

## STUDI DESAIN REAKTOR TEMPERATUR TINGGI BERPENDINGIN GAS HELIUM BERBAHAN BAKAR URANIUM DIOKSIDA

(*DESIGN STUDY OF THE HIGH TEMPERATURE HELIUM GAS-COOLED  
REACTOR WITH URANIUM DIOXIDE FUEL*)

oleh

Ratu Fenny Muldiani, S.Si.  
(UP MKU Politeknik Negeri Bandung)

### Abstrak

*High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)* adalah salah satu jenis reaktor temperatur tinggi berpendingin gas helium (*High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR*) yang didesain dengan *low-enriched uranium (LEU)*. Sebagai reaktor test yang memiliki karakteristik khusus dalam bidang keselamatan, HTTR dirancang dengan daya 30 MW, bertemperatur output 950 °C dan dijaga keadaannya agar temperatur teras tak melebihi 1600 °C dengan pengaturan distribusi daya pada arah radial dan aksial teras reaktor melalui pengaturan posisi elemen bahan bakar yang memiliki variasi pengayaan antara 3.4 wt% - 9.9 wt%. Perhitungan kekritisan pertama, ekses reaktifitas dan distribusi daya dilakukan dengan menggunakan program SRAC-EWS yang memanfaatkan data nuklida dari JENDL3.2 untuk menghasilkan data penampang makroskopik yang efektif dari masing-masing komposisi material teras reaktor dengan periode *burn-up* 660 hari. Perhitungan *cell* menggunakan geometri berbentuk hexagonal untuk elemen bahan bakar dan silinder geometri untuk perisai lentari, perisai dapat ganti, batang kendali dan *dummy block* bahan bakar. Keseluruhan perhitungan teras menggunakan CITATION modul dengan model geometri  $\theta$ -R-Z.

**Kata Kunci :** *low-enriched uranium, kekritisan pertama, ekses reaktifitas, distribusi daya, burn-up*

### Abstract

High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) is the type of High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) which use low-enriched uranium. As a test reactor owning special safety characteristic, HTTR has designed with thermal output of 30 MW, outlet temperature of 950 °C and the maximum fuel temperature shall not be exceed 1600 °C at any anticipated with arrangement core power distribution at radial and axial direction passing arrangement position of uranium enrichment. The lowest and highest enrichment are 3.4 wt% and 9.9 wt%, respectively. The first criticality, excess reactivity and power distribution of HTTR with burn-up period 660 days was examined using SRAC-EWS program. The user nuclear library was derived mainly from JENDL3.2 to yield effective macroscopic from each material composition. Cell calculation was performed by using hexagonal geometry for fuel assembly and using the equivalent cylindrical geometry for permanent reflectors, replaceable reflectors, control rods and dummy fuel elements. The whole core calculation was done using CITATION module of SRAC-EWS system in  $\theta$ -R-Z geometry.

**Keyword:** *low-enriched uranium, first criticality, excess reactivity, power distribution, burn-up*

## Pendahuluan

Penemuan sumber energi baru harus berkembang sesuai dengan peningkatan kebutuhan manusia terhadap energi. Selain itu sumber energi baru juga diharapkan dapat mengurangi polusi global, mudah didistribusikan di seluruh dunia, memiliki tingkat keselamatan yang tinggi dan ekonomis. Beberapa pihak percaya bahwa hidrogen mampu menjadi sumber energi baru yang memenuhi harapan. Hidrogen dapat digunakan sebagai bahan bakar yang bisa mengurangi emisi global  $CO_2$  secara drastis. Tetapi sejumlah besar hidrogen di alam terikat dalam suatu senyawa, yaitu  $H_2O$  dan bahan bakar fosil ( $C_mH_n$ ) seperti batu bara, minyak dan gas alam. Untuk memisahkan hidrogen dari unsur lain diperlukan sumber energi lain. Metode produksi hidrogen konvensional cukup mahal dan menghasilkan banyak  $CO_2$ . Hal inilah yang mengurangi produksi dan pemanfaatan hidrogen selanjutnya, tetapi dengan meningkatnya perhatian yang serius terhadap polusi global dan mendesaknya kebutuhan sumber energi baru maka salah satu alternatifnya adalah dengan pengembangan metode produksi hidrogen konvensional ke arah yang lebih baik.

Energi nuklir menawarkan keuntungan dalam produksi hidrogen, ramah lingkungan karena tidak menghasilkan karbondioksida, sulfur atau nitrogen oksida yang mencemari lingkungan, disamping itu juga mempunyai hasil yang intensif, berkelanjutan dan ekonomis. Energi nuklir digunakan sebagai energi input dalam produksi hidrogen. Salah satu jenis reaktor yang dikembangkan untuk keperluan ini adalah HTGR (*High Temperatur Gas-cooled Reactor*) karena reaktor ini dapat menghasilkan suhu tinggi yang sesuai dengan kebutuhan pada produksi hidrogen.

Dalam perancangan reaktor diperlukan analisis yang komprehensif, salah satunya yaitu analisis neutronik yang meliputi penentuan kekritisan, reaktifitas, *power density* dan analisa bahan bakar

pada teras. Kekritisan pertama dan harga eksese reaktifitas HTTR dianalisa saat pengisian bahan bakar pada tipe teras anular, karena data eksperimen dari tipe teras ini sangat diharapkan untuk validasi kode komputer dan model teras untuk skala yang lebih besar.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan untuk menentukan jumlah kolom bahan bakar yang menyebabkan kekritisan pertama (*HTTR-First Criticality*) dan juga untuk menentukan harga eksese reaktifitasnya (*HTTR-Excess Reactivity*). Perhitungan juga dilakukan untuk menganalisa *burn-up* dan distribusi daya teras reaktor pada awal reaktor diaktifkan (*Beginning of Life*).

Saat reaktor beroperasi terjadilah proses pembakaran bahan bakar, sehingga komposisi bahan bakar mengalami perubahan (*depletion*) dan mengakibatkan berkurang pula isotop fisiil. Untuk menganalisa desain teras digunakan program komputer yaitu berupa kode (*codes*) yang digunakan untuk mensimulasikan perilaku nuklir dalam teras reaktor.

## Metode

Menentukan Parameter Desain Teras Reaktor  
Perhitungan Komposisi Bahan Bakar pada  
Teras Reaktor

Dalam pendesainan reaktor ini pertama kali dilakukan perhitungan densitas untuk masing-masing nuklida dari komposisi material teras reaktor, meliputi komposisi kompak bahan bakar (kernel, lapisan mantel partikel bahan bakar, matrik), homogenisasi kompak bahan bakar, racun dapat bakar, komposisi batang bahan bakar (*graphite sleeve*), blok hexagonal bahan bakar, blok perisai dapat ganti, blok grafit bahan bakar (*dummy block*) dan blok perisai lestari, serta blok pandu batang kendali.

Tabel 1 Kerapatan Atom Pada Kompak Bahan Bakar (Kernel, Layer Partikel Bahan Bakar + Matrik)

|                |                  | Pengayaan Uranium |           |           |           |           |           |
|----------------|------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                | Nuklida          | 3.4(wt%)          | 3.9(wt%)  | 4.3(wt%)  | 4.8(wt%)  | 5.2(wt%)  | 5.9(wt%)  |
| Kernel         | $^{235}\text{U}$ | 8.2367E-4         | 9.5638E-4 | 1.6429E-3 | 1.3627E-3 | 1.4522E-3 | 1.6357E-3 |
|                | $^{238}\text{U}$ | 2.3280E-2         | 2.3038E-2 | 2.3008E-2 | 2.2834E-2 | 2.2750E-2 | 2.2586E-2 |
|                | O                | 4.8168E-2         | 4.7948E-2 | 4.8102E-2 | 4.7993E-2 | 4.8004E-2 | 4.8044E-2 |
|                | $^{10}\text{B}$  | 1.1010E-7         | 1.0602E-7 | 1.0994E-7 | 1.1207E-7 | 1.4786E-7 | 1.1456E-7 |
|                | $^{11}\text{B}$  | 4.4317E-7         | 4.2673E-7 | 4.4251E-7 | 4.5108E-7 | 5.9515E-7 | 4.6111E-7 |
| Layer + Matrik | C                | 8.2161E-2         | 8.1408E-2 | 8.1639E-2 | 8.1702E-2 | 8.1638E-2 | 8.1776E-2 |
|                | Si               | 2.2280E-3         | 2.2540E-3 | 2.2762E-3 | 2.2696E-3 | 2.3029E-3 | 2.2722E-3 |
|                | $^{10}\text{B}$  | 1.8783E-8         | 1.7151E-8 | 1.6898E-8 | 1.6455E-8 | 1.6373E-8 | 8.8611E-9 |
|                | $^{11}\text{B}$  | 7.5605E-8         | 6.8587E-8 | 6.7574E-8 | 6.5688E-8 | 6.5633E-8 | 3.5415E-8 |
|                |                  | Pengayaan Uranium |           |           |           |           |           |
|                | Nuklida          | 6.3(wt%)          | 6.7(wt%)  | 7.2(wt%)  | 7.9(wt%)  | 9.4(wt%)  | 9.9(wt%)  |
| Kernel         | $^{235}\text{U}$ | 1.7149E-3         | 1.8163E-3 | 1.9460E-3 | 2.1085E-3 | 2.4773E-3 | 2.5912E-3 |
|                | $^{238}\text{U}$ | 2.2455E-2         | 2.2325E-2 | 2.2291E-2 | 2.2246E-2 | 2.1812E-2 | 2.1740E-2 |
|                | O                | 4.7939E-2         | 4.7883E-2 | 4.8073E-2 | 4.8309E-2 | 4.8179E-2 | 4.8262E-2 |
|                | $^{10}\text{B}$  | 1.3454E-7         | 1.1297E-7 | 1.0745E-7 | 1.1037E-7 | 1.0526E-7 | 1.0544E-7 |
|                | $^{11}\text{B}$  | 5.4155E-7         | 4.5474E-7 | 4.3249E-7 | 4.4423E-7 | 4.2370E-7 | 4.2441E-7 |
| Layer + Matrik | C                | 8.1658E-2         | 8.1726E-2 | 8.1548E-2 | 8.2448E-2 | 8.1913E-2 | 8.2354E-2 |
|                | Si               | 2.2102E-3         | 2.2275E-3 | 2.2336E-3 | 2.1107E-3 | 2.1489E-3 | 2.0194E-3 |
|                | $^{10}\text{B}$  | 9.2024E-9         | 8.6738E-9 | 1.5909E-8 | 1.6248E-8 | 1.6758E-8 | 1.6962E-8 |
|                | $^{11}\text{B}$  | 3.6735E-8         | 3.4708E-8 | 6.3470E-8 | 6.5778E-8 | 6.7016E-8 | 6.8316E-8 |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 2 Kerapatan Atom Pada Homogenisasi Kompak Bahan Bakar

|  |                  | Pengayaan Uranium |           |           |           |           |           |
|--|------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|  | Nuklida          | 3.4(wt%)          | 3.9(wt%)  | 4.3(wt%)  | 4.8(wt%)  | 5.2(wt%)  | 5.9(wt%)  |
|  | $^{235}\text{U}$ | 6.6509E-5         | 7.6887E-5 | 8.5358E-5 | 9.5663E-5 | 1.2049E-4 | 1.3448E-4 |
|  | $^{238}\text{U}$ | 1.8659E-3         | 1.8396E-3 | 1.8362E-3 | 1.8366E-3 | 1.8229E-3 | 1.7983E-3 |
|  | $^{10}\text{B}$  | 2.6099E-8         | 2.4835E-8 | 2.4642E-8 | 2.4133E-8 | 2.4651E-8 | 1.3937E-8 |
|  | $^{11}\text{B}$  | 1.0505E-7         | 9.9963E-8 | 9.9189E-8 | 9.7138E-8 | 9.9222E-8 | 5.6098E-8 |
|  | C                | 7.6136E-2         | 7.5473E-2 | 7.5649E-2 | 7.5631E-2 | 7.5665E-2 | 7.5751E-2 |
|  | O                | 3.8607E-3         | 3.8291E-3 | 3.8392E-3 | 3.8605E-3 | 3.8468E-3 | 3.8255E-3 |
|  | Si               | 2.0505E-3         | 2.0718E-3 | 2.0943E-3 | 2.0890E-3 | 2.1200E-3 | 2.0903E-3 |
|  |                  | Pengayaan Uranium |           |           |           |           |           |
|  | Nuklida          | 6.3(wt%)          | 6.7(wt%)  | 7.2(wt%)  | 7.9(wt%)  | 9.4(wt%)  | 9.9(wt%)  |
|  | $^{235}\text{U}$ | 1.4041E-4         | 1.4899E-4 | 1.5793E-4 | 1.7296E-4 | 1.9780E-4 | 2.0843E-4 |
|  | $^{238}\text{U}$ | 1.7822E-3         | 1.7790E-3 | 1.7583E-3 | 1.7771E-3 | 1.7004E-3 | 1.7105E-3 |
|  | $^{10}\text{B}$  | 1.4730E-8         | 1.3658E-8 | 2.3131E-8 | 2.3934E-8 | 2.4146E-8 | 2.4594E-8 |

|          |           |           |           |           |           |           |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $^{11}B$ | 5.9288E-8 | 5.4973E-8 | 9.3106E-8 | 9.6338E-8 | 9.7191E-8 | 9.8995E-8 |
| $C$      | 7.5690E-2 | 7.5746E-2 | 7.5606E-2 | 7.6443E-2 | 7.6005E-2 | 7.6407E-2 |
| $O$      | 3.8052E-3 | 3.8159E-3 | 3.7924E-3 | 3.8596E-3 | 3.7564E-3 | 3.7979E-3 |
| $Si$     | 2.0372E-3 | 2.0533E-3 | 2.0566E-3 | 1.9428E-3 | 1.9802E-3 | 1.8622E-3 |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 3 Kerapatan Atom Pada Racun Dapat Bakar

| Nuklida  | H-I       | H-II      | Cakram Gafit |
|----------|-----------|-----------|--------------|
| $^{10}B$ | 4.4613E-4 | 5.6049E-4 | 7.1771E-9    |
| $^{11}B$ | 1.7640E-3 | 2.2162E-3 | 2.8889E-8    |
| $C$      | 8.7599E-2 | 8.8693E-2 | 8.8695E-2    |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 4 Batang Bahan Bakar (*Graphite Sleeve*)

| Nuklida  | IG-110    |
|----------|-----------|
| $^{10}B$ | 7.1811E-9 |
| $^{11}B$ | 2.8905E-8 |
| $C$      | 8.8745E-2 |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 6 Perisai Dapat Ganti

|          | Tipe A 1<br>1/3 | Tipe D 1/4 |
|----------|-----------------|------------|
| Nuklida  | IG-110          | IG-110     |
| $^{10}B$ | 7.2432E-9       | 7.2227E-9  |
| $^{11}B$ | 2.9155E-8       | 2.9072E-8  |
| $C$      | 8.8545E-2       | 8.8294E-2  |

Tabel 5 Blok Hexagonal Bahan Bakar

| Nuklida  | IG-110    |
|----------|-----------|
| $^{10}B$ | 7.8482E-9 |
| $^{11}B$ | 3.1590E-8 |
| $C$      | 8.8745E-2 |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 7 Blok Grafit Bahan Bakar (*Dummy Block*)

| Nuklida  | IG-11     |
|----------|-----------|
| $^{10}B$ | 4.8772E-8 |
| $^{11}B$ | 1.9631E-7 |
| $C$      | 8.8595E-2 |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 8 Perisai Lestari

| Nuklida  | PGX       |
|----------|-----------|
| $^{10}B$ | 3.6414E-8 |
| $^{11}B$ | 1.4657E-7 |
| $C$      | 8.6232E-2 |

Satuan: (n/cm/barn)

Tabel 9 Blok Pandu Batang Kendali

|          | Type A ½  |
|----------|-----------|
| Nuklida  | IG-11     |
| $^{10}B$ | 7.2842E-9 |
| $^{11}B$ | 2.9320E-8 |
| $C$      | 8.9046E-2 |

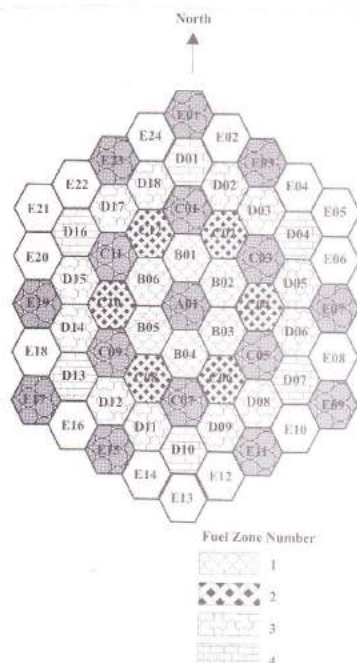
Satuan: (n/cm/barn)

- a. Pengaturan Elemen Bahan Bakar, Batang Kendali dan Racun Dapat Bakar Dalam Teras Reaktor.  
Pengaturan material di dalam teras reaktor memegang peranan penting. Teras reaktor HTTR disusun oleh 12 macam pengayaan

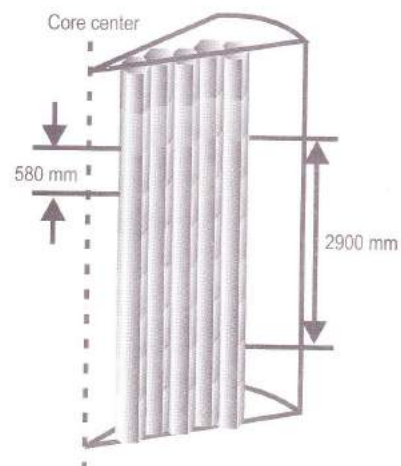
elemen bahan bakar masing-masing 3.4 wt% terendah dan yang tertinggi 9.9 wt%. Elemen bahan bakar diatur sedemikian rupa sehingga hasil perhitungan desain reaktor sesuai dengan yang diharapkan.

Table 10 Pengaturan Elemen Bakar dan Racun Dapat Bakar Dalam Teras

| Posisi Blok Bahan Bakar dari atas |                                                                                | No. Zona Bahan Bakar |                   |                   |                   |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                   |                                                                                | 1                    | 2                 | 3                 | 4                 |
| 1                                 | Pengayaan Uranium (wt%)<br>Jumlah Batang Bahan Bakar<br>Tipe Racun Dapat Bakar | 6.7<br>33<br>H-I     | 7.9<br>33<br>H-I  | 9.4<br>31<br>H-I  | 9.9<br>31<br>H-I  |
| 2                                 | Pengayaan Uranium (wt%)<br>Jumlah Batang Bahan Bakar<br>Tipe Racun Dapat Bakar | 5.2<br>33<br>H-II    | 6.3<br>33<br>H-II | 7.2<br>31<br>H-II | 7.9<br>31<br>H-II |
| 3                                 | Pengayaan Uranium (wt%)<br>Jumlah Batang Bahan Bakar<br>Tipe Racun Dapat Bakar | 4.3<br>33<br>H-II    | 5.2<br>33<br>H-II | 5.9<br>31<br>H-II | 6.3<br>31<br>H-II |
| 4                                 | Pengayaan Uranium (wt%)<br>Jumlah Batang Bahan Bakar<br>Tipe Racun Dapat Bakar | 3.4<br>33<br>H-I     | 3.9<br>33<br>H-I  | 4.3<br>31<br>H-I  | 4.8<br>31<br>H-I  |
| 5                                 | Pengayaan Uranium (wt%)<br>Jumlah Batang Bahan Bakar<br>Tipe Racun Dapat Bakar | 3.4<br>33<br>H-I     | 3.9<br>33<br>H-I  | 4.3<br>31<br>H-I  | 4.8<br>31<br>H-I  |



(a)



(b)

Gambar 1 Teras Dilihat Secara Radial (a) dan Aksial (b)

### b. Pembagian Region dan Mesh

Untuk mempermudah perhitungan parameter reaktor dan untuk mendekati keadaan real reaktor, maka dilakukan diskritisasi ruang geometri teras. Teras dibagi menjadi beberapa region. Region merupakan daerah-daerah pada teras reaktor yang memiliki karakteristik tertentu sesuai dengan material penyusunnya. Pembagian region berdasarkan pada sistem koordinat yang

digunakan dengan lebar yang bervariasi sesuai dengan pendesainan. Selanjutnya region-region tersebut dibagi menjadi beberapa mesh. Di dalam mesh inilah perhitungan parameter reaktor dilakukan, dengan tetap memperhitungkan keintegralan sistem. Sistem koordinat yang digunakan adalah sistem koordinat silinder tiga dimensi  $\theta - R - Z$ , pada tabel di bawah ini dapat dilihat pembagian region dan mesh pada teras reaktor

Tabel 11 Pembagian Teras Reaktor Arah  $\theta$

|             | Region 1  | Region 2  | Region 3  | Region 4  | Region 5  | Region 6  |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.1309    | 0.1309    | 0.0873    | 0.0436    | 0.2618    | 0.0436    |
|             | Region 7  | Region 8  | Region 9  | Region 10 | Region 11 | Region 12 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.0873    | 0.1309    | 0.1309    | 0.1309    | 0.1309    | 0.0873    |
|             | Region 13 | Region 14 | Region 15 | Region 16 | Region 17 | Region 18 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.0436    | 0.2618    | 0.0436    | 0.0873    | 0.1309    | 0.1309    |
|             | Region 19 | Region 20 | Region 21 | Region 22 | Region 23 | Region 24 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.1309    | 0.1309    | 0.0873    | 0.0436    | 0.2618    | 0.0436    |
|             | Region 25 | Region 26 | Region 27 | Region 28 | Region 29 | Region 30 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.0873    | 0.1309    | 0.1309    | 0.1309    | 0.1309    | 0.0873    |
|             | Region 31 | Region 32 | Region 33 | Region 34 | Region 35 | Region 36 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.0436    | 0.2618    | 0.0436    | 0.0873    | 0.1309    | 0.1309    |
|             | Region 37 | Region 38 | Region 39 | Region 40 | Region 41 | Region 42 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.1309    | 0.1309    | 0.0873    | 0.0436    | 0.0436    | 0.0436    |
|             | Region 43 | Region 44 | Region 45 | Region 46 | Region 47 | Region 48 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.0873    | 0.1309    | 0.1309    | 0.1309    | 0.1309    | 0.0873    |
|             | Region 49 | Region 50 | Region 51 | Region 52 | Region 53 | Region 54 |
| $\sum$ Mesh | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         | 1         |
| Sudut (rad) | 0.0436    | 0.2618    | 0.0436    | 0.0873    | 0.1309    | 0.1309    |

Tabel 12 Pembagian Teras Reaktor Arah R

|             | Region 1 | Region 2 | Region 3 | Region 4 | Region 5 | Region 6 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\sum$ Mesh | 2        | 3        | 3        | 3        | 3        | 5        |
| Radial (cm) | 18.901   | 31.100   | 32.38000 | 32.58000 | 32.65    | 51.200   |

Tabel 13 Pembagian Teras Reaktor Arah Z

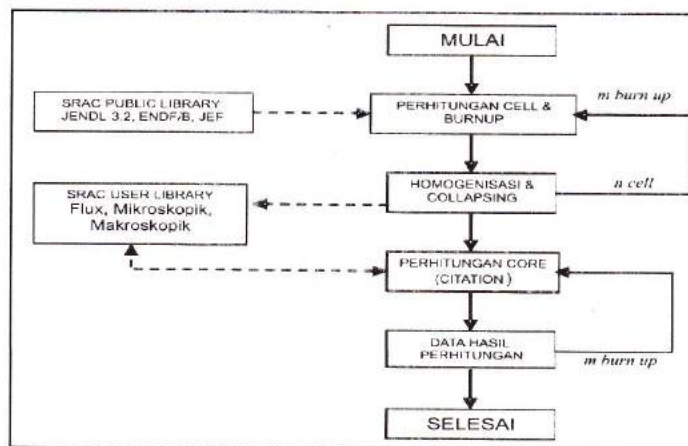
|             | Region 1 | Region 2 | Region 3 | Region 4 | Region 5 | Region 6 | Region 7 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\sum$ Mesh | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        | 4        |
| Aksial (cm) | 116.0    | 58.00    | 58.00    | 58.000   | 58.00    | 58.00    | 116.0    |

## 2. Perhitungan Desain dengan SRAC

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program SRAC-EWS (*Standart thermal Reactor Analysis Code system - Engineering Work Station*), program yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*). Program ini dapat membantu dalam mendesain dan menganalisa reaktor, khususnya reaktor termal. SRAC-EWS memanfaatkan data nuklida yang berasal dari JENDL3.2 untuk menghasilkan data penampang lintang mikroskopik dan makroskopik yang efektif dari masing-masing

komposisi material teras reaktor.

Perhitungan *cell* menggunakan geometri berbentuk hexagonal untuk elemen bahan bakar dan silinder geometri untuk perisai lentari, perisai dapat ganti, batang kendali dan *dummy block* bahan bakar. Keseluruhan perhitungan teras menggunakan CITATION modul dari kode komputer SRAC-EWS dengan geometri  $\theta$ -R-Z.



Gambar 2 Alur Perhitungan SRAC-EWS

Langkah perhitungan, untuk pertama kali SRAC-EWS akan menghitung *cell* dan *burn-up* untuk setiap *cell* bahan bakar, kemudian dihomogenisasi dan digabung berdasarkan grup energi yang telah ditentukan. Perhitungan berulang sesuai dengan input banyaknya *burn-up* dan *cell* bahan bakar yang dilibatkan.

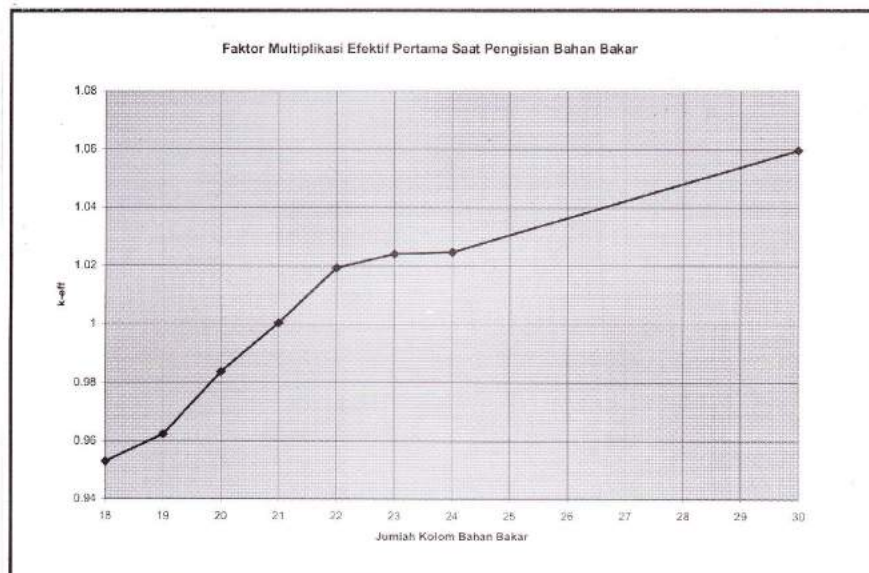
Hasil perhitungan akan disimpan pada *user library* yang kemudian akan digunakan CITATION modul untuk mencari faktor multiplikasi, reaktivitas dan distribusi daya teras reaktor.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Faktor Multiplikasi Efektif dan Ekses Reaktivitas Teras Reaktor

Tabel 14 Faktor Multiplikasi Efektif dan Ekses Reaktivitas Teras Reaktor Saat Pengisian Bahan Bakar

| Jumlah Kolom Bahan Bakar | k-eff     | $\rho$<br>(% $\Delta k / k$ ) |
|--------------------------|-----------|-------------------------------|
| 18                       | 0.9529468 | -4.938                        |
| 19                       | 0.962266  | -3.9213                       |
| 20                       | 0.983737  | -1.653                        |
| 21                       | 1.000311  | 0.0311                        |
| 22                       | 1.019263  | 1.8899                        |
| 23                       | 1.024051  | 2.34861                       |
| 24                       | 1.024557  | 2.3968                        |
| 30                       | 1.059733  | 5.6366                        |



Grafik 1 Faktor Multiplikasi Efektif Saat Pengisian Bahan Bakar

Karena HTTR adalah reaktor yang didesain sebagai reaktor termal yang kritis, maka faktor multiplikasi efektif haruslah lebih besar dari satu ( $k_{\text{eff}} > 1$ ) dan demikian seterusnya selama masa reaktor beroperasi.  $K_{\text{eff}} > 1$  terjadi ketika jumlah neutron pada suatu generasi lebih banyak dari jumlah

neutron pada generasi sebelumnya. Neutron-neutron akan tercipta akibat dari reaksi fisi, dan akan bergerak di dalam reaktor hingga pada akhirnya berkurang atau musnah karena proses *leakage*, *capture* dan *scattering* yang menyebabkan turunnya harga k-eff. Proses ini

akan berlangsung sesuai masa operasi reaktor yang telah ditentukan.

Parameter neutronik lain yang sangat terkait dengan faktor multiplikasi efektif adalah harga eksres reaktivitasnya. Harga ini menunjukkan tingkat kereaktifan reaktor. Harga eksres reaktivitas yang negatif menunjukkan bahwa reaktor dalam keadaan subkritis berarti jumlah neutron pada suatu generasi akan lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya, dan reaksi fisi yang terjadi dalam reaktor akan tereduksi seiring dengan waktu. Sedangkan untuk reaktivitas yang bernilai positif menunjukkan bahwa reaktor dalam keadaan superkritis berarti jumlah neutron pada suatu generasi lebih banyak dibandingkan dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya sehingga reaksi yang terjadi akan terus bertambah seiring dengan waktu. Semakin kecil nilai eksres

reaktivitasnya (mendekati nol) semakin tinggi tingkat keselamatan reaktor dan hal inilah yang diharapkan.

Dari data pada tabel 14 dan grafik 1 di atas dapat ditentukan bahwa HTTR-FC (*First Criticality*) dan HTTR-EX (*Excess Reactivity*) dicapai ketika teras reaktor diisi 21 kolom bahan bakar, dengan harga faktor multiplikasi efektif 1.000311 dan eksres reaktivitasnya 0.0311 ( $\% \Delta k/k$ ).

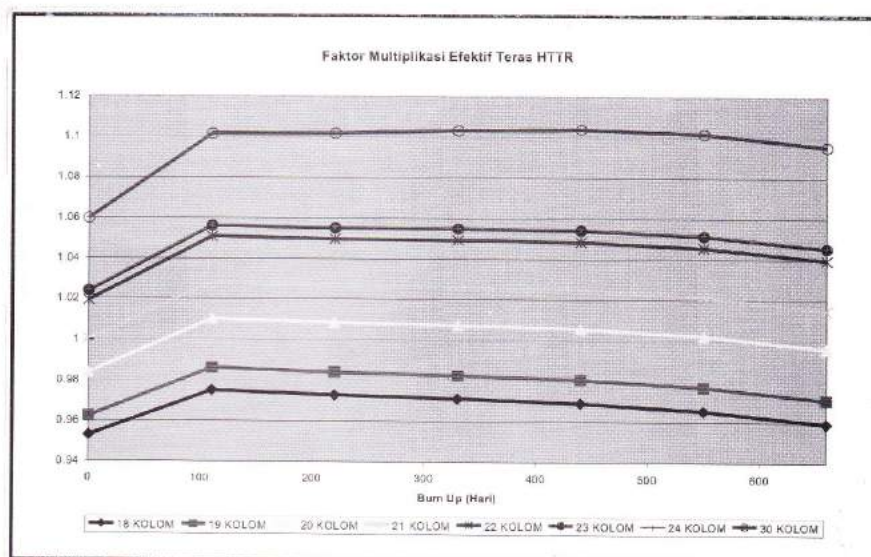
## 2. Burn-up Teras HTTR

Untuk menganalisa keadaan teras reaktor selama masa beroperasi dilakukan perhitungan *burn-up*, dengan periode *burn-up* selama 660 hari. Hasil perhitungan ditunjukkan pada tabel 15 di bawah ini.

Tabel 15 *Burn-up* Teras HTTR

| 18 Kolom Bahan Bakar |              | 19 Kolom Bahan Bakar |              | 20 Kolom Bahan Bakar |              |
|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Hari                 | k-eff        | Hari                 | k-eff        | Hari                 | k-eff        |
| 0                    | 9.529468E-01 | 0                    | 9.622664E-01 | 0                    | 9.837369E-01 |
| 110                  | 9.751057E-01 | 110                  | 9.861140E-01 | 110                  | 1.010273E+00 |
| 220                  | 9.728659E-01 | 220                  | 9.840426E-01 | 220                  | 1.008502E+00 |
| 330                  | 9.712097E-01 | 330                  | 9.825805E-01 | 330                  | 1.007390E+00 |
| 440                  | 9.691427E-01 | 440                  | 9.806949E-01 | 440                  | 1.005809E+00 |
| 550                  | 9.654647E-01 | 550                  | 9.771339E-01 | 550                  | 1.002411E+00 |
| 660                  | 9.592310E-01 | 660                  | 9.709273E-01 | 660                  | 9.961852E-01 |
| 21 Kolom Bahan Bakar |              | 22 Kolom Bahan Bakar |              | 23 Kolom Bahan Bakar |              |
| Hari                 | k-eff        | Hari                 | k-eff        | Hari                 | k-eff        |
| 0                    | 1.000311E+00 | 0                    | 1.019263E+00 | 0                    | 1.024051E+00 |
| 110                  | 1.028285E+00 | 110                  | 1.050757E+00 | 110                  | 1.056169E+00 |
| 220                  | 1.026846E+00 | 220                  | 1.049614E+00 | 220                  | 1.055116E+00 |
| 330                  | 1.026098E+00 | 330                  | 1.049255E+00 | 330                  | 1.054859E+00 |
| 440                  | 1.024764E+00 | 440                  | 1.048425E+00 | 440                  | 1.054139E+00 |
| 550                  | 1.021345E+00 | 550                  | 1.045610E+00 | 550                  | 1.051400E+00 |
| 660                  | 1.014795E+00 | 660                  | 1.039676E+00 | 660                  | 1.045510E+00 |

| 24 Kolom Bahan Bakar |              | 30 Kolom Bahan Bakar |              |
|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Hari                 | k-eff        | Hari                 | k-eff        |
| 0                    | 1.024557E+00 | 0                    | 1.059733E+00 |
| 110                  | 1.056680E+00 | 110                  | 1.101443E+00 |
| 220                  | 1.055628E+00 | 220                  | 1.101802E+00 |
| 330                  | 1.055383E+00 | 330                  | 1.103165E+00 |
| 440                  | 1.054663E+00 | 440                  | 1.103812E+00 |
| 550                  | 1.051929E+00 | 550                  | 1.101695E+00 |
| 660                  | 1.046030E+00 | 660                  | 1.095466E+00 |



Grafik 2 *Burn-up* Teras Reaktor

Grafik *burn up* teras reaktor memiliki harga k-eff dan ekses reaktivitas yang mula-mula naik pada awal reaktor diaktifkan kemudian menurun sejak periode pertama (110 hari) sampai periode keenam (660) berdasarkan analisa dari desain teras reaktor, hal ini disebabkan karena efek pembakaran *burnable poison*. Sebagai contoh, *burn up* teras reaktor dengan 21 kolom bahan bakar seperti ditunjukkan grafik 2 di atas yang awalnya naik saat mulai diaktifkan kemudian menurun pada periode pertama (110 hari) memiliki ekses reaktivitas 2.75 ( $\% \Delta k/k$ ) dan kemudian mengalami penurunan terus pada periode keenam dengan ekses reaktivitas 1.45 ( $\% \Delta k/k$ ). Begitu pula dengan teras yang

lain mengalami pola grafik yang sama. Reaktor didesain untuk beroperasi selama 660 hari dengan ekses reaktivitas yang menurun sesuai dengan waktu beroperasi teras reaktor.

K-eff menurun seiring dengan waktu karena reaksi yang terjadi di teras reaktor dan kebocoran-kebocoran neutron lain yang mungkin terjadi. Seperti yang pernah disebutkan sebelumnya, neutron-neutron akan tercipta akibat dari reaksi fisi, dan akan bergerak di dalam reaktor hingga pada akhirnya berkurang atau musnah karena proses *leakage*, *capture* dan *scattering* yang menyebabkan turunnya harga k-

eff. Proses ini akan berlangsung sesuai masa operasi reaktor yang telah ditentukan.

(*beginning of life*) dengan 21, 24 dan 30 kolom bahan bakar. Data hasil perhitungan dapat dilihat pada tabel 16, 17 dan 18 di bawah ini.

### 3. Distribusi Daya pada Teras HTTR

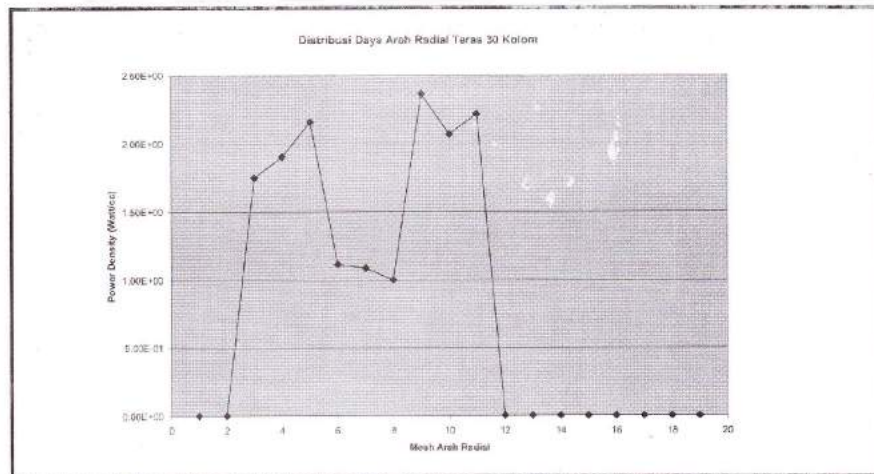
Telah dihitung distribusi daya rata-rata arah radial dan aksial teras reaktor pada awal diaktifkan

Tabel 16 Distribusi Daya Arah Radial

| Mesh | <i>Beginning of Life</i>                               |                                                        |                                                        |
|------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|      | 21 Kolom Bahan Bakar<br><i>Power Density (Watt/cc)</i> | 24 Kolom Bahan Bakar<br><i>Power Density (Watt/cc)</i> | 30 Kolom Bahan Bakar<br><i>Power Density (Watt/cc)</i> |
| 1    | 1.64E-22                                               | 1.54E-22                                               | 9.09E-23                                               |
| 2    | 1.85E-22                                               | 1.73E-22                                               | 9.38E-23                                               |
| 3    | 2.09E-22                                               | 1.93E-22                                               | 1.75E+00                                               |
| 4    | 2.22E-22                                               | 2.00E-22                                               | 1.90E+00                                               |
| 5    | 2.21E-22                                               | 1.93E-22                                               | 2.16E+00                                               |
| 6    | 1.05E+00                                               | 1.51E+00                                               | 1.11E+00                                               |
| 7    | 9.29E-01                                               | 1.31E+00                                               | 1.09E+00                                               |
| 8    | 8.31E-01                                               | 1.18E+00                                               | 9.99E-01                                               |
| 9    | 3.22E+00                                               | 2.80E+00                                               | 2.36E+00                                               |
| 10   | 2.78E+00                                               | 2.48E+00                                               | 2.06E+00                                               |
| 11   | 3.00E+00                                               | 2.69E+00                                               | 2.22E+00                                               |
| 12   | 1.49E-22                                               | 1.33E-22                                               | 1.09E-22                                               |
| 13   | 1.50E-22                                               | 1.34E-22                                               | 1.10E-22                                               |
| 14   | 1.35E-22                                               | 1.21E-22                                               | 9.85E-23                                               |
| 15   | 1.11E-22                                               | 9.96E-23                                               | 8.11E-23                                               |
| 16   | 8.47E-23                                               | 7.57E-23                                               | 6.16E-23                                               |
| 17   | 5.95E-23                                               | 5.32E-23                                               | 4.33E-23                                               |
| 18   | 3.64E-23                                               | 3.25E-23                                               | 2.64E-23                                               |
| 19   | 1.52E-23                                               | 1.36E-23                                               | 1.11E-23                                               |

Nilai *power density* arah radial dihitung dengan merata-ratakan nilai *power density* 54 mesh arah  $\theta$  (satu putaran) dan 28 mesh arah  $z$  dalam satu mesh

arah radial, dilanjutkan sampai 18 mesh arah radial selanjutnya. Grafik perhitungan distribusi daya terdapat pada grafik 3 di bawah ini.



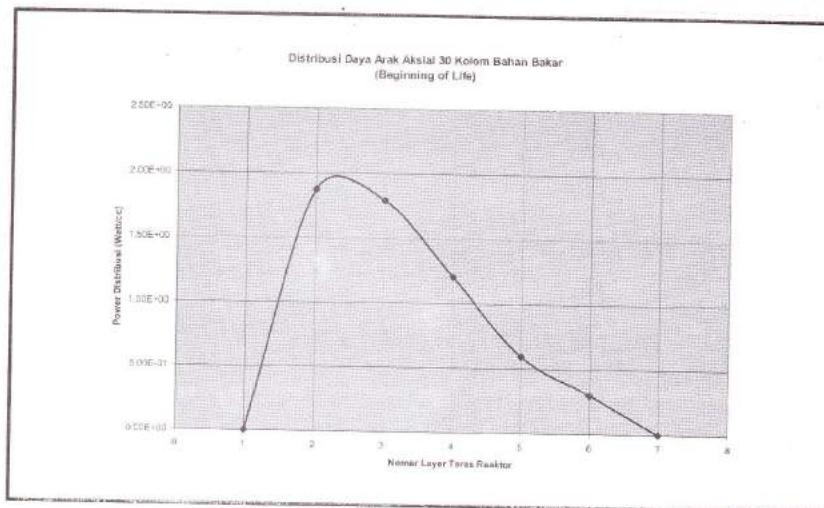
Grafik 3 Grafik Distribusi Daya Arah Radial Teras 30 Kolom Bahan Bakar

Dalam arah radial, teras reaktor terbagi menjadi 6 region yang masing-masing terdiri dari region 1 berisi blok selongsong batang kendali, region 2 berisi *dummy block* bahan bakar untuk teras dengan 21 dan 24 kolom bahan bakar sedangkan untuk 30 kolom bahan bakar berisi elemen bahan bakar, region 3 dan 4 berisi elemen bahan bakar dengan pengayaan bahan bakar meningkat dari pusat

reaktor ke tepi reaktor, region 5 dan 6 berisi perisai dapat ganti dan perisai lestari, lihat tabel 10 Konfigurasi ini menghasilkan distribusi daya arah radial, seperti ditunjukkan pada grafik 3 di atas. Bentuk grafik distribusi daya dibuat *se-flat* mungkin untuk mengatur pemerataan suhu bahan bakar dalam arah radial.

Tabel 17 Distribusi Daya Arah Aksial

| <i>Beginning of Life</i>     |                                   |                                   |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Nomor Layer<br>Teras Reaktor | 21 Kolom                          | 24 Kolom                          | 30 Kolom                          |
|                              | <i>Power Density</i><br>(Watt/cc) | <i>Power Density</i><br>(Watt/cc) | <i>Power Density</i><br>(Watt/cc) |
| 1                            | 9.64E-23                          | 8.81E-23                          | 7.89E-23                          |
| 2                            | 1.34E+00                          | 1.36E+00                          | 1.87E+00                          |
| 3                            | 1.29E+00                          | 1.35E+00                          | 1.79E+00                          |
| 4                            | 9.25E-01                          | 9.69E-01                          | 1.21E+00                          |
| 5                            | 5.14E-01                          | 4.85E-01                          | 5.95E-01                          |
| 6                            | 2.77E-01                          | 2.53E-01                          | 3.00E-01                          |
| 7                            | 2.48E-23                          | 2.01E-23                          | 1.53E-23                          |



Grafik 4 Distribusi Daya Arah Aksial Teras 30 Kolom Bahan Bakar

Dalam arah aksial, teras reaktor terbagi menjadi 7 layer yang masing-masing terdiri dari, layer 1 berisi 2 blok perisai dapat ganti bagian atas, layer 2, 3, 4, 5 dan 6 berisi bahan bakar dengan pengayaan bahan bakar yang semakin menurun dari layer bahan bakar atas ke layer bahan bakar paling bawah, lihat pengaturan elemen bakar pada tabel 10 di atas. Kemudian layer 7 berisi 2 blok perisai dapat ganti bagian bawah. Konfigurasi ini menghasilkan distribusi daya arah aksial, seperti ditunjukkan pada grafik 4 di atas. Bentuk grafik distribusi daya untuk layer bahan bakar dibuat berbentuk eksponensial menurun. Pada layer bahan bakar ke-5 dan ke-6 dibuat pengayaan bahan bakar yang sama karena *power density* menurun dari layer ke-5 ke layer ke-6 disebabkan juga oleh *neutron leakage* ke perisai dapat ganti bagian bawah.

Analisa penempatan elemen bahan bakar dengan pengayaan tertinggi ditempatkan pada bagian teratas dan terluar dari kolom bahan bakar pada teras reaktor salah satunya dimaksudkan untukantisipasi kecelakaan reaktor, karena konduktifitas panas radial ke arah luar.

Daya reaktor sebanding dengan fluks neutron, maka pengaturan daya reaktor dapat tercapai dengan pengaturan faktor multiplikasi efektif. Kalau faktor multiplikasi efektif dibuat lebih besar daripada satu, maka reaktor akan superkritis dan daya reaktor akan naik. Kalau faktor multiplikasi efektif diatur sama dengan satu, reaktor kritis dan daya reaktor

tetap tidak berubah. Sedangkan kalau faktor multiplikasi efektif dibuat lebih kecil daripada satu, maka reaktor akan subkritis dan daya reaktor akan turun. Oleh karena itu agar reaktor dapat dinaikan dayanya, dalam teras reaktor perlu tersedia sejumlah bahan bakar yang lebih dari masa kritisnya. Kemudian faktor multiplikasi efektif atau reaktivitas diatur dengan jalan merubah keseimbangan antara kecepatan produksi dan kecepatan hilangnya neutron dalam reaktor. Beberapa cara yang biasa dipakai untuk mengatur reaktivitas reaktor adalah penambahan atau pemindahan bahan bakar, moderator atau reflektor, atau bahan-bahan penyerap neutron. Cara pengendalian dengan penambahan atau pemindahan bahan penyerap neutron merupakan cara yang paling banyak dipakai untuk pengendalian reaktor termik.

#### Kesimpulan dan Saran

1. Meningkatnya perhatian yang serius terhadap polusi global dan mendesaknya kebutuhan sumber energi baru maka salah satu alternatifnya adalah dengan pengembangan metode produksi hidrogen konvensional ke arah yang lebih baik.

2. Energi nuklir dalam hal ini reaktor temperatur tinggi berpendingin gas menawarkan keuntungan dalam produksi hidrogen.
3. Dalam perancangan reaktor diperlukan analisis yang komprehensif, salah satunya yaitu analisis neutronik yang meliputi penentuan kekritisannya, reaktivitas, *power density* dan analisa bahan bakar pada teras.
4. Pengaturan material di dalam teras reaktor memegang peranan penting. Pada teras reaktor temperatur tak boleh melebihi 1600 °C hal ini dijaga dengan pengaturan distribusi daya pada arah radial dan aksial teras reaktor melalui pengaturan posisi elemen bahan bakar.
5. HTTR-FC (*First Criticality*) dicapai ketika teras diisi 21 kolom bahan bakar, dengan harga faktor multiplikasi efektif 1.000311 dan eksese reaktivitasnya 0.0311 (%  $\Delta k/k$ ).
6. *Burn up* teras reaktor berperiode 660 hari ini mengalami kenaikan diawal beroperasi kemudian menurun, hal ini disebabkan oleh efek pembakaran *burnable poison*.
7. Dari analisa distribusi daya arah radial, bentuk grafik distribusi daya bahan bakar dibuat se-flat mungkin sedangkan bentuk grafik distribusi daya arah aksial dibuat berbentuk eksponensial menurun untuk mengatur pemerataan suhu dalam arah radial dan aksial.
8. Analisa penempatan elemen bahan bakar dengan pengayaan tertinggi ditempatkan pada bagian teratas dan terluar dari kolom bahan bakar pada teras reaktor salah satunya dimaksudkan untukantisipasi kecelakaan reaktor, karena konduktivitas panas radial ke arah luar.

Pendesainan reaktor ini hanya menganalisa dari sisi neutroniknya saja. Untuk hasil yang lebih akurat sebaiknya dilakukan pula analisa termal hidrolik dan analisa struktur. Selain itu untuk memperoleh hasil yang lebih tepat harus dilakukan perhitungan pada seluruh bagian-bagian teras dengan model geometri yang lebih akurat.

#### Daftar Pustaka

1. Azis Ferhat, Lasman As Natio, Arbie Bakrie.1999. BATAN, *Result of Benchmark Calculation on Start-up Core Physics of High Temperature Engineering Test Reactor*. Tokyo: JAERI-memo.
2. Duderstadt James J., Hamilton, Louis J.1976. *Nuclear Reactor Analysis*. USA: John Wiley and Sons.
3. Hong Liem Peng.1994. *Ringkasan Litbang HTGR Jepang, Prosiding Teknologi dan Aplikasi Reaktor Temperatur Tinggi I*, Serpong:PPkTN-BATAN.
4. Nojiri Naoki,dkk.1998. *Benchmark Problems Data for The HTTR's Start-up Core Physics Experiments*. Tokyo: JAERI-memo.
5. Ogawa Mosuro, Shiozawa Shusaku.2003. *Evaluation of Hydrogen Production System with High Temperature Gas-cooled Reactor*, Journal of GENES4/ ANP 2003.
6. Okumura Keiksuke, KugoTeruhiko, Kaneko Kunio. Tsuchihashi Keichiro. 2002. *SRAC(Ver.2002); The Comprehensive Neutronic Calculation Code System*. Tokyo: JAERI.
7. Yamashita Kiyonobu, dkk. 1999. IAEA *Benchmark Calculation Results of The HTTR's Start-up Core Physics Tests*