

# Urania

## Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



### ESTIMASI PANAS GAMMA PADA PRODUKSI RADIOISOTOP Lu-177, Ir-192, DAN Au-198 DI TERAS MOLIBDENUM RSG-GAS

Dewi Nur Riskiana<sup>1</sup>, Anis Rohanda<sup>2</sup>, R Farzand Abdullatif<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika, Fakultas MIPA – Universitas Jenderal Soedirman  
Jalan Dr. Hr. Boenyamin No.708, Purwokerto, Banyumas, Jawa Tengah, 53122

<sup>2</sup>Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir – BRIN  
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 80, Tangerang Selatan, Banten, 15314  
e-mail: dewi.riskiana@mhs.unsoed.ac.id

(Naskah diterima: 23–05–2022, Naskah direvisi: 05–06–2022, Naskah disetujui: 23–06–2022)

#### ABSTRAK

**ESTIMASI PANAS GAMMA PADA PRODUKSI RADIOISOTOP Lu-177, Ir-192, DAN Au-198 DI TERAS MOLIBDENUM RSG-GAS.** Panas gamma (*Gamma heating*) merupakan isu penting terkait keselamatan fasilitas iradiasi suatu reaktor dan sampel iradiasinya. Panas gamma dihasilkan dari interaksi energi gamma dengan material target. Energi gamma yang dihasilkan dari reaktor memiliki karakteristik energi gamma yang berbeda yang salah satunya dipengaruhi oleh jenis bahan bakar (jenis teras). Uranium molibdenum (UMo) merupakan bahan bakar masa depan yang memiliki beberapa keunggulan dibandingkan uranium oksida (UO<sub>2</sub>) dan silisida (USi) salah satunya dapat meningkatkan operasi reaktor. Untuk itu dilakukan studi komputasi panas gamma RSG-GAS dengan bahan bakar UMo pada beberapa proses produksi radioisotop seperti radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198. Penelitian ini menggunakan code ORIGEN untuk menghitung energi gamma yang dihasilkan untuk jenis bahan bakar UMo. Estimasi panas gamma menggunakan program Gamset, suatu program didesain dan sudah teruji untuk menghitung panas gamma di RSG-GAS. Hasil perhitungan panas gamma berbahan bakar UMo di RSG-GAS dalam kisaran 4,85 W/g ~ 8,69 W/g. Hasil ini lebih kecil dibandingkan dengan panas gamma pada uranium silisida (USi) yaitu sekitar 9,27 W/g ~ 13,3 W/g. Radioisotop Lu-177 memiliki panas gamma terbesar sekitar 8,69 W/g, yang diikuti oleh Au-198 dan Ir-192 yang masing-masing sebesar 5,89 W/g dan 7,12 W/g. Panas gamma pada ketiga radioisotop yang diproduksi oleh RSG-GAS berbahan bakar UMo tidak melebihi panas gamma maksimum (20 W/g) yang telah ditentukan sehingga dapat diartikan aman untuk reaktor dan sampel.

**Kata kunci:** Panas gamma, UMo, RSG-GAS, radioisotop.

## **ABSTRACT**

**GAMMA HEAT ESTIMATION ON PRODUCTION OF RADIOISOTOPES LU-177, IR-192, AND AU-198 IN THE MOLYBDENUM CORE RSG-GAS.** *Gamma heating is an important issue related to the irradiation safety of a reactor and its irradiated samples. Gamma heat is generated from the interaction of gamma energy with the target material. The gamma energy produced from the reactor has different gamma energy determined by the fuel type. Uranium molybdenum (UMo) is a future fuel that has several advantages over uranium oxide (UO<sub>2</sub>) and silicide (USi), one of which to increase the reactor operating time. For this reason, a computational study of the RSG-GAS gamma heat with UMo fuel was carried out in several radioisotope productions such as the Lu-177, Ir-192, and Au-198. This study uses the ORIGEN code to calculate the gamma energy produced for UMo fuel types. Gamma heat estimation uses the Gamset program, designed and tested to calculate gamma heat in RSG-GAS. UMo-fueled gamma heat calculation results in RSG-GAS are 4.85 W/g ~ 8.69 W/g. This result is smaller than the gamma heat of uranium silicide (USi), which is around 9.27 W/g ~ 13.3 W/g. The radioisotope Lu-177 has the highest gamma heat of 8.69 W/g, followed by Au-198 and Ir-192, which are 5.89 W/g and 7.12 W/g, respectively. The gamma heat of the three radioisotopes produced by RSG-GAS with UMo fuel does not exceed the maximum gamma heat (20 W/g) that has been determined to ensure that it is safe for the reactor and samples.*

**Keywords:** *Gamma heating, UMo, RSG-GAS, radioisotopes.*

Estimasi Panas Gamma pada Produksi Radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198 di Teras Molibdenum RSG-GAS (Dewi Nur Rizkiana, Anis Rohanda, R Farzand Abdullatif)

## PENDAHULUAN

Berbagai kajian bahan bakar uranium molibdenum (UMo) sebagai kandidat bahan bakar reaktor riset di masa depan terus dilakukan secara berkelanjutan. Beberapa kajian mengenai UMo memberikan informasi keunggulan bahan bakar ini dibandingkan dengan bahan bakar uranium silisida (USi) dan uranium oksida (UO<sub>2</sub>). Beberapa keunggulan UMo seperti densitasnya lebih tinggi, tahan terhadap korosi, dan tampang lintang serapan neutron yang rendah [1]. Salah satu kajian penting untuk melengkapi keunggulan yang dimiliki bahan bakar UMo sebagai bahan bakar reaktor yaitu panas gamma. Panas gamma terjadi karena adanya deposisi energi gamma yang secara terus menerus selama operasi reaktor berlangsung [2]. Deposisi energi gamma pada setiap bahan bakar dan reaktor yang berbeda akan menghasilkan nilai dan karakteristik yang berbeda pula. Untuk itu, kajian mengenai panas gamma oleh deposisi energi inti UMo menjadi perlu dilakukan pada setiap reaktor riset, tidak terkecuali reaktor serba guna GA siwabessy (RSG-GAS).

Penentuan panas gamma pada RSG-GAS berbahan bakar UMo ini menjadi bertambah penting untuk diketahui, dikarenakan RSG-GAS merupakan reaktor yang mempunyai fungsi utamanya untuk keperluan iradiasi material dan pemanfaatan fluks neutron melalui *beam-tube*. Di mana keperluan iradiasi material mencakup produksi radioisotop yang kini semakin banyak diminati dalam berbagai bidang kehidupan manusia. Beberapa sampel iradiasi dalam proses radioisotop telah berhasil diproduksi dan manfaatnya telah banyak dirasakan diantaranya Lu-177, Ir-192, dan Au-198 [3]-[4]. Karakteristik radioisotop yang dihasilkan sangat bergantung pada proses produksi sampel di dalam reaktor, hal ini karena sampel untuk produksi radioisotop sangat rentan kerusakan. Sebagian besar kerusakan yang terjadi pada sampel iradiasi adalah akibat kenaikan suhu akibat deposisi energi gamma secara terus menerus. pemanasan gamma menjadi penyebab utama dalam kenaikan suhu pada sampel iradiasi. Untuk mencegah kenaikan suhu yang terjadi di dalam reaktor memiliki sistem pendinginan. Besar kecilnya panas harus ditentukan dengan baik sehingga dapat diperkirakan suhu dan sistem pendinginan yang tepat [5].

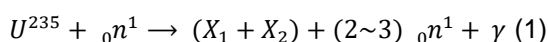
Kelalaian dalam menentukan nilai panas gamma akan menyebabkan panas berlebih pada sampel [6]. Dalam beberapa kasus panas gamma pada reaktor kolam terbuka akan dapat mengubah struktur dan penampang neutron pada sampel [6]. Untuk kasus lain akibat panas gamma sampel isotop medis Holmium-166 mengalami kerusakan pada mikrosfer [7]. Adapun penelitian mengenai panas gamma lainnya seperti estimasi pemanasan gamma yang tersimpan dalam sampel iridium di reaktor HANARO menggunakan MCNP dan kode aktivasi [8], pengukuran panas gamma pada bahan tertentu (Be, Hf) menggunakan detektor *thermo-luminescent* di teras reaktor riset JHR [9] dan Kajian panas gamma pada reaktor TRIGA MARK Bandung [10].

Pada umumnya, penentuan panas gamma dengan metode pengukuran. Namun melalui pengukuran mempunyai kemungkinan kecil untuk dilakukan. Hal ini dikarenakan membutuhkan biaya besar dan keahlian mekanikal dengan kriteria *nuclear grade* dalam pembuatannya. Metode perhitungan menjadi solusi terbaik, dimana dalam penelitian ini penentuan panas gamma akan menggabungkan program ORIGEN2.1 dan Gamset. ORIGEN2.1 diperlukan untuk menentukan tingkat emisi sinar gamma peluruhan dengan mempertimbangkan prosedur aktivasi selama 4 hari dari 5 hari waktu operasi reaktor di CIP (*Central Irradiation Position*) dan IP (*Irradiation Position*). Penentuan panas gamma dapat langsung ditentukan dengan menginputkan emisi sinar gamma hasil perhitungan pada program Gamset. Keakuratan Gamset telah teruji baik dalam menghitung panas gamma pada RSG-GAS yaitu dalam penelitian setiyanto [5],[10], anis rohanda [11]-[12] dan Husnayani [13].

Tujuan dari makalah ini adalah untuk (i) menghitung *gamma heating* selama operasi RSG-GAS dengan menggunakan teras UMo; (ii) membandingkan hasil *gamma heating* teras UMo dengan USi; dan (iii) memperkirakan panas gamma yang dihasilkan setiap produk radioisotop seperti Lu-177, Ir-192 dan Au-198. Hasil dari makalah ini akan memberikan informasi terkait keamanan operasi RSG-GAS dengan bahan bakar UMo dan keamanan produksi radioisotopnya. Hasil perhitungan panas gamma pada makalah ini dapat divalidasi dengan literatur yang sudah ada.

**a. Sumber gamma dari bahan bakar**

Secara harfiah, energi gamma dihasilkan dari inti atom yang tidak stabil karena memiliki energi yang tidak sesuai dengan kondisi dasar (*ground state*). Kondisi atom yang tidak stabil dalam kerja reaktor terjadi pada salah satu fenomena pembelahan U-235. U-235 merupakan bahan fisil, yang dapat membelah ketika menangkap neutron. Inti U-235 membelah menjadi inti-inti atom baru yang lebih ringan. Adapun persamaan reaksi dari peristiwa tersebut dapat dilihat pada persamaan 1 [14].



Berdasarkan persamaan 1 tersebut, energi gamma berkaitan erat dengan U-235, di mana U-235 terdapat pada bahan bakar reaktor. Maka dapat diartikan bahan bakar menentukan energi gamma. Selain bahan bakar, komponen dari reaktor mempengaruhi energi gamma yang dihasilkan. Energi gamma yang dihasilkan pada setiap reaktor dan bahan bakar berbeda menghasilkan nilai yang berbeda pula.

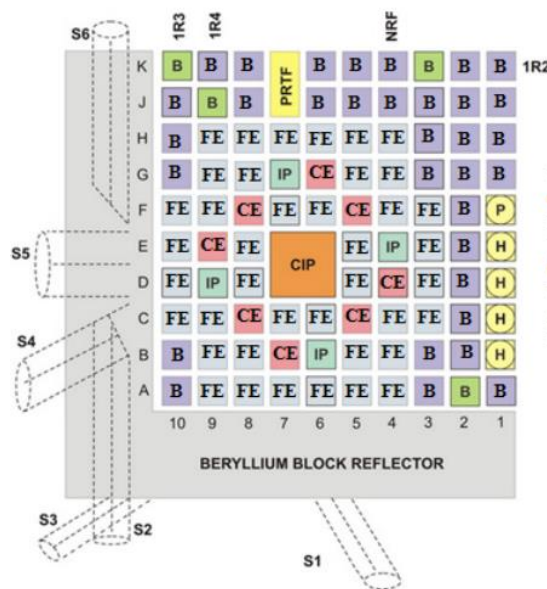
Bahan bakar uranium molibdenum (UMo) merupakan kandidat bahan bakar masa depan untuk reaktor riset. Sebagai reaktor riset, reaktor serba guna GA siwabessy atau RSG-GAS pun mempunyai rencana untuk melakukan perubahan bahan bakarnya. saat bahan bakar RSG-GAS berasal dari uranium silisida. Adapun konfigurasi RSG-GAS dalam grid 10x10 yang tersusun oleh 40 elemen bahan bakar (EB) dan 8 elemen bahan kendali (EK) dan beberapa elemen reflektor berilium (Be) serta beberapa fasilitas iradiasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1[15].

Apabila reaktor dioperasikan, energi gamma yang dihasilkan dari elemen bakar RSG-GAS akan dijadikan sumber gamma. Sumber gamma akan berjalan melewati struktur material dalam teras dan berakhir pada material sampel. Sumber gamma kemudian akan berinteraksi dengan material yang dilewati dan sampel. Adapun interaksi foton (gamma) dengan material dapat dirumuskan menggunakan persamaan redaman berikut.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu \Delta x} \quad (2)$$

Intensitas sumber gamma yang digunakan akan berkurang setiap melewati struktur material teras sampai menuju sampel.

Akibatnya, material yang dilewati dan sampel akan mengalami kenaikan suhu. Peristiwa naiknya suhu pada material teras dan sampel secara terus menerus dinamakan panas gamma. Panas gamma dapat mempengaruhi kualitas sampel, tidak terkecuali kualitas radioisotopnya [5].



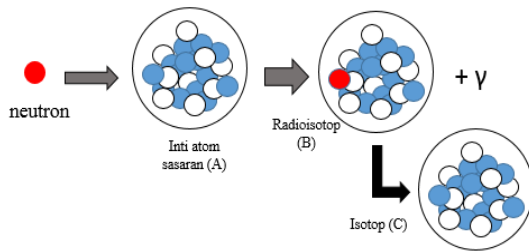
Gambar 1. Konfigurasi teras RSG-GAS [15].

**b. Produksi radioisotop**

Salah satu fasilitas iradiasi material di reaktor riset berfungsi untuk produksi radioisotop. Fasilitas iradiasi untuk produksi radioisotop di RSG-GAS berjumlah 8 lubang yang berada di posisi *irradiation position* (IP) dan *central irradiation position* (CIP). Lubang iradiasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 dalam grid B6, D6, D7, D9, E4, E6, E7 dan G7 [16]. Desain kolam terbuka RSG-GAS membuat sampel radioisotop dimasukkan ke dalam kapsul iradiasi sebelum dilakukan iradiasi.

Kapsul berisi sampel radioisotop kemudian dimasukkan ke dalam teras/kolam iradiasi. sehingga mengakibatkan sampel tersebut terkena paparan neutron termal dan terjadi reaksi penangkapan neutron serta pelepasan energi gamma. Reaksi ini dapat dikenal sebagai reaksi (n,γ). Secara umum sampel akan membentuk radioisotop setelah terjadi reaksi penangkapan neutron oleh inti, kemudian radioisotop akan meluruh menjadi isotop lainnya akibat proses peluruhan seperti pada Gambar 2. Sebagian besar produksi radioisotop di dalam reaktor nuklir menggunakan neutron termal sebagai partikel penembak bahan sampel.

Estimasi Panas Gamma pada Produksi Radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198 di Teras Molibdenum RSG-GAS (Dewi Nur Rizkiana, Anis Rohanda, R Farzand Abdullatif)



Gambar 2. Skema produksi radioisotop dan peluruhannya menjadi isotop

Berbagai sampel telah ditembakkan neutron di berbagai posisi iradiasi pada RSG-GAS. Salah satu radioisotop yang telah diproduksi dan manfaatnya telah dirasakan dalam bidang kehidupan manusia seperti Ir-192, Au-198, dan Lu-177. Tabel 1 menunjukkan bahwa emas alam (Au) tersusun dari satu isotop yaitu (Au-197) sehingga

kelimpahannya 100%. Iridium alam (Ir) tersusun dari 2 buah isotop yaitu Ir-191 dengan kelimpahan 37,3% dan Ir-194 dengan kelimpahan 62,7%. Lutesium alam (Lu) tersusun dari 2 isotop yaitu Lu-175 dengan kelimpahan 97,4% dan 2,6%. Radioisotop Ir-192 ini banyak digunakan dalam radioterapi laju dosis rendah (LDR) dan laju dosis tinggi (HDR) [17] dengan energi gammanya sebesar 316,51 KeV (82,81 %) dan 468,07 KeV (47,83%). Radioisotop Au-198 telah digunakan pula pada *brachytherapy* dalam bentuk *gold grain* [17] dengan memiliki energi gamma sebesar 412 KeV. Sedangkan radioisotop Lu-177 telah dikembangkan untuk radioimmunotherapy [18] yang memiliki radiasi β dengan energi 497 keV (78%) dan radiasi γ dengan energi utama 208 keV (12%) [19]-[20].

Tabel 1. Komposisi target isotop alam dari emas, iridium, dan lutesium [3]

| Unsur | Isotop | Kelimpahan (100%) | Waktu Paruh | Tampang Lintang Reaksi |
|-------|--------|-------------------|-------------|------------------------|
| Au    | Au-197 | 100               | 2,69 hari   | 98,6 barn              |
| Ir    | Ir-191 | 3,73              | 73,8 hari   | 930 barn               |
|       | Ir-193 | 62,7              | 19,1 jam    | 111 barn               |
| Lu    | Lu-175 | 97,4              | 3,6 jam     | 16,4 barn              |
|       | Lu-176 | 2,6               | 6,73 hari   | 2090 barn              |

**c. Perhitungan energi gamma menggunakan ORIGIN2.1**

Oak Ridge Isotope Generation (ORIGEN) adalah modul dari paket kode fisika reaktor yang dikembangkan oleh Laboratorium Nasional Oak Ridge. *Computer code* (program) ORIGIN2.1 digunakan untuk simulasi siklus bahan bakar nuklir, menghitung komposisi nuklida dan produksi dan peluruhan radioisotop melalui reaktor. Hasil keluaran (*output*) ORIGIN2.1 akan menampilkan kontribusi masing-masing nuklida individu secara detail terhadap total keseluruhan untuk setiap percobaan. Salah satu data *output* yaitu mengenai spektrum dan intensitas radiasi gamma yang dipancarkan dari bahan bakar nuklir yang diiradiasi pada kondisi operasi sesuai reaktor tertentu dengan

riwayat iradiasinya. Saat menghitung spektrum foton peluruhan, akumulasi inti nuklida tertentu diperlukan.

*Library* yang tercantum dalam ORIGIN2.1 yaitu peluruhan, foton dan tampang lintang. Dalam menentukan spektrum dan intensitas radiasi gamma maka digunakan *library* peluruhan dan foton. Untuk memudahkan perhitungan, energi foton di ORIGIN2.1 dibagi menjadi 18 kelompok.

Dalam ORIGIN2.1, menghitung spektrum dan intensitas gamma dilakukan dengan mengakumulasikan inti nuklida selama proses fisi berlangsung. jumlah nuklida Ni berubah sebagai fungsi waktu dijelaskan oleh persamaan diferensial biasa orde satu nonhomogen seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3 berikut.

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=1}^N I_{ij} \lambda_j N_j + \phi \sum_{k=1}^N f_{ik} \sigma_k N_k - (\lambda_i + \phi \sigma_i + r_i) N_i + F_i \quad i = 1 \dots N \tag{3}$$

Ni adalah konsentrasi nuklida ke-i, N adalah jumlah nuklida, Iij adalah pecahan dari disintegrasi radioaktif oleh nuklida lain yang mengarah pada pembentukan nuklida i. λi adalah konstanta peluruhan radioaktif, φ adalah posisi dan energi rata-rata fluks neutron, fik adalah fraksi penyerapan neutron

oleh nuklida lain yang mengarah ke pembentukan nuklida. σk adalah rata-rata spektrum serap neutron penampang nuklida k, ri adalah laju pelepasan nuklida i dari sistem dan Fi adalah laju umpan nuklida i (Hong, S et al., 2016). Melalui perhitungan nilai N, maka ORIGIN2.1 dapat menghitung laju pelepasan

foton oleh nuklida  $i$  dengan menggunakan kartu perintah DEC melalui perhitungan menggunakan persamaan 4 sebagai berikut.

$$P_i = g_i \lambda_i N_i \quad (4)$$

$P_i$  merupakan laju pelepasan foton dari nuklida  $i$ ,  $g_i$  adalah foton yang terlepas per peluruhan (dalam ORIGEN2.1 menggunakan *library photon*) [21]. Database ORIGEN2.1 mencakup tiga keluarga nuklida: 130 nuklida tergolong aktinida 850 nuklida tergolong fragmen fisi, dan 720 nuklida tergolong produk aktivasi (total 1.700 nuklida) masing-masing dengan pustaka yang berbeda. Seperti disebutkan sebelumnya, spektrum dan intensitas fluks gamma dari bahan bakar yang diiradiasi dihitung pada 18 kelompok energi dan kemudian didefinisikan sebagai sumber foton dalam Gamset untuk penentuan panas gamma [22].

#### d. Perhitungan Panas Gamma Menggunakan Gamset

Perhitungan panas gamma di teras reaktor nuklir dapat dilakukan melalui perhitungan. Pendekatan melalui perhitungan program komputer yang dilengkapi dengan data material di teras reaktor secara lengkap, baik jenis maupun dimensinya serta data karakteristik yang terkait dan yang berlaku untuk rentang energi gamma yang ada. Data pendukung yang diperlukan adalah intensitas gamma untuk setiap energi yang ada, atau setidaknya program tersebut harus dilengkapi dengan metode perhitungan spektrum gamma teras reaktor [23].

Perhitungan panas gamma dilakukan dengan menggunakan kode GAMSET. Kode ini secara khusus dikembangkan untuk menghitung pemanasan gamma yang disimpan dalam bahan sampel yang diiradiasi di inti RSG-GAS. Dalam Gamset, setiap elemen bahan bakar RSG-GAS dimodelkan sebagai sumber gamma yang akan berjalan melalui teras, melewati setiap struktur material dalam teras, dan akhirnya mencapai material sampel. Adapun persamaan panas gamma yang mendasari program Gamset yaitu [5].

$$P = I(E) \cdot E_\gamma \cdot k \quad (5)$$

Di mana  $P$  (W/g) panas gamma yang tertinggal pada materi/bahan dapat ditentukan dengan melalui perkalian energi gamma ( $E_\gamma$ ) (MeV), faktor konversi ( $k$ ) ( $1,6 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} / \text{MeV}$ ) dan intensitas sinar gamma ( $I$ ) ( $\text{gamma}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ).

## METODOLOGI

Prosedur dalam penelitian ini meliputi beberapa tahapan yaitu penentuan sumber gamma RSG-GAS menggunakan program ORIGEN2.1, persiapan karakteristik data teras molibdenum RSG-GAS, persiapan karakteristik sampel material, dan analisis panas gamma menggunakan Gamset.

### a. Penentuan gamma dengan ORIGEN2.1

Tahap ini diawali dengan melakukan instal program ORIGEN2.1 yang terdiri dari ORIGEN2.1.exe, library, input, dan output. Kemudian dipastikan keempat file tersebut dalam satu folder yang sama. Langkah selanjutnya, membuat input dengan memasukan data seperti library reaktor riset, komposisi bahan bakar uranium molibdenum, komposisi target, dan data lainnya yang disesuaikan dengan kondisi operasi RSG-GAS. Proses aktivasi selama 4 hari dengan posisi penelitian CIP [5,3] dan IP [3,3].

Data output ORIGEN2.1 diperoleh 18 grup energi, yang kemudian dibagi menjadi 3 bagian grup spektrum energi gamma. Spektrum energi gamma yang luas diringkas menjadi tiga kelompok energi yaitu 0,1 MeV, 0,5 MeV dan 1,50 MeV. Semua energi gamma di dalam berkisar dari 0 hingga 0,25 MeV diubah menjadi 0,1 MeV, sedangkan semua energi gamma dalam kisaran antara 0,25 hingga 0,09 MeV dikonversi menjadi 0,5 MeV, dan di atas 0,09 MeV dikonversi menjadi 1,50 MeV [5]. Aproksimasi dilakukan untuk memasukkan data spektrum energi gamma pada file masukan Gamset yaitu konstanta.

### b. Persiapan karakteristik data teras UMO

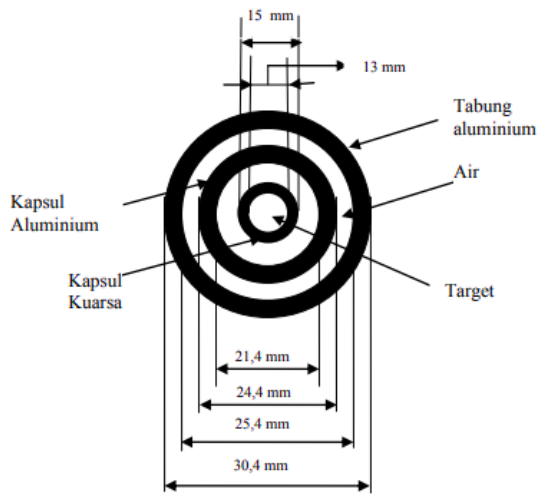
Standar teras UMO masih terus dilakukan penelitian pada RSG-GAS. oleh karena itu, pada tahap ini data teras UMO disesuaikan dengan konfigurasi teras RSG-GAS sebenarnya seperti pada Gambar 1. Data teras berisi Konfigurasi teras, koordinat, posisi target, koefisien gangguan lokal sumber (CPLS), konfigurasi daya teras, dan kode pembagian sumber.

CPLS atau koefisien gangguan lokal sumber yang digunakan adalah air. Koefisien gangguan lokal dicantumkan untuk mencerminkan ketidakrataan daya sebagai akibat adanya bahan-bahan reflektor. Daya yang digunakan meliputi 15 MWt dan 30 MWt sehingga PPF (*power peaking factors*). Data karakteristik teras RSG-GAS ini akan dimasukkan ke dalam file utama code Gamset yang dinamakan teras (COEUR).

Estimasi Panas Gamma pada Produksi Radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198 di Teras Molibdenum RSG-GAS (Dewi Nur Rizkiana, Anis Rohanda, R Farzand Abdullatif)

**c. Persiapan karakteristik data sampel radioisotop**

Persiapan data sampel/materi terdiri dari elemen bakar, kapsul iradiasi, sampel, dan lain sebagainya. Komposisi kapsul iradiasi dapat dilihat pada Gambar 3. Data karakteristik material dalam proses produksi radioisotop <sup>177</sup>Lu, <sup>192</sup>Ir, <sup>198</sup>Au ditunjukkan pada Tabel 1. Dalam produksi radioisotop, sampel akan dimasukkan kedalam *quartz*/tabung selama iradiasi [2].



Gambar 3. Komposisi kapsul iradiasi

Susunan paling dalam adalah kapsul kuarsa untuk sampel dengan diameter dalam 13 mm, diameter luar 15 mm, dan tinggi 50 mm, mengisi gas He antara kapsul kuarsa dan kapsul aluminium, kemudian mengisi lapisan luar. Sebuah tabung aluminium dengan

diameter dalam 25,4 mm, diameter luar 30,4 mm, dan tinggi poros 500 mm [24]. Data karakteristik material dimasukkan ke salah satu file utama *code* Gamset yaitu Target (*DISPO*).

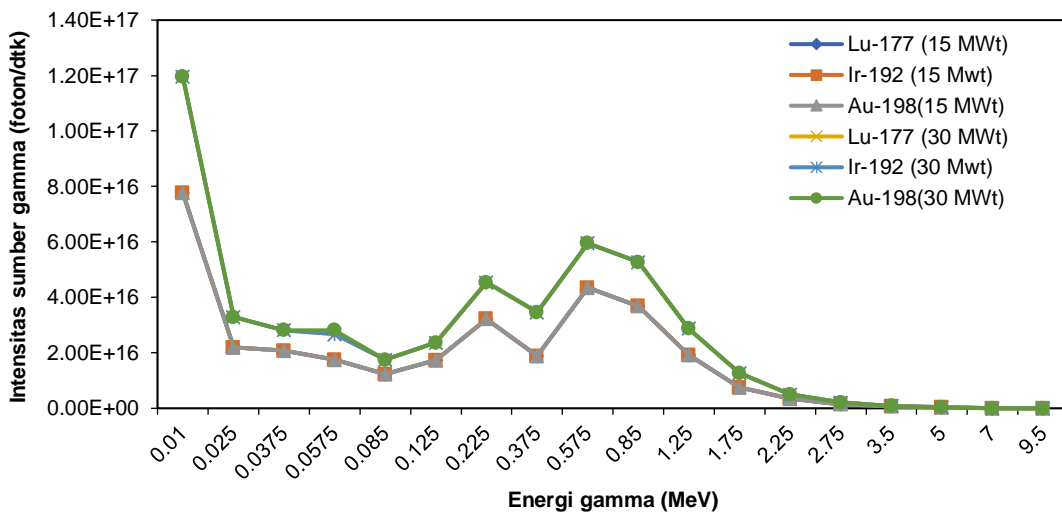
**d. Analisis panas gamma**

Ketiga *file* utama Gamset yaitu konstanta (*CONSTANT*), target (*DISPO*), dan teras (*COEUR*) kemudian akan di *running* melalui Gamset (.exe). Data Hasil dari *running* program akan diseleksi untuk mendapatkan data panas gamma (W/g). Seleksi data panas pada sub bagian daya kumulatif (g/cm) dan daya tiap satuan massa (W/g). Penggambaran analisis data akan disimulasikan melalui *software* Microsoft Excel dan Origin 2021b.

Panas gamma pada penelitian ini akan dilakukan validasi dengan membandingkan nilai panas gamma maksimum pada literatur yaitu 20 W/g [25]. Validasi ini pilihan terbaik akibat kesulitan dilakukan pengukuran panas gamma pada reaktor RSG-GAS secara langsung.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Sumber gamma pada RSG-GAS berbahan bakar UMo telah dihitung dengan tingkat daya 15 dan 30 MWt menggunakan *computer code* (program) ORIGEN2.1. Berdasarkan Gambar 4, spektrum energi gamma terdiri dari *photon spectrum for activation products, actinides & daughters* dan *fission products*.



Gambar 4. Sumber gamma RSG-GAS untuk produksi Radioisotop pada tingkat 15 dan 30 MWt dengan sampel Lu, Ir dan Au

Ketiga jenis radioisotop yang dihasilkan tidak mengalami perbedaan signifikan pada daya yang sama [12]. Hal ini dilihat jumlah total spektrum energi yang dihasilkan sama, namun pada daya yang berbeda, data spektrum gamma yang dihasilkan berbeda-beda [12]. Data spektrum energi gamma ini dimasukkan ke dalam masukan Gamset. Sehingga diperoleh pemanasan gamma pada sampel dengan sampel Ir, Au, dan Lu yang diiradiasi di teras RSG-GAS di posisi IP dan CIP untuk bahan bakar UMo yang digunakan.

Pada Tabel 2 dilihat USi memperoleh nilai panas gamma tertinggi sebesar 13,3 W/g. Sedangkan nilai panas gamma tertinggi pada bahan bakar UMo sebesar 8,67 W/g. Hasil ini memberikan informasi bahwa nilai panas gamma yang dihasilkan dari bahan bakar

UMo lebih rendah dibandingkan USi. Hal ini sangat menguntungkan, karena panas gamma yang lebih rendah akan memudahkan penanganan kapasitas pendinginan yang diperlukan dan lebih aman terkait titik pendidihan bagi material sampel. Sementara itu, Berdasarkan densitasnya, UMo menghasilkan panas gamma yang menghasilkan pengaruh berbanding terbalik. Yaitu, semakin tinggi densitas uranium, semakin rendah panas gamma yang dihasilkan. Densitas uranium yang tinggi akan memperpanjang umur operasi di setiap siklusnya. Dengan demikian, penggunaan bahan bakar UMo dengan densitas yang tinggi akan menguntungkan dari berbagai aspek keselamatan operasi reaktor dan sampel iradiasinya.

Tabel 2. Panas gamma pada berbagai bahan bakar hasil simulasi pada daya 30 MWt

| Tipe Bahan Bakar               | Panas Gamma (W/g) |      |      | Perubahan suhu (°C) |        |        |
|--------------------------------|-------------------|------|------|---------------------|--------|--------|
|                                | Au                | Ir   | Lu   | Au                  | Ir     | Lu     |
| U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> | 9,27              | 10,5 | 13,3 | 73,571              | 82,031 | 88,667 |
| UMo-300                        | 5,85              | 7,12 | 8,69 | 46,429              | 55,625 | 57,933 |
| UMo-390                        | 5,64              | 6,92 | 8,44 | 44,762              | 54,063 | 56,267 |
| UMo-450                        | 5,37              | 6,67 | 8,14 | 42,619              | 52,109 | 54,267 |
| UMo-550                        | 5,13              | 6,44 | 7,86 | 40,714              | 50,313 | 52,400 |
| UMo-700                        | 4,85              | 6,18 | 7,54 | 38,492              | 48,281 | 50,267 |

Perubahan suhu pada material bahan selama proses produksi radioisotop dapat dipengaruhi oleh perubahan panas gamma pada material tersebut. Tabel 2 menunjukkan perubahan suhu pada material sampel dalam produksi radioisotop Au-198, Ir-192, dan Lu-177 dengan perhitungan analitik yang bergantung pada nilai kalor jenis bahan. Kalor jenis bahan emas sebesar 126 J/kg°C, kalor jenis bahan iridium sebesar 128 J/kg°C, dan kalor jenis bahan lutesium sebesar 150 J/kg°C[3].

Pada proses produksi radioisotop, RSG-GAS mempunyai dua pilihan utama untuk menggunakan daya termal yaitu 15 dan 30 MWt. Untuk itu, kajian pengaruh panas

gamma dengan daya termal yang digunakan untuk mendukung informasi keselamatan panas gamma produksi radioisotop ini telah disusun pada Tabel 3. Hal ini juga sesuai dengan penelitian Rohanda A. *et al.*, (2020) dan Alqahtani *et al.*, (2020) [26]. Berdasarkan Tabel 3, didapatkan daya termal dengan panas gamma yang dihasilkan memiliki pengaruh berbanding lurus. Nilai panas gamma tertinggi didapatkan dari ketiga radioisotop tersebut yaitu pada daya termal 30 MWt. Pada nilai panas gamma tertinggi ini tidak ada yang melebihi nilai maksimum panas gamma yang ada pada literatur lain yang mencapai < 20 W/g [25].

Tabel 3. Pengaruh perbedaan daya termal dengan panas gamma UMo-700 yang dihasilkan

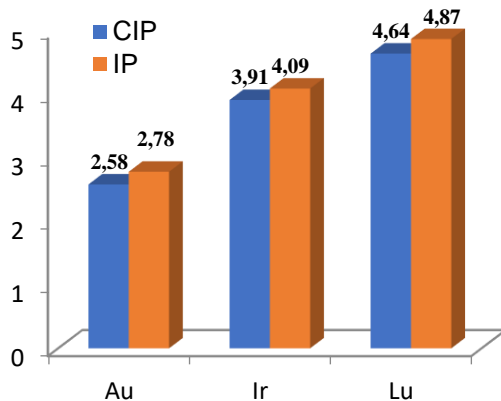
| Daya (MWt) | Jenis Radioisotop | Sumber pemanasan gamma (W/g) |               |               | Total |
|------------|-------------------|------------------------------|---------------|---------------|-------|
|            |                   | Gamma dari teras             | Auto iradiasi | Neutron cepat |       |
| 15         | Au                | 1,40                         | 1,18          | 0,00155       | 2,58  |
|            | Ir                | 0,57                         | 3,32          | 0,00155       | 3,91  |
|            | Lu                | 0,70                         | 3,94          | 0,00299       | 4,64  |
| 30         | Au                | 2,23                         | 1,18          | 0,00155       | 4,11  |
|            | Ir                | 2,14                         | 3,32          | 0,00155       | 5,46  |
|            | Lu                | 2,63                         | 3,94          | 0,00155       | 6,58  |



Estimasi Panas Gamma pada Produksi Radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198 di Teras Molibdenum RSG-GAS (Dewi Nur Rizkiana, Anis Rohanda, R Farzand Abdullatif)

Tabel 3 memperlihatkan sumber panas gamma yang terdiri dari gamma dari teras, auto radiasi, dan neutron cepat. Gamma dari teras memiliki nilai yang berubah-ubah secara signifikan pada setiap sampel dan daya reaktor. Sedangkan auto iradiasi dan neutron cepat tidak mengalami perubahan secara signifikan [13].

Hasil panas gamma inti UMo pada posisi iradiasi yang berbeda dapat diilustrasikan melalui diagram yang terlihat pada Gambar 5. Sampel yang diradiasi pada posisi IP memiliki jumlah pemanasan gamma yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi CIP. Hal ini dapat dijelaskan bahwa posisi IP dikelilingi oleh grid elemen bahan bakar ke segala arah sedangkan posisi CIP hanya dikelilingi elemen bahan bakar dari sebelah kiri dan atas sebagai kontributor panas gamma eksternal. Artinya radiasi gamma yang memberikan kontribusi paling besar terhadap pembangkitan pemanasan gamma berasal dari struktur elemen bahan bakar yang paling dekat dengan posisi material sampel, sedangkan radiasi gamma lainnya yang berasal dari jarak yang cukup jauh dari posisi material sampel telah dilemahkan sesuai dengan jaraknya dan struktur teras yang dilewati [13].



Gambar 5. Panas gamma UMo-700 pada posisi CIP dan IP.

## KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, hasil panas gamma oleh deposisi energi gamma teras UMo dalam produksi radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198 dapat dikategorikan aman. Ambang batas maksimum (umumnya 20 W/g) dari kajian panas masih terlalu jauh dari panas gamma yang dihasilkan dalam simulasi ini. Bahan bakar UMo memiliki panas gamma yang lebih

rendah dibandingkan bahan bakar USi untuk melengkapi keunggulan sebagai kandidat bahan bakar reaktor di masa depan. Kenaikan daya reaktor berpengaruh langsung pada panas gamma. Semakin tinggi daya reaktor semakin tinggi nilai panas gamma. Panas gamma pada lokasi iradiasi IP memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi iradiasi CIP. Hal ini karena lokasi iradiasi dipengaruhi oleh pembagian sumber gamma pada teras RGS-GAS. Panas gamma pada produksi radioisotop Lu-177 memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan produksi Ir-192 dan Au-198. Panas gamma selain ditentukan oleh nomor atom sampel, juga dipengaruhi oleh koefisien massa.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Jenderal Soedirman, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Jurusan Fisika dan pihak Direktorat Pengelola Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK) atau ex-PRSG dan juga pihak PRTRN ORTN BRIN yang telah membantu selama kegiatan pengambilan data dan penelitian berlangsung.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Widodo, "Studi pemungutan serbuk UMo dari gagal PEB dispersi UMo/Al menggunakan teknik elektrolisis," 2016. ISSN 08545561.
- [2] International Atomic Energy Agency IAEA. Tech. Rep. IAEA-TECDOC-1340, 2003.
- [3] R. Awaludin, "Perhitungan pembuatan Emas-192, Iridium-192 dan Lutesium-177 dengan aktivasi neutron untuk partikel nano radioaktif," p.10, 2008.
- [4] M.A. Soliman, N.M.A Mohamed, K. Takamiya, S. Sekimoto, M Inagaki, Y. Oki, dan T Ohsuki, "Estimation of  $^{47}\text{Sc}$  and  $^{177}\text{Lu}$  production rates from their natural targets in Kyoto University Research Reactor," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07156-y>
- [5] Setiyanto, "Puissance deposee par les rayonnement gamma dans le reacteur Siloe Measure par le calorimetrie et calcul par le code Gamset," *Doctoral Dissertation in ENSPG-INPG Franc*, 1991.

- [6] M. Lemaire, V. Gaudard, R. Carette, "For a better estimation of gamma heating in experimental reactors and devices: Stakes and work plan from calculation methods to nuclear data", in *Proceedings of 2013 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and Their Applications (ANIMMA) Aix Marseille*, 23–27 June 2013. <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2013.6727890>.
- [7] C. Heysel, A. Armstrong, J. Bennett, J. Werger, E. Naperstkov, Z. Pasuta, "Customized irradiation sites for medical isotope production," *Can. Nucl. Soc.* 50, 2018.
- [8] T. Noh, B.G. Park, M. S. Kim, "Estimation of nuclear heating by delayed gamma rays from radioactive structural materials of HANARO," *Nuclear Engineering and Technology* 50, pp. 446–452, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.01.010>
- [9] J. Klein, et. al., "AMMON: An experimental program in the EOLE critical facility for the validation of the JHR Neutron and Photon HORUS3D calculation scheme", 13, 2009.
- [10] S. Setiyanto, T. Surbakti, "Analysis of gamma heating at Triga Mark Reactor core Bandung using plate type fuel," *Tri Dasa Mega* 18, p. 127, 2016. <https://doi.org/10.17146/tm.2016.18.3.3004>
- [11] A. Rohanda, A. Waris, R. Kurniadi, S. Bakhri, Pardi, D. Haryanto, "Validation and improvement of gamma heating calculation methods for the G.A. Siwabessy multipurpose reactor," *Nuclear Science and Techniques*, vol. 31, no.11, p. 112, 2020. doi: 10.1007/s41365-020-00824-4
- [12] A. Rohanda, A. Waris, Kiswanta, I. Husnayani, "Gamma heat analysis in various power levels of RSG G.A. Siwabessy silicide core," *Journal of Physics: Conference Series*, 1493. ISSN 1742-6588, 2020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012028>
- [13] I. Husnayani, M.B. Setiawan, P.M. Udiyani, S. Kuntjoro, "Evaluation of nuclear heating in sample materials irradiated in RSG – GAS core," 020011, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5135520>
- [14] A. H. Compton, "A Quantum theory of the scattering of x-rays by light elements," *The Physical Review*, Vol. 21, No. 5, 1923.
- [15] E. P. Hastuti, I. Kuntoro, Suwoto, Syarip, P. Basuki, T. Surbakti, G.R. Sunaryo, Sudarmono, "Map of radioisotope production," *Tri Dasa Mega* 23, p. 105, 2021. <https://doi.org/10.17146/tm.2021.23.3.6288>.
- [16] Y. E. Yulianto, M. Imron, "Manajemen Pengoperasian Reaktor RSG-GAS," 2013.
- [17] K. Morita., "Manual for therapy using sealed sources", *Aichi cancer center*, Nagoya, 1989.
- [18] A.V. Rao, G. Akabani, D. A. Rizzieri, "Radioimmunotherapy for NonHodgkin's Lymphoma," *Clin Med Res*, 3 (3), pp. 157-65, 2005.
- [19] A. B. Samani, A. Anvari, A.R. Jalilian, S. Arani, H. Yousefnia, M.R. Aghamiri, M. G. Maragheh, "Production, quality control and pharmacokinetic studies of <sup>177</sup>Lu-EDTMP for human bone pain palliation therapy trials," *US National Library of Medicine National Institutes of Health*, vol. 11, no.1, pp. 137–144, 2012.
- [20] F. F. Knapp Jr, K. R. Ambrose, A. L. Beets, H. Luo, D. W. McPherson, S. Mirzadeh, "Nuclear medicine program progress report for quarter ending September 30, 1995," (No. ORNL/TM-13107). *Oak Ridge National Lab.*, United States, 1995.
- [21] L. P. Hong, and T. M. Sembiring, "Development of new ORIGEN2 data library sets for research reactors with light water cooled oxide and silicide LEU (20 w/o) fuels based on JENDL-3.3 nuclear data," *Nuclear Engineering and Design* 262, pp.52– 62, 2013.
- [22] S. Bagheri, H. Khalafi, F. Faghihi, A. Ezzati, M. Keyvani, H. Ghods, "Gamma dose rate determination of TRR irradiated fuel assemblies," *Progress in Nuclear Energy*, 142, 103950, 2021.
- [23] Y. K. Lee, J.C. David, H. Carcreff, "A gamma heating calculation methodology for research reactor application," in *5th International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management ENS RRFM 2001 Transactions*, Oral presentations and posters, European Nuclear Society Aachen Germany, p. 215, 2001.

Estimasi Panas Gamma pada Produksi Radioisotop Lu-177, Ir-192, dan Au-198 di Teras Molibdenum RSG-GAS  
(Dewi Nur Rizkiana, Anis Rohanda, R Farzand Abdullatif)

---

- [24] S. Susanto, F. Susanti, "Kajian penambahan dummy aluminum pada posisi iradiasi sentral (Cip) terhadap parameter neutronik reaktor RSG-GAS," *Reaktor Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, vol.16, no.1 p. 40, 2019. <https://doi.org/10.17146/bprn.2019.16.1.5426>.
- [25] A. Gruel , K. Ambrožič, C. Destouches ,V. Radulović , A. Sardet, and L. Snoj, "Gamma heating and gamma flux measurement in the JSI TRIGA reactor :result and prospects," *IEEE Transactions On Nuclear Science*, vol. 67, no. 4, 2020.
- [26] M. Alqahtani, "On-line measurement and simulation of the in-core gamma energy deposition in the McMaster nuclear reactor," *Nuclear Engineering and Technology*, p. S1738573321004630, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.07.040>

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG