761	0,137	0,148	7,43



Gambar 12. Perbandingan antara hasil percobaan dengan hasil perhitungan MCNP-4B.

Dari Tabel 7 terlihat jelas betapa baiknya MCNP-4B memprediksi hasil percobaan pemuatan sub kritis. Beda maksimum yang hanya 8,80 % secara kuantitatif menunjukkan akurasi yang tinggi dari perhitungan MCNP-4B. Demikian pula Gambar 12 menunjukkan secara kualitatif bagaimana ketepatan MCNP-4B dalam memprediksi setiap titik data percobaan.

Hal ini membuktikan bahwa MCNP-4B bersama-sama dengan pengandaian yang digunakan dalam perhitungan adalah cocok untuk diterapkan dalam memprakirakan karakteristik neutronik teras reaktor TRIGA 2000.

Keberhasilan MCNP-4B dalam memprediksi data percobaan pemuatan sub kritis antara lain disebabkan oleh distribusi *burnup* elemen bakar yang digunakan dalam percobaan tersebut, seperti yang terlihat dalam Tabel 8 berikut ini.

Tabel 8. Distribusi *burnup* elemen bakar yang dipakai dalam percobaan pemuatan sub kritis.

<i>Burnup</i> (%)	Jumlah Elemen Bakar
0,0 (baru)	13
$0 < x \leq 5,0$	11
$5,0 < x \leq 10,0$	6
$10,0 < x \leq 15,0$	1
$15,0 < x \leq 20,0$	1
$20,0 < x \leq 25,0$	2
$25,0 < x \leq 30,0$	3
$40,0 < x \leq 45,0$	2
$45,0 < x \leq 50,0$	3

Dari Tabel 8 tampak dengan jelas bahwa hanya 10 buah elemen bakar (sekitar 24 %) yang memiliki kandungan ^{235}U yang sedikit, yakni memiliki *burnup* lebih besar dari 20 %. Sisanya, yakni 32 buah adalah baru atau masih segar.

Kenyataan ini menunjukkan bahwa kesalahan perhitungan MCNP-4B yang disebabkan oleh pengabaian hasil fisi maupun bahan racun lain di dalam elemen bakar bekas akan semakin kecil. Dengan demikian maka hasil perhitungan MCNP-4B akan semakin akurat.

V.2. Percobaan Pemuatan Kritis

Seperti yang telah direncanakan semula, konfigurasi teras pada percobaan pemuatan kritis langkah ketiga adalah sama persis seperti pada percobaan pemuatan sub kritis langkah ketujuh. Karena itu sangat menarik untuk membandingkan data yang tertampil pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Data yang dihasilkan oleh ketiga kanal cacah pada percobaan pemuatan sub kritis langkah terakhir (ketujuh) ternyata sangat mirip dengan yang diperoleh dari data percobaan pemuatan kritis langkah ketiga, dengan perbedaan maksimum tidak lebih dari 4,6 % saja. Hal ini menunjukkan bahwa kedua percobaan dilaksanakan dengan baik dan semua perangkat cacah berfungsi dengan baik pula.

Data hasil percobaan pemuatan kritis yang sudah dinormalisasi selengkapnya dapat dilihat dalam Tabel 9 berikut ini.

Tabel 9. Harga $1/C$ ternormalisasi untuk percobaan pemuatan kritis:

Langkah	Massa ^{235}U (gram)	$1/C$ ternormalisasi (*)			
		Kanal I	Kanal II	Kanal III	Rerata
1	1136,426	1,000	1,000	1,000	1,000
2	1898,976	0,361	0,359	0,345	0,355
3	2114,761	0,194	0,192	0,173	0,187
4	2228,601	0,130	0,127	0,136	0,131
5	2336,629	0,085	0,087	0,087	0,087
6	2412,219	0,054	0,056	0,058	0,056
7	2487,919	0,027	0,028	0,028	0,028
8	2587,129	0,010	0,011	0,010	0,010
9	2624,929	0,002	0,002	0,002	0,002
10	2657,190	kritis	kritis	kritis	kritis

(*) Catatan: harga dinormalisasi dengan data pada langkah 1.

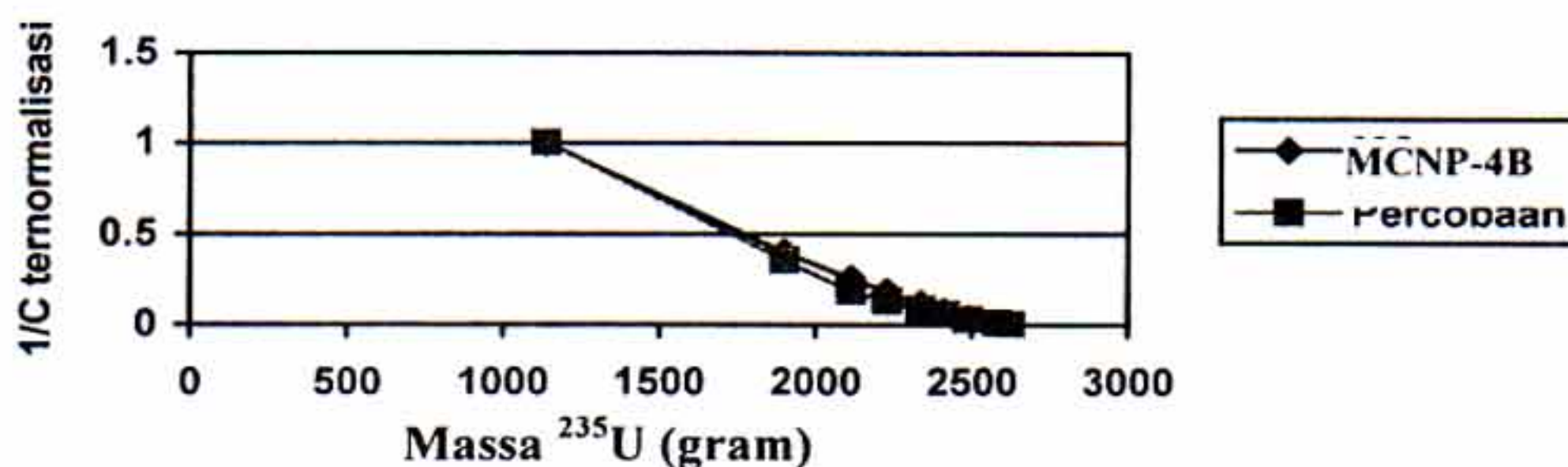
Dari Tabel 9 kembali terlihat bahwa percobaan pemuatan kritis berlangsung dengan baik. Hal ini terbukti dari data percobaan yang ternormalisasi yang diperoleh dari ketiga kanal cacah sangat mirip satu sama lain.

Perbandingan antara data percobaan dengan hasil perhitungan MCNP-4B terpampang dalam Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Perbandingan antara data hasil percobaan dengan hasil perhitungan:

Langkah	Massa ^{235}U (gram)	1/C ternormalisasi		Beda (%)
		Percobaan	MCNP-4B	
1	1136,426	1,000	1,000	0,00
2	1898,976	0,355	0,399	11,03
3	2114,761	0,187	0,257	27,24
4	2228,601	0,131	0,182	28,02
5	2336,629	0,087	0,114	23,68
6	2412,219	0,056	0,075	25,33
7	2487,919	0,028	0,034	17,65
8	2587,129	0,010		
9	2624,929	0,002		

Dari tabel di atas terlihat bahwa MCNP-4B tidak begitu baik dalam memprediksi data percobaan pemuatan kritis, bahkan perbedaan maksimumnya mencapai 28 %. Secara kualitatif Gambar 13 menunjukkan bagaimana perbedaan tersebut.



Gambar 13. Perbandingan antara hasil percobaan dan perhitungan MCNP-4B

Walaupun MCNP-4B kurang baik dalam memprediksi rincian data percobaan pemuatan kritis, akan tetapi ia sangat baik dalam memperkirakan massa kritis teras TRIGA 2000. Hal ini terbukti dari hasil perhitungan simulasi percobaan pemuatan kritis yang menghasilkan jumlah elemen bakar pada saat teras mencapai kekritisan pertama adalah 54 buah. Dalam kenyataannya, dari percobaan pemuatan kritis diperoleh bahwa jumlah elemen bakar saat teras mencapai kritis adalah 55 elemen bakar.

Menarik untuk dikemukakan di sini bahwa distribusi *burnup* elemen bakar pada saat teras reaktor TRIGA 2000 Bandung mencapai kekritisan pertama adalah seperti tampak dalam Tabel 11.

Tabel 11. Distribusi *burnup* elemen bakar yang dipakai dalam percobaan pemuatan kritis.

Burnup (%)	Jumlah Elemen Bakar
0,0 (baru)	24
$0 < x \leq 5,0$	11
$5,0 < x \leq 10,0$	6
$10,0 < x \leq 15,0$	1
$15,0 < x \leq 20,0$	1
$20,0 < x \leq 25,0$	2
$25,0 < x \leq 30,0$	3
$40,0 < x \leq 45,0$	4
$45,0 < x \leq 50,0$	3

Dari tabel terakhir itu tampak bahwa pengaruh elemen bakar bekas semakin mengecil karena prosentasenya semakin kecil, yaitu sekitar 21,8 % (= 12 buah) yang memiliki *burnup* lebih dari 20 %, sedangkan 43 elemen bakar lainnya masih baru atau masih segar.

Kenyataan ini sangat membantu MCNP-4B dalam memprediksi secara tepat massa kritis reaktor TRIGA 2000 Bandung.

VI. KESIMPULAN

Dengan menganggap bahwa data *burnup* elemen bakar yang didokumentasikan di P3TkN adalah sah, maka dapat disimpulkan bahwa pengandaian yang digunakan dalam analisis di atas adalah sangat memadai untuk digunakan pada program MCNP-4B. Pengandaian tersebut adalah bahwa setiap elemen bakar bekas terdiri dari ^{235}U yang massanya tergantung dari *burnup*nya, massa ^{238}U dianggap sama seperti yang terdapat di dalam elemen bakar baru serta hasil fisi dan bahan racun lainnya dapat diabaikan pengaruhnya.

Akan tetapi apabila data *burnup* tersebut diragukan kebenarannya maka dapat disimpulkan bahwa elemen bakar bekas yang ada di P3TkN adalah masih relatif segar, yakni tingkat *burnup*nya jauh lebih kecil dari yang didokumentasikan.

Untuk memastikan manakah yang paling benar dari dua kesimpulan di atas maka perlu segera dilakukan analisis lengkap perhitungan kekritisan teras reaktor TRIGA 2000 Bandung, dengan memperhitungkan pengaruh hasil fisi maupun bahan racun lainnya di dalam elemen bakar bekas.

Terlepas dari kontroversi di atas dapat disimpulkan bahwa program MCNP-4B sangat membantu dan sangat cocok untuk diterapkan dalam menentukan karakteristik neutronik teras reaktor TRIGA 2000 Bandung.