

PENINGKATAN DAYA REAKTOR TRIGA MARK II BANDUNG MENJADI 2000 kW DITINJAU DARI ASPEK DISTRIBUSI DAYA DAN SUHU DALAM ELEMEN BAKAR

K. Kamajaya *), Muhadi A.W. **), Suhandar ***), Hari S. ***), RPH Ismuntoyo *****)

*) Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

***) Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta - Badan Tenaga Atom Nasional

*****) Pusat Produksi Radioisotop - Badan Tenaga Atom Nasional

*****) Pusat Penelitian Teknologi Keselamatan Reaktor - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENINGKATAN DAYA REAKTOR TRIGA MARK II BANDUNG MENJADI 2000 kW DITINJAU DARI ASPEK DISTRIBUSI DAYA DAN SUHU DALAM ELEMEN BAKAR. Reaktor TRIGA Mark II Bandung sudah dioperasikan sejak Oktober 1964 dengan daya maksimum 250 kW. Kemudian mulai bulan Desember 1971 reaktor ini ditingkatkan dayanya menjadi 1000 kW yaitu dengan memperluas teras reaktor yang semua hanya ada sampai ring F kemudian menjadi sampai ring G. Jumlah lubang pada seluruh ring menjadi 127 lubang. Menurut rencana kapasitas daya reaktor akan ditingkatkan lagi sehingga menjadi 2000 kW. Maka pada makalah ini akan dibahas rencana peningkatan daya tersebut ditinjau dari aspek distribusi daya dalam elemen bakar di dalam teras reaktor. Dari hasil pengukuran didapatkan pada daya 1000 kW, suhu maksimum di dalam elemen bakar yang terletak pada ring B₄ adalah 372° C dan daya yang dihasilkan sebesar 14,42 kW elemen bakar. Bila dilakukan ekstrapolasi maka pada suhu 400° C dan teras reaktor terisi penuh elemen bakar, daya yang dihasilkan 1217,7 kW. Walaupun teras dilebarkan masih sulit untuk mendapatkan daya 2000 kW, karena suhu elemen bakar pada ring B akan melampaui 400° C. Untuk mengatasi hal tersebut maka kemungkinan cara yang dapat ditempuh adalah mengganti sebagian bahan bakar dengan bahan bakar lain yang mempunyai kandungan uranium yang lebih banyak dan mengubah bentuk teras reaktor menjadi bentuk heksagonal, sehingga pendinginan pada seluruh ring menjadi merata. Dengan 106 buah elemen bakar dan daya rata-rata per elemen bakar sebesar 19,00 kW akan mampu dihasilkan daya total di dalam teras sebesar 2000 kW.

ABSTRACT

THE UPGRADING OF THE BANDUNG TRIGA MARK II REACTOR TO 2000 kW VIEW POINT OF POWER DISTRIBUTION ON FUEL ELEMENTS. The Bandung TRIGA Mark II reactor has been operated since October 1964 with maximum power 250 kW. Start in December 1971 it was the first upgrading from 250 kW to 1000 kW, the reactor core changed to become 7 rings (A-G), the previously 6 rings (A-F), the total hole in the reactor core become 127 holes. In the near future the thermal reactor power will be increases to 2000 kW. For these purposed, in this paper will determine the increasing of power level and the power distribution on fuel elements in reactor core. For power level 1000 kW, the experiment data showed the maximum temperature was 372° C on fuel element B₄ and it produced 14,42 kW/fuel element for full power. If we do some extrapolation for those data so the reactor will produce 1217.7 kW for 400° C. It is very difficult to get 2000 kW for the reactor core is kept unchanged, because the fuel element temperature will exceed 400° C. Because of that problem, some of the fuel elements should be changed to the higher uranium contain, as well as replaced a circular core configuration to a hexagonal core for better core cooling system. By using 106 fuel elements or an average power 19.00 kW/fuel element, the reactor core will produce total power 2000 kW.

PENDAHULUAN

Sejak Desember 1971 daya reaktor Triga Mark II Bandung ditingkatkan menjadi 1000 kW, yaitu dengan melakukan perubahan pada

teras reaktor. Semula teras reaktor hanya sampai pada ring F, kemudian diubah sehingga teras reaktor sampai pada ring G. Yaitu 1 lubang pada ring A (sentral), 6 lubang pada ring B, 12

lubang pada ring C, 18 lubang pada ring D, 24 lubang pada ring E, 30 lubang pada ring F, dan 36 lubang pada ring G. Sehingga jumlah lubang pada seluruh ring di dalam teras reaktor menjadi 127 lubang.

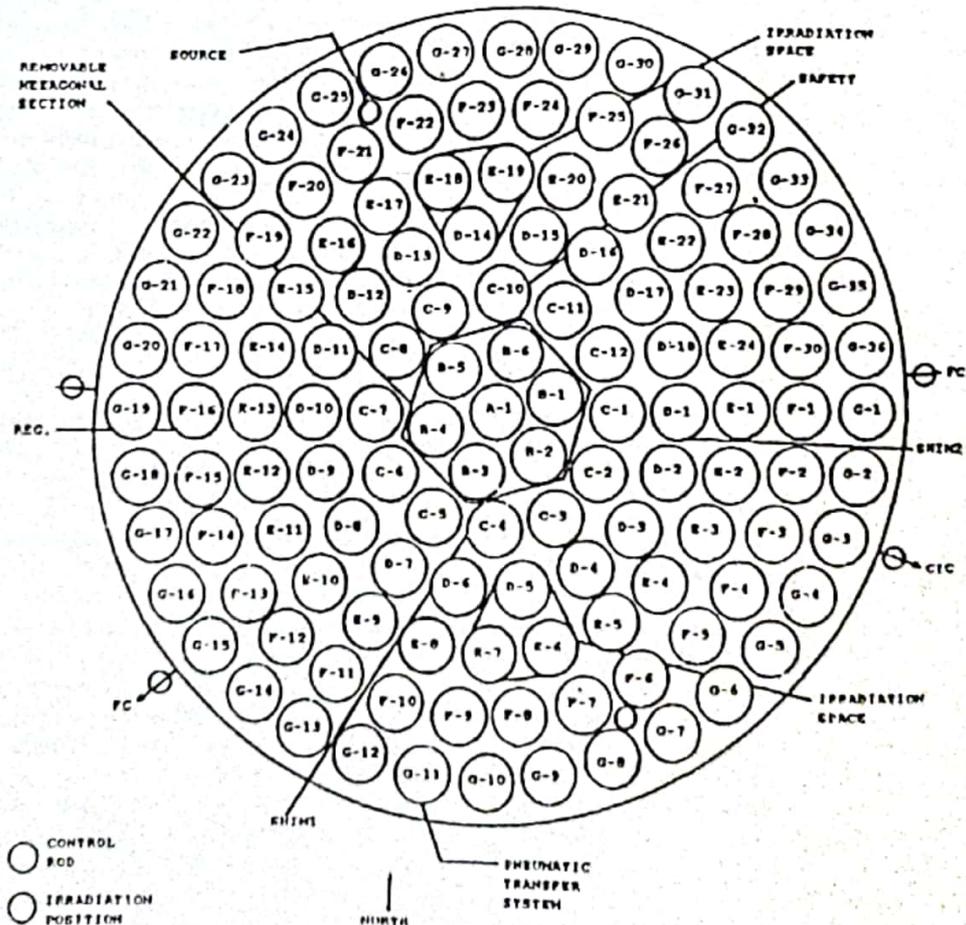
Pada saat pengamatan ini dilakukan, konfigurasi teras reaktor terisi 107 elemen bakar yaitu 28 elemen bakar tipe-104 dan 79 elemen bakar tipe-106. Dengan 2 (IFE) instrumented fuel element yang ditempatkan pada ring B₄ dan ring C₃. Konfigurasi ini telah dipergunakan sejak Desember 1993 untuk membangkitkan daya maksimum 1000 kW, seperti terlihat pada Gambar 1.

Jumlah maksimum bahan bakar termasuk IFE yang dapat dipergunakan untuk seluruh ring adalah 121 elemen bakar dari 127 tempat yang ada. Ini berarti ada 6 tempat yang tidak dapat dipakai, yaitu ada 4 tempat untuk batang kendali, masing-masing satu tempat pada ring A dan ring G₁₁ dipakai sebagai fasilitas iradiasi.

Tabel 1. Spesifikasi bahan bakar reaktor TRIGA Mark II Bandung dan IFE.

Spesifikasi	Elemen bakar	IFE
panjang keseluruhan (in)	28,37	45,25
panjang aktif (in)	15,00	15,00
diameter keseluruhan (in)	1,48	1,48
diameter (in)	1,43	1,43
komposisi	U-Zr-H	U-Zr-H
lebar gap (in)	0,005	0,005
massa ²³⁵ U (gram)	55,00	55,00
pengkayaan (%)	20,00	20,00
bahan kelongsong	SS-304	SS-304
tebal kelongsong (in)	0,02	0,02
perbandingan H/Zr	1,60	1,60

Suhu pada pusat bahan bakar diukur dengan mempergunakan IFE, yaitu elemen bakar yang dilengkapi dengan tiga buah termokopel. Sedangkan distribusi daya dan fluks neutron dihitung dengan mempergunakan paket program TRIGAC. Sebagai perbandingan fluks neu-



tron juga diukur secara langsung pada beberapa ring. Konstanta-konstanta kelompok untuk perhitungan difusi dihitung berdasarkan riwayat tiap elemen bakar dalam teras.

Jadi IFE selain sebagai alat untuk mengukur suhu pusat elemen bakar, juga berfungsi sebagai bahan bakar reaktor. Saat ini ada dua IFE yang selalu dipasang secara *on-line* pada ring B₄ dan C₃ di dalam teras reaktor.

Tabel 2. Konfigurasi teras reaktor

Ring	elemen bakar	IFE	batang kendali	grafit	kosong	jumlah
A	-	-	-	-	1	1
B	5	1 (B ₄)	-	-	-	6
C	9	1 (C ₃)	2	-	-	12
D	17	-	(C ₄ , C ₁₀)	-	-	18
E	24	-	1 (D ₁)	-	-	24
F	27	-	-	1	1	30
G	25	-	1 (F ₁₆)	5	6	36

Laju pembangkitan panas oleh elemen bakar.

Besarnya laju pembangkitan panas yang dihasilkan oleh sebuah elemen bakar dapat dituliskan sebagai :

$$q'' = GN\sigma_f\phi \text{ watt/cm}^3$$

G = energi tiap reaksi fisi (200 Mev = 3,20 x 10⁻¹¹ joule)

N = rapat atom bahan bakar (atom/cm³)

σ_f = luas penampang pembelahan mikroskopis bahan bakar uranium (cm)

ϕ = fluks neutron (neutron/cm sec)

Kemudian panas yang dibangkitkan di dalam elemen bakar ini akan diteruskan melewati celah antara elemen bakar dengan kelongsongnya, kemudian melewati kelongsong dan sampai ke fluida pendinginnya. Struktur material dari elemen bakar pada reaktor TRIGA membatasi, suhu maksimum yang diperkenankan pada pusat elemen bakar adalah 400 °C walaupun dari segi material dan metalurgi mampu mencapai suhu lebih dari 500 °C.

Di dalam konfigurasi teras reaktor yang ada sekarang ini, pada setiap *zone* diisi dengan elemen bakar yang mempunyai deplesi hampir sama, sehingga setiap elemen bakar yang menempati ring yang sama, seperti ring B₁, B₂, B₃, B₄, B₅, dan B₆, mempunyai kandungan bahan bakar hampir sama. Sehingga pembangkitan daya yang dihasilkan oleh tiap elemen bakar untuk daerah ring yang sama dianggap sama. Jadi tiap-tiap elemen bakar pada ring B menghasilkan daya yang sama, demikian juga tiap-

tiap elemen bakar pada ring G akan menghasilkan daya yang sama juga.

Program TRIGAC.

Program TRIGAC ini khusus dipakai untuk menghitung distribusi fluks, distribusi daya, *burn-up* dari setiap elemen bakar di dalam teras dan k(efektif) dari reaktor TRIGA. *Library* dari program TRIGAC mempergunakan dua grup penampang lintang efektif untuk semua unit sel.

Saat ini untuk menghitung distribusi daya dan fluks neutron di dalam teras reaktor TRIGA Bandung selalu mempergunakan program TRIGAC dan sebagai pembandingan juga dipakai program CITATION, di samping dilakukan pengukuran secara langsung.

TATAKERJA DAN PENGUKURAN

Dari hasil pengukuran dengan mempergunakan IFE didapatkan suhu pada pusat bahan bakar. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan oleh Tabel 3 di bawah ini.

Tabel 3. Suhu pusat bahan bakar pada daya 900 kW

Posisi pada ring	Suhu (°C)
B ₄	368
C ₆	359
D ₁₀	347
E ₁₄	326
F ₁₇	293
G ₂₁	233

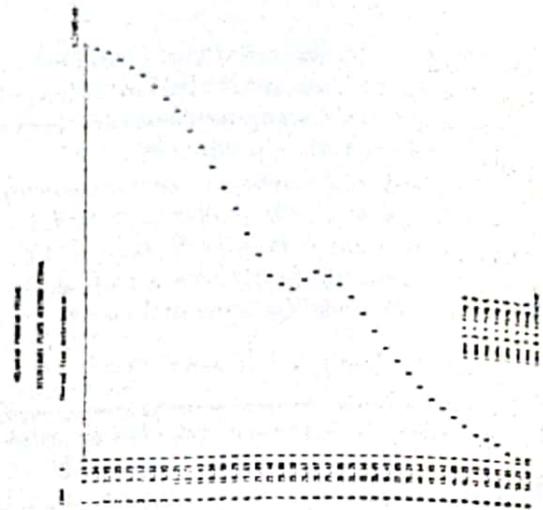
Bila dibuat grafik hubungan antara suhu pusat elemen bakar terhadap posisi elemen bakar pada setiap ring akan didapatkan hasil seperti pada Gambar 2.

Kemudian dengan memvariasikan daya reaktor akan didapatkan kurva hubungan antara daya reaktor terhadap suhu pusat bahan bakar pada ring B, ring C dan ring G seperti pada Gambar 3 dan Tabel 4.

Sedangkan dengan mempergunakan program TRIGAC akan didapat distribusi daya dan distribusi fluks neutron di dalam teras reaktor. Sebagai perbandingan distribusi fluks juga dihitung dengan mempergunakan program CITATION. Perhitungan dari kedua program tersebut hampir sama dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5.

Tabel 4. Hubungan daya reaktor terhadap suhu pusat bahan bakar

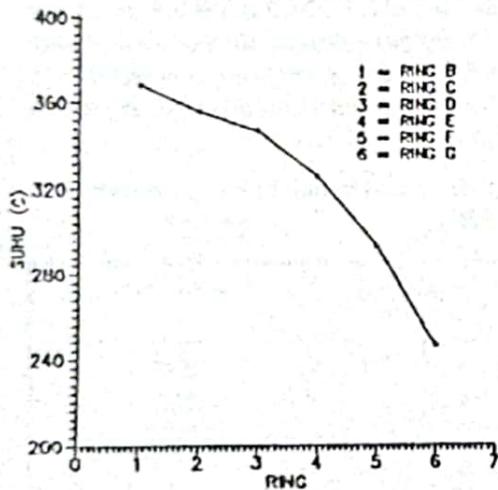
Daya (kW)	Suhu (°C)		
	Ring B	Ring C	Ring G
100	114	116	76
200	176	178	105
300	220	224	122
400	251	252	152
500	276	276	169
600	302	299	187
700	326	323	203
800	347	342	217
900	364	359	233
1000	372	366	246



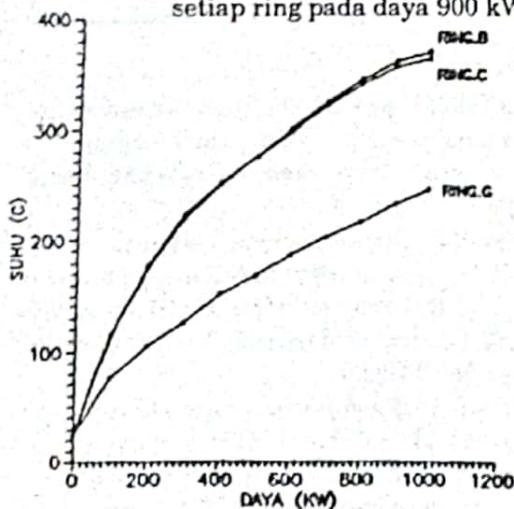
Gambar 5. Distribusi fluks neutron termal (dari program TRIGAC)

Tabel 5. Kerapatan daya rata-rata setiap zone pada daya 1000 kW (program TRIGAC)

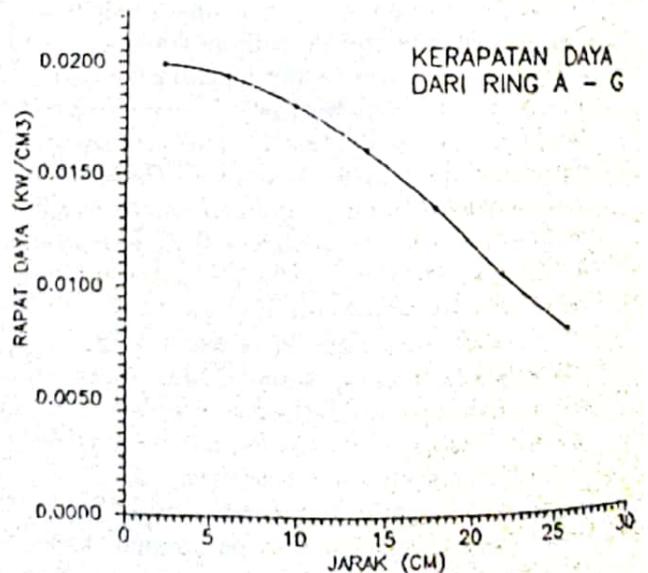
Zone	x (cm)	Kerapatan daya (kW/cm ²)
1	2,3071	0,0198939
2	6,1041	0,0194058
3	10,0565	0,0181270
4	14,0337	0,0160927
5	18,0182	0,0134826
6	22,0086	0,0104838
7	26,0000	0,00799884



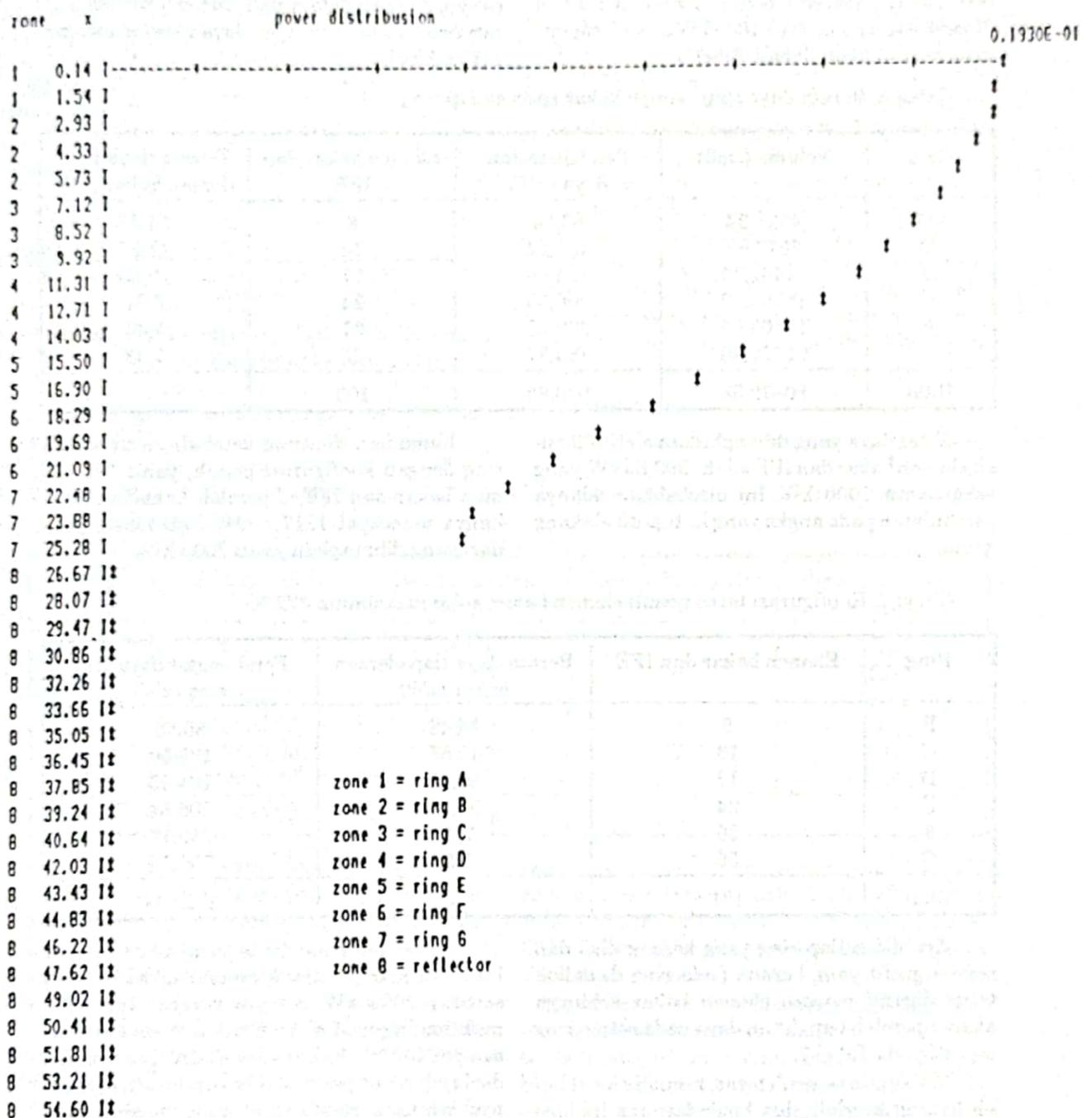
Gambar 2. Suhu pusat bahan bakar pada setiap ring pada daya 900 kW.



Gambar 3. Hubungan antara daya reaktor terhadap suhu pusat elemen bakar pada ring B, C dan ring G



Gambar 6. Distribusi kerapatan daya pada setiap ring pada daya 1000kW



Gambar 4. Distribusi daya reaktor (dari program TRIGAC)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan mempergunakan data pada Tabel 5, akan diperoleh rerata daya (seperti pada Gambar 6) yang dibangkitkan oleh sebuah elemen bakar pada ring tertentu apabila reaktor dioperasikan pada daya 1000 kW adalah seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 6.

reaktor ialah 1120 kW. Sehingga rerata daya tiap elemen bakar dapat dilihat pada Tabel 7.

Total daya seharusnya 1120 kW, ada sedikit penyimpangan dalam perhitungan karena adanya pembulatan sehingga daya reaktor menjadi 1119,65 kW.

Tabel 6. Rerata daya tiap elemen bakar pada setiap ring

Ring	Volume (cm ³)	Pembangkitan daya (kW)	Elemen bakar dan IFE	Rerata daya tiap elemen bakar (kW)
A+B	4521,34	86,54	6	14,42
C	7577,63	138,52	10	13,85
D	11462,30	184,46	17	10,85
E	15282,90	206,65	24	8,61
F	19103,95	200,29	27	7,42
G	22922,46	183,37	25	7,33
Total	80872,58	999,83	109	-

Total daya yang dibangkitkan oleh 109 buah elemen bakar dan IFE ialah: 999,83 kW, yang seharusnya 1000 kW. Ini disebabkan adanya pembulatan pada angka yang ke tiga dibelakang koma.

Kemudian dihitung kembali untuk setiap ring dengan konfigurasi penuh, yaitu 121 elemen bakar dan IFE, diperoleh kenaikan daya hanya mencapai 1217,7 kW. Jadi masih jauh dari yang diharapkan yaitu 2000 kW.

Tabel 7. Konfigurasi teras penuh elemen bakar, suhu maksimum 372 °C

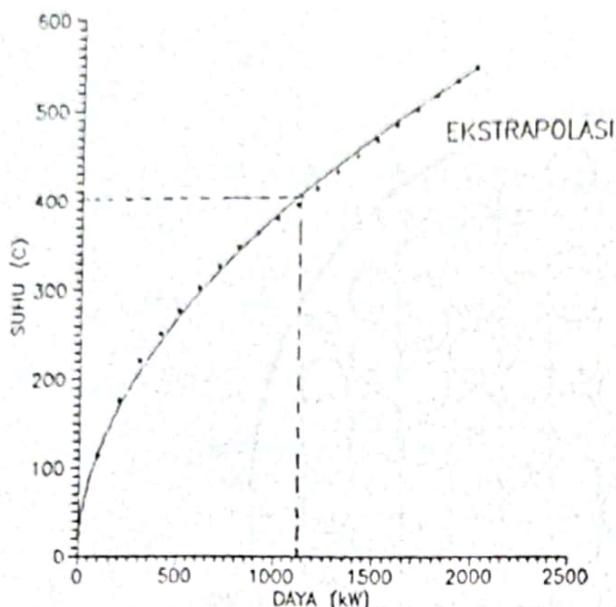
Ring	Elemen bakar dan IFE	Rerata daya tiap elemen bakar (kW)	Pembangkit daya tiap ring (kW)
B	6	14,42	86,52
C	10	13,85	138,50
D	17	10,85	184,45
E	24	8,61	206,64
F	29	7,42	215,18
G	35	7,33	256,55
Total	121	-	1123,84

Apabila setiap ring yang kosong diisi dan semua grafit yang berada pada ring di dalam teras diganti dengan elemen bakar sehingga akan diperoleh bangkitan daya pada setiap ring seperti pada Tabel 7.

Walaupun seluruh teras, kecuali empat buah batang kendali, dua buah fasilitas iradiasi yaitu ring A dan G11, diisi dengan elemen bakar daya reaktor hanya mampu naik menjadi 1123,84 kW. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 7.

Apabila dilakukan ekstrapolasi dari grafik hubungan antara suhu dan daya reaktor, maka pada suhu 400 °C yaitu suhu maksimum yang diperkenankan pada pusat elemen bakar, daya

Ini berarti lebar teras yang ada sekarang ini tidak mampu untuk membangkitkan daya sebesar 2000 kW, dengan persyaratan suhu maksimum pusat elemen bakar yang terpanas sampai 400 °C. Jadi susunan teras yang terdiri dari ring A sampai ring G harus diubah bentuknya sehingga rerata daya yang dibangkitkan oleh setiap ring tidak terlalu jauh berbeda seperti pada kondisi sekarang ini, yaitu oleh elemen bakar pada ring A = 16,43 kW/elemen bakar dan pada ring G = 8,22 kW/elemen bakar. Pelebaran teras tidak memungkinkan, karena ring G yaitu ring yang terluar sudah dekat ke reflektor. Jadi tidak mungkin dibuat tambahan satu ring lagi



Gambar 7. Ekstrapolasi daya terhadap suhu untuk elemen bakar pada ring B

di luar ring G. Kecuali dengan membongkar reflektor.

antar ring menjadi sama, demikian juga jarak satu elemen bakar dengan elemen bakar lainnya baik pada ring yang sama ataupun ring yang berbeda adalah sama. Ditinjau dari segi termohidrolik akan menjadi lebih seimbang dan suhu pusat elemen bakar pada ring B dan ring C dapat diturunkan. Selain itu laju aliran fluida pendingin pada pendingin primer maupun sekunder perlu dinaikkan. Pada saat sekarang ini laju aliran pendingin primer 350 gpm dan sekunder 700 gpm.

Bila susunan ring dalam bentuk heksagonal tersebut dapat dipergunakan, dengan pembangkitan rerata daya 19,00 kW/elemen bakar seperti yang direkomendasi oleh GA untuk pendinginan konveksi bebas, maka jumlah elemen bakar yang dibutuhkan untuk membangkitkan daya sebesar 2000 kW adalah 106 elemen bakar.

KESIMPULAN.

Dari susunan teras reaktor yang ada seka-

Tabel 8. Reaktor dioperasikan pada daya 1120 kW dengan suhu 400 °C pada ring B dan ada 109 elemen bakar

Ring	Volume (cm ³)	Pembangkitan Daya (kW)	Elemen bakar dan IFE	Rerata daya tiap elemen bakar (kW)
A+B	4521,34	98,60	6	16,43
C	7577,63	153,85	10	15,38
D	11462,30	206,60	17	12,15
E	15282,90	230,79	24	9,61
F	19103,95	224,36	27	8,31
G	22922,46	205,45	25	8,22
Total	80872,58	1119,65	109	-

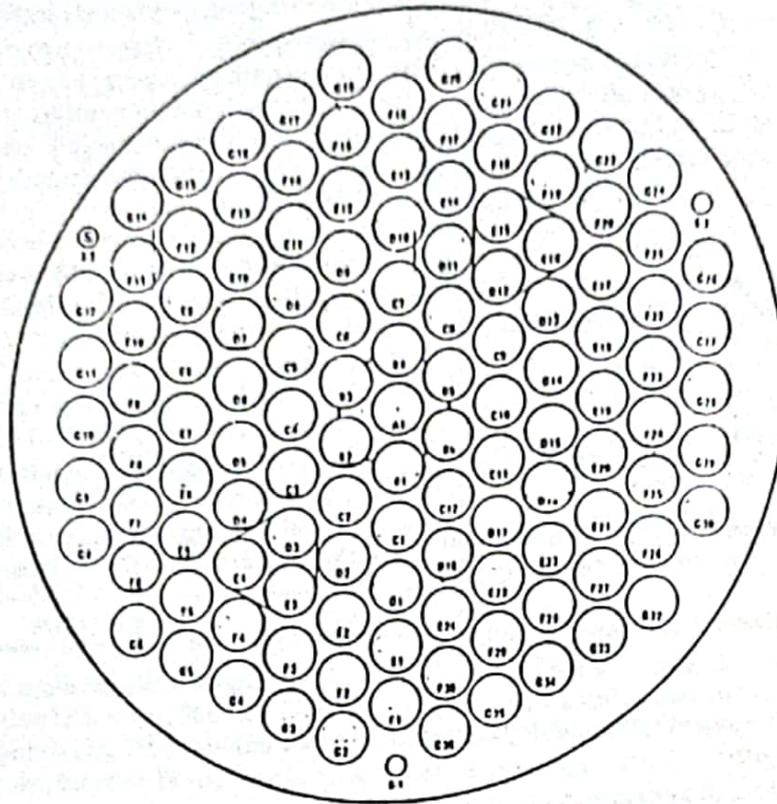
Kemungkinan cara yang dapat ditempuh adalah mengganti beberapa bahan bakar dengan kandungan uranium yang lebih banyak, mengubah susunan ring yang telah ada dengan susunan baru yang berbentuk heksagonal. Karena susunan ring yang telah ada ditinjau dari aspek termohidrolik kurang seimbang. Pengambilan panas yang dibangkitkan elemen bakar oleh pendingin di daerah pusat yaitu daerah ring B dan ring C lebih kecil dibandingkan dengan pada ring bagian luar. Karena jarak antar elemen bakar pada daerah bagian luar lebih lebar, sehingga suhu di ring B dan C jauh lebih tinggi dibandingkan dengan ring yang lebih luar.

Dengan mengubah susunan teras menjadi bentuk heksagonal (seperti pada Gambar 8) mulai dari ring A sampai ke ring G, sehingga jarak

rang ini, daya maksimum yang dapat dibangkitkan di dalam teras adalah 1217,7 kW dengan suhu pada pusat elemen bakar tidak melebihi 400 °C dengan jumlah elemen bakar 121 yaitu tidak ada ring yang kosong.

Pelebaran teras tidak memungkinkan karena adanya reflektor setebal 30 cm di luar ring G. Jadi jari-jari teras reaktor sudah mencapai batas maksimum 26 cm. Teras ini hanya bisa dilebarkan dengan cara membongkar reflektor dan belum tentu bisa menjamin bahwa syhu pada ring B tidak akan melampaui 400 °C.

Cara yang terbaik adalah dengan mengganti susunan ring yang ada sekarang ini dengan susunan ring baru yang berbentuk heksagonal, sehingga jarak antar elemen bakar pada semua tempat adalah sama, mengganti beberapa bahan bakar dengan bahan bakar lain



Gambar 8. Susunan ring bentuk heksagonal

yang mempunyai kandungan uranium yang lebih banyak dan memperbesar laju aliran fluida pendingin pada primer maupun sekunder. Jadi dengan rerata daya tiap elemen bakar sebesar

19,00 kW akan dapat dihasilkan daya total dalam teras sebesar 2000 kW atau 2 MW dengan 106 buah elemen bakar.

DAFTAR PUSTAKA.

1. Mele, I., Ravnik, M., TRIGAC - A computer Program Package for Research Reactor Calculation (January 1986).
2. International Symposium of the Utilization of Multi-purpose Research Reactor and Related International Co-operation, Grenoble, France, IAEA-SM-300/033 (October 19-23 1987).
3. Ravnik, M., Mele, I., Slavic, S., Calculation analysis of TRIGA Mark II reactor core composed of two types of fuel elements, IAEA Progress Report (April 1984).
4. Proceeding of First Asian Symposium on Research Reactor, Rikkyo University, Tokyo (November 18 - 21, 1986).
5. Tenth European TRIGA Users Conference, Atominstut der Osterreichischen Universitaten, Vienna, Austria (September 14-16, 1988).