

## DISAIN DAN PEMBUATAN KALORIMETER GAMMA

46

Setiyanto, Maman Mulyaman, Dj. Hasibuan

### ABSTRAK

DISAIN DAN PEMBUATAN KALORIMETER GAMMA. Telah dilakukan disain (rancangan) dan pembuatan sepuluh buah (jenis) kalorimeter gamma untuk digunakan di RSG-GAS. Sesuai dengan tujuan keseluruhan dari penelitian ini, telah berhasil dibuat kalorimeter dengan bahan penyerap Grafit, Aluminium, Besi, Zirkonium dan Plumbum. Batasan perencanaan adalah kalorimeter yang dapat digunakan pada daya reaktor dari 1 MW sampai dengan 5 MW dengan toleransi 100 %. Hasil keseluruhan yang diperoleh adalah 8 (delapan) buah kalorimeter masing-masing dengan penyerap Grafit (2 buah), Aluminium (1 buah), Besi (1 buah), Zirkonium (3 buah) dan Plumbum (1 buah). Dua kalorimeter gagal dibuat (masing-masing satu buah untuk penyerap Besi dan Plumbum) karena kesalahan teknis, namun demikian tidak terlalu mengganggu tujuan penelitian secara keseluruhan. Dapat disimpulkan bahwa pembuatan kalorimeter tersebut terlaksana dengan baik.

### ABSTRACT

DESIGNE AND FABRICATION OF GAMMA CALORIMETERS. Design and fabrication of ten gamma calorimeters for G.A Siwabessy reactor were conducted. As the objective of the research, the realized calorimeters are calorimeters with Graphite, Aluminum, Iron, Zirconium and Plumbum as the absorber material. Design criteria of all calorimeters is those calorimeters must still safe to be used at 1 MW up to 5 MW of reactor power with 100 % of tolerance. The final result that obtained are two calorimeters with Graphite absorber, one for Aluminum, Plumbum and Iron of each and three calorimeters for Zirconium absorbers. According to the test result, can be concluded that the design and fabrication of calorimeters were successful realized.

### PENDAHULUAN

Sebagai realisasi program penelitian tahun 1997/1998 yang tercakup dalam program INHOUSE, telah dilakukan disain dan pembuatan kalorimeter gamma sebanyak 8 buah, yang terdiri atas kalorimeter dengan bahan penyerap Grafit (2 buah), Aluminium (1 buah), Besi (2 buah), Zirkonium (2 buah) dan Plumbum (1 buah). Kegiatan tersebut merupakan langkah awal (tahun pertama) dari seluruh kegiatan penelitian Karakterisasi pembangkitan panas gamma di dalam teras reaktor G.A Siwabessy pada berbagai jenis dan geometri bahan. Seperti diuraikan dalam usulan penelitian, karakterisasi pembangkitan panas gamma adalah kegiatan yang bertujuan untuk melengkapi data karakteristik teras reaktor, yang mana data tersebut sangat diperlukan oleh para pemakai reaktor dalam menyediakan analisis keselamatan bagi jenis iradiasi yang diperlukan.

Mengingat banyaknya jenis kegiatan yang harus dilakukan, maka khusus tahun pertama penelitian ini difokuskan pada penyiapan sarana eksperimen, berupa disain dan pembuatan kalorimeter gamma, yang nantinya alat tersebut akan digunakan untuk mengukur atau mengambil data pembangkitan panas gamma tersebut di teras reaktor.

Untuk memenuhi kebutuhan seluruh eksperimen yang dirancang, diperlukan beberapa jenis kalorimeter yang dibedakan pada jenis bahan penyerap dan geometrinya, sehingga diperlukan persiapan disain yang teliti.

Disain kalorimeter merupakan kegiatan perhitungan awal suatu kalorimeter agar diperoleh sensitivitas dan periode yang sesuai dengan batasan teknis yang dipersyaratkan, yang keseluruhannya merupakan fungsi dari jenis dan geometri bahan penyerap, jenis dan ketebalan gas isolator serta batasan operasional daya reaktor yang dikehendaki. Perhitungan parameter

tersebut dilakukan dengan memecahkan persamaan dasar kalorimeter dengan syarat batas besaran fisis yang dikehendaki.

Sedangkan pelaksanaan pembuatan dilakukan oleh teknisi dari PRSG dengan menggunakan bahan yang berkualitas dan dikerjakan di bengkel PRSG juga.

**PRINSIP KERJA KALORIMETER.**

Prinsip kerja kalorimeter gamma adalah fenomena interaksi dan penyerapan energi gamma pada bahan penyerap kalorimeter, sehingga menaikkan suhu penyerap yang bersangkutan.

Pada akhir proses pemanasan akan terjadi kesetimbangan kalor sehingga dicapai suhu maksimum penyerap, yang mana besarnya energi gamma yang ditransfer menjadi kalor dinyatakan dalam persamaa berikut <sup>[1]</sup>:

$$P = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \frac{C(\theta)}{T(\theta)} d\theta \dots\dots\dots (1)$$

dimana:

- P : energi dalam bentuk panas gamma yang diserap. (Watt/gr)
- C(θ) : Kapasitas panas dari bahan penyerap. (J/gr. °C)
- T(θ) : Periode (tetapan waktu) kalorimeter. (detik)
- θ<sub>i</sub> : Suhu awal bahan penyerap atau suhu lingkungan kalorimeter. (°C)
- θ<sub>f</sub> : Suhu akhir bahan penyerap (°C).

Bedasarkan persamaan di atas, maka parameter yang harus diperhitungkan dalam mendisain kalorimeter adalah :

- berapa suhu maksimum penyerap yang akan dicapai ?
- berapa tetapan waktu (periode) kalorimeter yang diinginkan ?

Faktor yang berkaitan dengan nilai ke dua parameter tersebut antara lain: **Jenis bahan penyerap, geometri penyerap dan tabung, jenis gas isian** serta besarnya paparan gamma (panas gamma) yang akan diukur. Dengan demikian faktor-faktor itulah yang harus diolah sehingga dapat diperoleh kalorimeter yang dikehendaki.

**DISAIN KALORIMETER.**

Selain harus memperhatikan beberapa faktor seperti disebutkan di atas, perencanaan/ disain kalorimeter harus pula mempertimbangkan beberapa aspek dan tujuan penggunaannya sebagai berikut:

1. Untuk Aspek tujuan:
  - Kalorimeter harus mampu digunakan untuk mengukur variasi pembangkitan panas gamma sebagai fungsi jenis bahan penyerap.
  - Kalorimeter yang dibuat harus dapat digunakan untuk mempelajari variasi pembangkitan panas gamma sebagai fungsi geometri.
2. Untuk Aspek Teknis:
  - Kalorimeter harus cukup peka untuk mendeteksi perubahan fluks gamma yang kecil.
  - Kalorimeter harus cukup kecil sehingga mudah dioperasikan dan tidak mengganggu sistem.
3. Aspek Keselamatan:
  - Kalorimeter yang dibuat harus tidak mempengaruhi parameter lain teras reaktor.
  - Kalorimeter harus bekerja pada suhu disain, hal tersebut disesuaikan dengan batasan daya reaktor dan bahan penyerap yang digunakan.

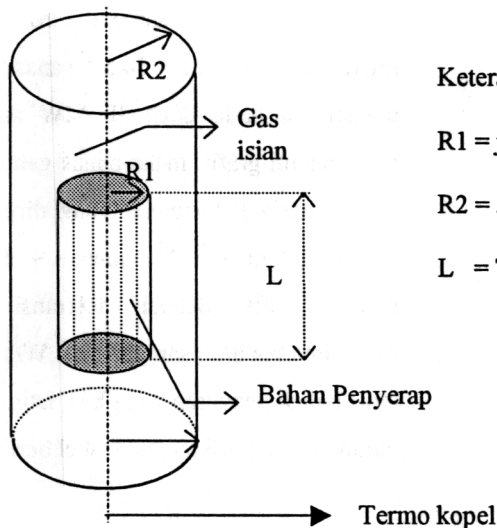
Untuk menjamin keselamatan kalorimeter, maka semua kalorimeter didesain untuk dapat beroperasi pada daya reaktor dari 1 MW s/d maksimum 5 MW, dengan toleransi 100 %.

**Pemilihan bahan penyerap dan gas isian.**

Faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan bahan adalah selain harus mempertimbangkan aspek interaksinya dengan berbagai radiasi di reaktor, bahan penyerap harus mendekati bahan yang sering digunakan di teras reaktor, serta mewakili mayoritas bahan. Pertimbangan tersebut mengarah pada pemilihan

bahan: Grafit (C), Aluminium (Al), Besi (Fe), Zirconium (Zr) dan Plumbum (Pb).

Untuk menentukan parameter kalorimeter (sensitivitas dan periode) agar sesuai dengan tujuan yang dikehendaki, maka selain bahan penyerap dan geometrinya, gas isolator adalah faktor yang turut dipertimbangkan. Dengan mempertimbangkan sifat-sifat gas, maka gas yang dipilih antara lain : Argon, Helium, Krypton dan gas-gas mulia yang lain.



Keterangan gambar:

R1 = jari-jari bahan penyerap.

R2 = Jari-jari tabung kalorimeter

L = Tinggi/panjang bahan penyerap

Gambar Bagan kalorimeter gamma.

**PERHITUNGAN SENSITIVITAS DAN PERIODE KALORIMETER.**

Dengan mempertimbangkan kriteria dan batasan seperti tersebut di atas, sensitivitas dan periode reaktor dihitung berdasarkan persamaan

$$k \cdot \nabla^2 \cdot \theta(r,t) + q'''(r,t) = \rho \cdot c \cdot (r,t) \frac{\partial \theta(r,t)}{\partial t} \quad (2)$$

penyelesaian persamaan tersebut dengan metode numerik akan diperoleh suhu maksimum ( $\theta_{\text{mak}}$ )

perpindahan panas yang terjadi pada bahan penyerap berikut <sup>[1]</sup>:

dan pola/profil perubahan suhu sebagai fungsi waktu.

Sensitivitas kalorimeter didefinisikan sebagai <sup>[1]</sup>.

$$S = \frac{\theta_{\text{mak}} - \theta_{\text{awal}}}{\dots}$$

$$T(\theta) = \frac{\ln(\Delta\theta)}{\Delta t}$$

Cara lain yang dapat digunakan untuk menentukan periode dan sensitivitas kalorimeter adalah model pendekatan orde satu, yaitu dengan mengambil persamaan konduktivitas kondisi tunak:

$$q' = kA \frac{\Delta\theta}{\Delta x}$$

yang untuk bentuk silinder simetri dengan panjang  $l$  dan jari-jari  $R_1$  &  $R_2$ , persamaan ini dapat dituliskan menjadi:

$$q''' = \frac{Ki \cdot \Delta\theta}{k 2\pi l \ln(R_2 / R_1)}$$

karena  $q'''$  adalah panas total dalam silinder, sedangkan sensitivitas didefinisikan sebagai: perubahan suhu per (watt/gram), maka:

dan sensitivitasnya ( $S$ ), sesuai definisi di atas dapat dituliskan:

$$S = \frac{\Delta\theta}{(q'''/M)} =$$

dan periodenya, diturunkan dari persamaan 1 dan 5 (untuk notasi  $P=q'''$ ) dapat ditulis:

$$T(\theta) = \frac{M}{\sum k_i} C(\theta)$$

dimana:

$M$  = Massa bahan penyerap.

$\sum k_i$  = jumlah konduktivitas panas (radiasi, konduksi)

$C(\theta)$  = kapasitas panas bahan penyerap.

**Data perhitungan:**

Perhitungan parameter kalorimeter didasarkan pada batasan/kriteria berikut:

- Batasan nilai panas gamma:

Kalorimeter dirancang untuk digunakan pada daya reaktor 1MW sampai 5 MW, dengan toleransi 100 %. Jika panas gamma maksimum pada daya 30 MW adalah 6,5 W/gr dalam grafit, maka panas gamma untuk daerah kerja kalorimeter yang direncanakan adalah antara ~ 0,22 sampai ~ 1,1 W/gr dalam grafit, dengan toleransi mampu menerima paparan sampai ~ 2,2 W/gr. Untuk jenis bahan penyerap yang lain, istimasi panas gammanya diberikan pada tabel berikut:

| No. | Bahan penyerap | nilai panas istimasi |
|-----|----------------|----------------------|
| 1.  | Grafit (C)     | 0,22 - 1,1           |
| 2.  | Aluminium (Al) | 0,22 - 1,1           |
| 3.  | Besi (Fe)      | 0,31 - 1,53          |
| 4.  | Zirkonium (Zr) | 0,41 - 2,08          |
| 5.  | Plembem (Pb)   | 0,49 - 2,44          |

**Penentuan ukuran kalorimeter.**

Ukuran kalorimeter, terutama bahan penyerapnya, adalah parameter yang sangat menentukan unjuk kerja kalorimeter. Di

samping itu, ukuran penyerap harus dibuat sesuai dengan tujuan eksperimen secara keseluruhan, yaitu untuk mempelajari variasi pembangkitan panas gamma sebagai fungsi

geometri. Hal tersebut menghendaki penentuan ukuran harus dipelajari secara khusus.

Adanya faktor serapan permukaan terhadap radiasi gamma oleh setiap bahan, mengakibatkan pembangkitan panas pada bahan tersebut tidak merata pada permukaan dan bagian dalamnya. Ketidak-rataan ini menjadi lebih besar jika bahan penyerapnya memiliki rapat massa yang tinggi, dengan demikian diperlukan suatu parameter baru

yang dapat mewakili keadaan tersebut. Hasil studi terdahulu menunjukkan bahwa perbandingan: S/M, (S: luas permukaan penyerap, dan M: massa penyerap) adalah parameter yang dapat menjawab persoalan tersebut.

Berdasarkan parameter tersebut, penentuan geometri penyerap akan ditentukan berdasarkan nilai S/M yang dikehendaki, yaitu seperti tabel berikut:

Tabel 2. Jari-jari penyerap sebagai fungsi nilai S/M untuk berbagai jenis bahan/materi.

| Nilai<br>S/M | Jari-jari bahan penyerap (R1) dalam (cm) sebagai fungsi S/M untuk beberapa bahan penyerap |                   |           |                   |                 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|-------------------|-----------------|
|              | Grafit<br>(C)                                                                             | Aluminium<br>(Al) | Besi (Fe) | Zirkonium<br>(Zr) | Plembem<br>(Pb) |
| 0,5          | 2,22                                                                                      | 1,48              | 0,51      | 0,62              | 0,35            |
| 0,6          | 1,85                                                                                      | 1,23              | 0,42      | 0,51              | 0,29            |
| 0,8          | 1,39                                                                                      | 0,93              | 0,32      | 0,39              | 0,22            |
| 1,2          | 0,93                                                                                      | 0,62              | 0,21      | 0,26              | 0,15            |
| 1,5          | 0,74                                                                                      | 0,49              | 0,17      | 0,20              | 0,5 - 0,43 *)   |
| 2,0          | 0,55                                                                                      | 0,37              | 0,13      | 0,15              | 0,5 - 0,45 *)   |
| 2,5          | 0,44                                                                                      | 0,30              | 0,10      | 0,12              | 0,6 - 0,56 *)   |

\* \ Berbentuk tabung/silinder berongga

Berdasarkan tabel di atas, secara teoritis harus dibuat kalorimeter sebanyak 35 buah, namun demikian demi penghematan serta tanpa mengurangi pencapaian tujuan, akan dibuat hanya 10 (sepuluh) kalorimeter saja. Dengan mempertimbangkan faktor pembuatan dan keberadaan bahan, kalorimeter dibuat berdasarkan dimensi terpilih (yang dicetak tebal), dengan sedikit pembulatan.

#### Pemilihan gas isian.

Untuk pencapaian tujuan kalorimeter yang sesuai disain, dipilih gas Argon dan Helium yang memiliki konduktivitas sebagai fungsi suhu  $\theta$  [2,3].

$$\text{Gas Argon} \quad k(\theta) = 1,64 \cdot 10^{-4} + 5,0 \cdot 10^{-6} \theta - 2,5 \cdot 10^{-10} \theta^2$$

$$\text{Gas Helium} \quad k(\theta) = 1,42 \cdot 10^{-3} + 3,05 \cdot 10^{-6} \theta - 6,0 \cdot 10^{-10} \theta^2$$

#### HASIL DISAIN

Pemilihan 10 kalorimeter yang dirancang berdasarkan kriteria tersebut di atas memberikan karakteristik sebagai berikut:

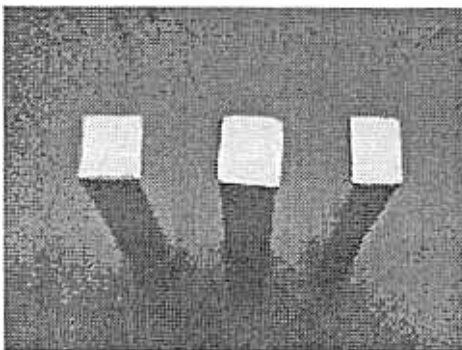
Tabel 3. Hasil perhitungan karakteristik dan data teknis untuk sepuluh kalorimeter gamma.

| No. | Nama Kalorimeter | Bahan penyerap | Jenis gas | R1 (cm) | R2 (cm) | Periode (detik) |         | Sensitivitas (°C per W/g) |         |
|-----|------------------|----------------|-----------|---------|---------|-----------------|---------|---------------------------|---------|
|     |                  |                |           |         |         | Pers. 4         | Pers. 6 | Pers. 3                   | Pers. 5 |
| 1.  | Grafit 1.        | C              | Ar        | 0,25    | 0,50    | 120-150         | 125     | 160                       | 135     |
| 2.  | Grafit 2.        | C              | He        | 0,40    | 0,70    | 30 - 35         | 41      | 40                        | 45      |
| 3.  | Aluminium        | Al             | Ar        | 0,25    | 0,50    | ~ 170           | 185     | 190                       | 203     |
| 4.  | Besi 1.          | Fe             | He        | 0,25    | 0,50    | 25 - 30         | 45      | 65                        | 95      |
| 5.  | Besi 2.          | Fe             | He        | 0,50    | 0,70    | ~ 70            | 90      | 160                       | 188     |
| 6.  | Zirconium 1      | Zr             | He        | 0,25    | 0,50    | ~ 20            | 23      | 77                        | 78      |
| 7.  | Zirconium 2      | Zr             | He        | 0,50    | 0,70    | ~ 40            | 46      | 141                       | 156     |
| 8.  | Zirconium 3      | Zr             | Ar        | 0,15    | 0,50    | ~ 70            | 75      | 253                       | 255     |
| 9.  | Pb-1             | Pb             | He        | 0,15    | 0,50    | ~ 10            | 11      | 90                        | 83      |
| 10. | Pb-2             | Pb             | He        | 0,25    | 0,50    | ~ 17            | 18      | 135                       | 138     |

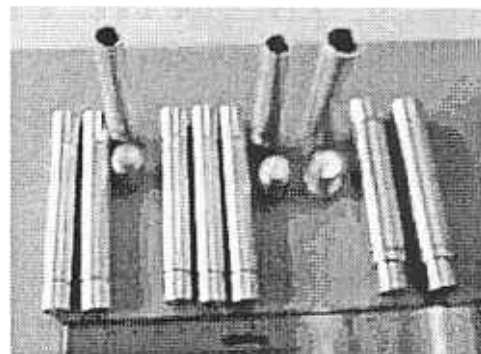
### PEMBUATAN KALORIMETER

- **Bahan kelongsong.**

Kelongsong dibuat dari AlMg pejal (plat tebal) yang dibentuk/dibubut menjadi tabung



silinder dengan ketebalan 1 mm. Proses pembuatan dan hasilnya dapat dilihat/diterangkan pada gambar berikut:

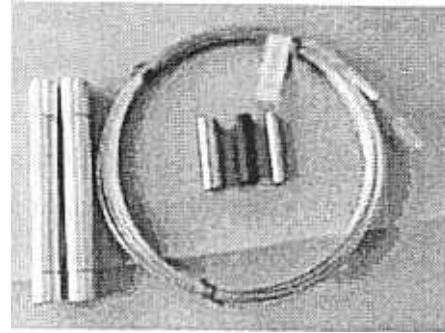
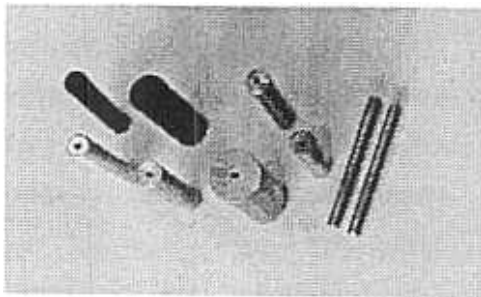


Gambar 2. Kelongsong kalorimeter (bahan dasar dan kelongsong jadi)

- **Bahan Penyerap.**

Jenis dan dimensi bahan penyerap disiapkan sesuai dengan hasil disain yang dibuat, gambar berikut menunjukkan berbagai jenis

bahan penyerap, dilengkapi dengan perbandingan relatif terhadap kelongsong dan termokopelnya.



Gambar 3. Berbagai jenis dan ukuran bahan penyerap, kelongsong dan termokopel.

#### Pembuatan kalorimeter.

Untuk mendapatkan kalorimeter yang berkualitas, selain pemilihan bahan yang benar, diperlukan juga cara pembuatan yang benar. Rangkaian pembuatan tersebut diuraikan seperti berikut:

- Seluruh bahan (penyerap, kelongsong dan termokopel) harus dibersihkan dengan acetone, kemudian dipanaskan pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  atau lebih selama lebih dari 12 jam.

Setelah proses pemanasan, semua bahan dihindarkan dari kontak dengan udara agar terhindar dari oksidasi.

Dilakukan penggabungan (pengelasan) dan pengisian gas isolator. Untuk menjamin pengisian gas yang sempurna,

dilakukan pengisian dan pemakuman berulang kali.

- Kalorimeter siap diuji.

#### HASIL

Dari 10 kalorimeter yang direncanakan, berhasil dibuat 8 buah kalorimeter, atau 2 kalorimeter gagal dibuat, yaitu kalorimeter Besi-1 dan Plembum-1. Kegagalan tersebut terjadi pada pengelasan akhir. Dari uji pengukuran karakteristik termokopel, ke-8 kalorimeter tersebut menunjukkan hasil yang sempurna, namun demikian masih diperlukan uji fungsi lengkap, yang pelaksanaannya sedang dilakukan. Gambar berikut memperlihatkan foto kalorimeter yang berhasil dibuat.

Gambar 4. Foto Kalorimeter yang berhasil dibuat.

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil yang dicapai seperti ditunjukkan di atas dapat disimpulkan bahwa disain dan pembuatan kalorimeter gamma dapat terlaksana dengan baik. Kegagalan dua kalorimeter tidak mutlak mengganggu pencapaian sasaran akhir, sebab dari jenis yang gagal masih ada yang berhasil dibuat, sehingga dapat mewakilinya.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. SETIYANTO. Puissance deposee par les rayonnement gamma dans le reacteur Siloe. Mesures par calorimeterie et calcul par le code GAMSET. Aplication aux experiences

complexes. Desertasi doktor pada ENSPG-INPG. France 1991.

2. SETIYANTO. "Analisis Karakteristik bahan. Pengaruh Jenis dan geometri bahan terhadap pembangkitan panas gamma", Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains Materi II, 1997.
3. R.E JAEGER et al. " Engineering compendium on radiation shielding", vol. 1. Shielding fundamentals and methodes. 1968