

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <https://ejournal.brin.go.id/urania/>



ANALISIS PENGARUH GEOMETRI *FUEL ASSEMBLY* TERHADAP KRITIKALITAS DAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DALAM TERAS REAKTOR RSG–GAS MENGGUNAKAN OPENMC

Ibnu Fathan Rastri¹, Saga Octadamailah², Sukarman¹

¹Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia – BRIN

Jl. Babarsari POB 6101 YKBB, Yogyakarta 55281

²Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN

Kawasan Sains dan Teknologi B.J. Habibie, Gedung 720, Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: iibnufathanr@gmail.com

(Naskah diterima: 12–02–2024, Naskah direvisi: 23–03–2024, Naskah disetujui: 20–04–2024)

ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH GEOMETRI *FUEL ASSEMBLY* TERHADAP KRITIKALITAS DAN DISTRIBUSI FLUKS NEUTRON DALAM TERAS REAKTOR RSG-GAS MENGGUNAKAN OPENMC. Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy (RSG–GAS) termasuk ke dalam reaktor riset berjenis MTR memiliki elemen bakar berbentuk pelat lurus dengan berbahan bakar uranium silisida kerapatan 2,96 gU/cm³. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh geometri elemen bakar model pelat lurus terhadap kritikalitas dan distribusi fluks neutron dalam teras reaktor RSG–GAS. Simulasi Monte Carlo dengan OpenMC dilakukan pada lima jenis elemen bakar, yaitu dari RSG–GAS, HANARO, WWR-SM, MARIA, dan BRR, dengan massa U²³⁵ 250 gram per elemen bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk geometri dari elemen bakar yang berbeda-beda mempengaruhi nilai kritikalitas dan distribusi fluks dalam satu teras yang sama. Nilai kritikalitas tertinggi didapatkan pada elemen bakar dari HANARO kemudian diikuti oleh RSG-GAS dan terendah didapatkan pada elemen bakar dari WWR-SM. Distribusi fluks pada elemen bakar dari MARIA dan BRR ini memiliki distribusi fluks yang lebih bagus.

Kata kunci: RSG-GAS, kritikalitas, distribusi fluks, OpenMC, geometri elemen bakar.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFECT OF FUEL ASSEMBLY GEOMETRY ON CRITICALITY AND NEUTRON FLUX DISTRIBUTION IN THE RSG-GAS REACTOR CORE USING OPENMC. *The G. A. Siwabessy Multi-Purpose Reactor (RSG-GAS) is included in the MTR type research reactor having a straight plate-shaped fuel element fueled by uranium silicide with a density of 2.96 gU/cm³. This research aims to analyze the influence of the geometry of the straight plate model fuel element on the criticality and distribution of neutron flux in the RSG-GAS reactor core. Monte Carlo simulations with OpenMC were carried out on five types of fuel elements namely from RSG-GAS, HANARO, WWR-SM, MARIA, and BRR, with mass U235 250 grams per fuel element. The research results show that the geometric shapes of different fuel elements influence the criticality value and flux distribution in the same core. The highest criticality value was obtained for the fuel element from HANARO followed by RSG-GAS and the lowest was obtained for the fuel element from WWR-SM. The flux distribution in the fuel elements from MARIA and BRR has a better flux distribution.*

Keywords: *RSG-GAS, criticality, flux distribution, OpenMC, fuel element geometry.*

PENDAHULUAN

Pemanfaatan reaksi fisi nuklir dalam sebuah reaktor tidak hanya sebatas pada menghasilkan energi listrik melainkan dapat menghasilkan fluks neutron termal untuk tujuan penelitian dan produksi radioisotop [1]. Indonesia memiliki tiga buah reaktor riset yang tersebar di tiga kota berbeda, yaitu Bandung, Yogyakarta, dan Tangerang Selatan. Salah satu dari ketiga reaktor tersebut ialah Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy (RSG-GAS) yang terletak di Serpong, Tangerang Selatan.

RSG-GAS termasuk ke dalam reaktor riset dengan jenis MTR (*Material Testing Reactor*) dengan fluks neutron rerata sebesar 2×10^{14} n/cm²s yang dimanfaatkan untuk produksi radioisotop, iradiasi perangkat bahan bakar reaktor daya, analisis aktivasi neutron dan uji tidak merusak [1]. Awalnya, penggunaan bahan bakar reaktor ini adalah uranium oksida kemudian digantikan dengan uranium silida dengan kerapatan sebesar 2,96 gU/cm³ dengan pengkayaan uranium rendah [2].

Pengembangan bahan bakar nuklir tidak hanya memperhatikan paduan uranium dengan bahan lain atau kerapatan uranium, tetapi juga fokus pada desain bentuk elemen bakar. Bahan bakar yang paling sering diproduksi untuk reaktor yang berjenis reaktor serba guna adalah bahan bakar jenis pelat lurus yang hampir meliputi 60% dari keseluruhan reaktor serba guna yang telah dibangun [3]. Banyak negara menggunakan pelat lurus untuk reaktor riset mereka, dengan susunan horizontal dan penyangga di kedua sisi. Ini dipengaruhi oleh kemampuan negara dan kerjasama internasional, seperti dalam pembangunan reaktor di Indonesia. Pemilihan bahan bakar dipengaruhi oleh faktor ekonomis dan keselamatan. Beberapa negara, seperti Hungaria, Rusia, dan Korea Selatan, mengembangkan bahan bakar dengan geometri yang disesuaikan untuk reaktor riset mereka. Contohnya, HANARO di Korea Selatan memiliki desain geometri elemen bakar tersendiri dan termasuk IRT-4M di Rusia.

Penelitian yang dilakukan oleh Alnahdi et al (2023) [4] membandingkan elemen bahan bakar bentuk pelat melengkung dengan pelat lurus dimana jumlah dan volume dari kedua bahan bakar disamakan. Simulasi dilakukan dengan mengabaikan batang kendali, lajur termal, *port* berkas neutron, dan struktur beton yang mengelilingi teras reaktor.

Pengujian kedua elemen bahan bakar yang berbeda ini menunjukkan kondisi kritis terutama pada elemen bahan bakar pelat melengkung walaupun nilai kekritisan yang tidak sama jika dibandingkan dengan yang pelat lurus sehingga dapat dikatakan bahwa pengaruh pelat melengkung pada reaktor MTR dapat berkontribusi menjadi literatur dan acuan dasar.

Makalah ini berfokus pada elemen bakar dengan mengabaikan elemen-elemen lain yang berada di teras RSG-GAS. Penggantian elemen bakar yang berjenis pelat lurus yang sekarang digunakan dengan elemen bakar lain dengan bentuk geometri berbeda seperti IRT-4M dan bentuk geometri lainnya untuk dapat dibandingkan hasil satu dengan yang lain. Perbandingan antar geometri ini memperhatikan persamaan massa U²³⁵ per elemen bakar dimana untuk sekarang massa U²³⁵ dalam satu elemen bakar yang digunakan oleh RSG-GAS sebesar 250 gram/elemen bakar. Perbedaan nilai distribusi fluks dan kritikalitas yang diperoleh dapat dibandingkan dengan hasil nilai distribusi fluks dan kritikalitas dari RSG-GAS dengan geometri yang menggunakan pelat lurus.

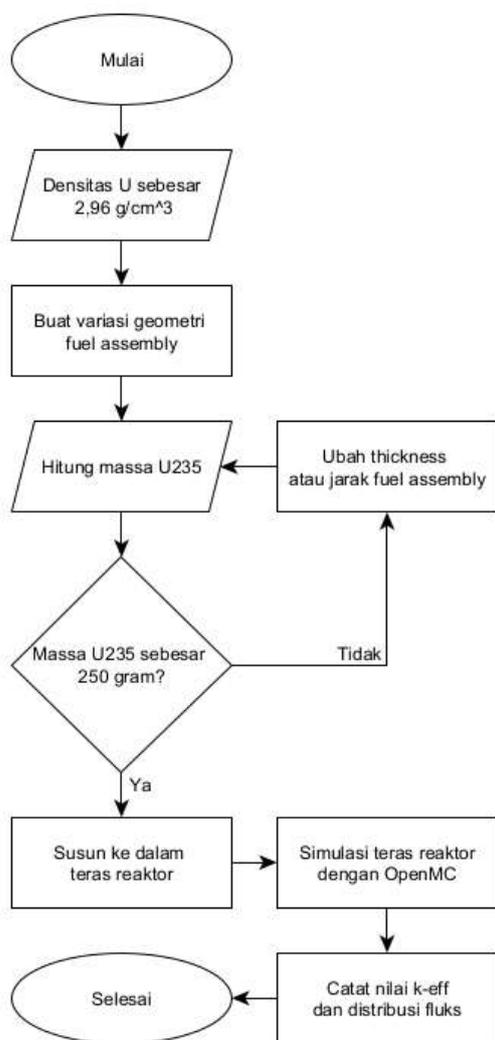
Hal yang perlu diperhatikan dalam mendesain sebuah teras reaktor adalah mengetahui perilaku neutron selama reaksi fisi berlangsung sehingga penggunaan Monte Carlo memudahkan untuk menghitung kritikalitas efektif (k_{eff}) dalam suatu simulasi dengan jumlah yang banyak. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung k_{eff} pada teras dengan elemen bakar yang memiliki variasi bentuk geometri dan mendapatkan distribusi fluksnya. Metode Monte Carlo sering digunakan dalam menghitung persoalan yang bersifat probabilistik karena dari metode ini yang paling mendekati kondisi sebenarnya [5]. Salah satu *code* yang bersifat *open source* yang dapat menghitung *transport* partikel dengan simulasi Monte Carlo ialah OpenMC yang dirilis pada Desember 2012 [6].

METODOLOGI

Proses perhitungan kritikalitas dan distribusi fluks untuk reaktor RSG-GAS dengan geometri elemen bakar yang berbeda-beda, dengan memperhatikan kerapatan uranium yang sama untuk mendapatkan massa yang sama, dijelaskan pada Gambar 1.

Pada OpenMC, hal pertama yang harus dibuat ialah menentukan kerapatan dan

komposisi dari material yang diperlukan menjadi penyusun dari reaktor. Penentuan bahan memudahkan OpenMC membedakan satu geometri dengan geometri yang lainnya serta tidak membuat geometri dianggap dalam keadaan *void* (kosong) karena tidak diisi dengan bahan tertentu. Terdapat 5 material yang digunakan selama pemodelan teras, yaitu Uranium Silisida, AlMg2, AlMg1, Air dan Berilium. Material air digunakan sebagai moderator dengan komposisi yang tertera pada Tabel 4 dan komposisi material berilium yang digunakan untuk reflektor ditunjukkan pada Tabel 5.



Gambar 1. Diagram Alir perhitungan nilai k_{eff} dan distribusi fluks.

Langkah selanjutnya ialah membuat geometri elemen bakar atau kumpulan bahan bakar dalam OpenMC. Tabel 1, 2, dan 3 berisi bahan yang digunakan dalam elemen bakar RSG-GAS dan untuk elemen bakar yang lainnya hanya menggunakan Tabel 1 dan 2 karena tidak memiliki *side plate*. Elemen bakar yang lain diambil dari beberapa reaktor riset yang digunakan beberapa negara. Dimensi satu elemen bakar untuk setiap geometri elemen bakar disamakan ukuran sebesar 77,1 x 81 x 600 mm.

Tabel 1. Komposisi uranium silisida[7]

| Densitas (g/cm ³) | Komposisi unsur (wt%) | | |
|-------------------------------|-----------------------|---------|-----------|
| | Uranium | Silikon | Aluminium |
| 5,13 | 57,8 | 4,60 | 37,60 |

Tabel 2. Komposisi AlMg2[7]

| Densitas (g/cm ³) | 2,70 |
|-------------------------------|------|
| Komposisi unsur (wt%) | |
| Aluminium | 96,3 |
| Magnesium | 2,05 |
| Silikon | 0,3 |
| Ferrum | 0,4 |
| Chrom | 0,3 |
| Mangan | 0,3 |
| Zinc | 0,2 |
| Titanium | 0,1 |
| Cuprum | 0,05 |

Tabel 3. Komposisi AlMg1[7]

| Densitas (g/cm ³) | 2,70 |
|-------------------------------|--------|
| Komposisi unsur (wt%) | |
| Aluminium | 96,78 |
| Magnesium | 2,76 |
| Silikon | 0,12 |
| Ferrum | 0,001 |
| Chrom | 0,01 |
| Mangan | 0,04 |
| Zinc | 0,2 |
| Titanium | 0,01 |
| Cuprum | 0,0039 |

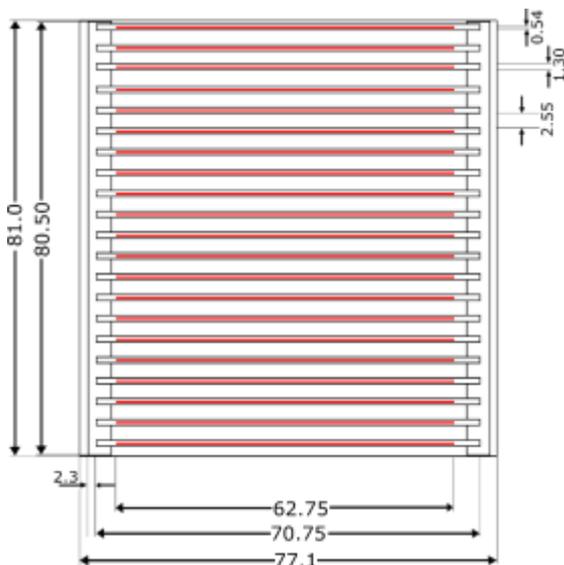
Tabel 4. Komposisi air

| Densitas (g/cm ³) | Komposisi unsur (at%) | |
|-------------------------------|-----------------------|---------|
| | Hidrogen | Oksigen |
| 1 | 2 | 1 |

Tabel 5. Komposisi Berilium[8], [9]

| Densitas (g/cm ³) | Komposisi unsur (wt%) | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------|
| | Berilium assay | Berilium oksida |
| 1,85 | 2 | 1 |

Pertama, pembuatan elemen bakar standar RSG-GAS yang terdiri dari 21 pelat elemen bakar dengan berat sebesar 250 gram untuk U^{235} . Desain elemen bahan bakar standar RSG-GAS ditunjukkan pada Gambar 2.



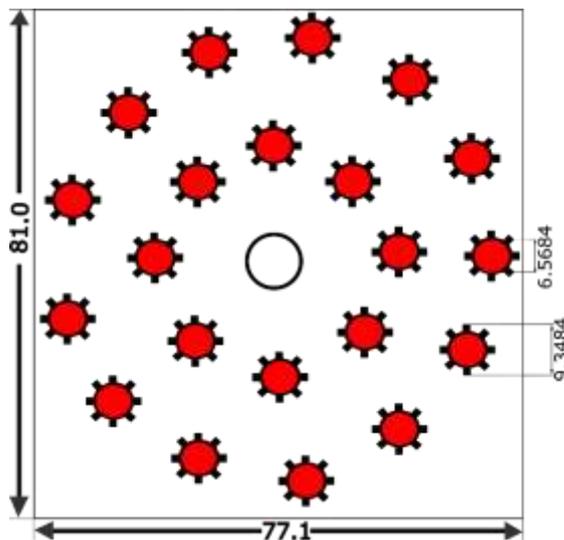
Gambar 2. Elemen Bakar Standar RSG dalam satuan mm [1]

Elemen bakar lainnya didesain dengan mengubah ketebalan atau jarak antar satu bahan bakar dengan bahan bakar yang lainnya sehingga mendapatkan nilai U^{235} yang sama dengan berat U^{235} yang ada pada elemen bakar RSG-GAS. Diperlukan beberapa bahan bakar yang dikumpulkan dalam satu wadah untuk membentuk satu elemen bakar.

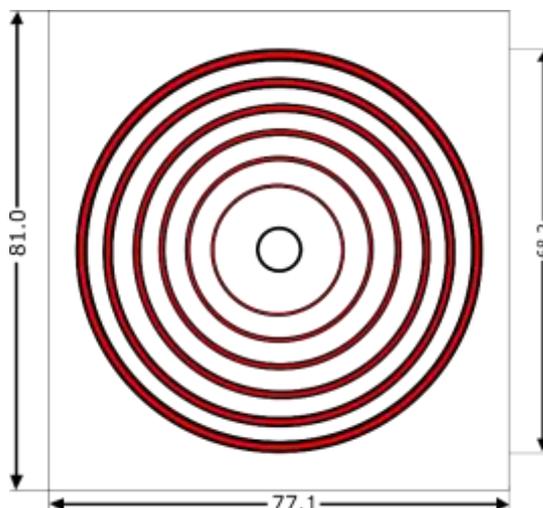
Elemen bakar kedua yang digunakan sebagai pembanding untuk elemen bakar RSG-GAS adalah elemen bakar yang digunakan di reaktor HANARO yang didesain dan dioperasikan oleh Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). Bahan bakar reaktor HANARO ini berbentuk silinder dibungkus dengan kelongsong silinder yang memiliki 8 buah sirip disekitar kelongsong. Kumpulan bahan bakar reaktor ini terdapat dua jenis kumpulan bahan bakar dimana satu elemen bakar membentuk heksagon dan satunya lingkaran. Desain elemen bakar ini mengambil satu bentuk geometri yaitu lingkaran untuk penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.

Elemen bakar ketiga yang digunakan adalah bahan bakar yang digunakan pada reaktor MARIA yang terletak di Polandia.

Bahan bakar ini diproduksi di Rusia dengan meat yang memiliki bentuk silinder dengan dua kelongsong silinder dengan masing-masing tebal 0,6 mm yang membungkus meat setebal 0,875 mm. Untuk elemen bakar MARIA ditunjukkan pada Gambar 4.

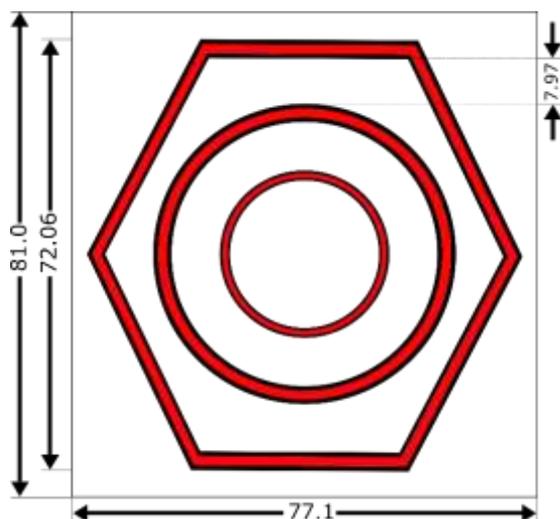


Gambar 3. Elemen Bakar Reaktor HANARO dalam mm [10]



Gambar 4. Elemen Bakar Reaktor MARIA dalam mm [11]

Elemen bakar keempat yang digunakan ialah elemen bakar yang digunakan oleh *Budapest Research Reactor* (BRR) dengan jenis VVR-SM dan VVR-M2 yang diproduksi di Rusia. Elemen bakar ini terdiri dari dua buah bahan bakar berbentuk silinder dan satu buah bahan bakar berbentuk heksagon dengan ketebalan meat sebesar 1,47 mm. Bentuk geometri dari Kumpulan bahan bakar ini ditunjukkan pada Gambar 5.

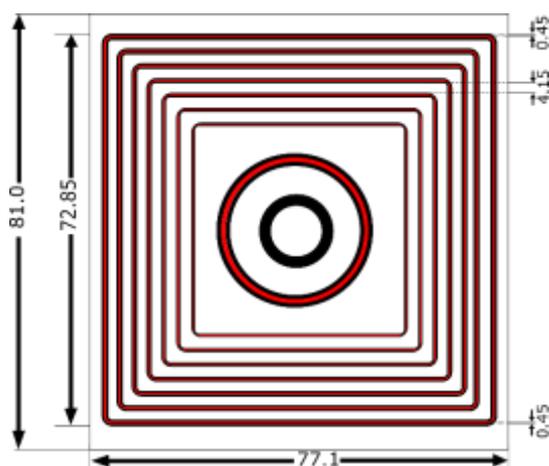


Gambar 5. Elemen Bakar Reaktor Riset Budapest dalam mm [12].

Elemen bakar terakhir yang digunakan adalah elemen bakar yang disebut IRT-4M (*Izluchennaya Reaktornoye Toplivo-4M*) yang juga diproduksi di Rusia. Elemen bakar IRT-4M digunakan di reaktor riset WWR-SM yang terletak di Uzbekistan. Dalam satu elemen bakar IRT-4M ini terdapat satu bahan bakar bentuk silinder dengan tebal

1,03 mm dan dikelilingi beberapa persegi panjang bulat. Desain IRT-4M yang telah disesuaikan ditunjukkan pada Gambar 6.

Pemodelan menggunakan OpenMC untuk setiap elemen bakar diperlukan perhitungan massa uraniumnya terutama U^{235} sehingga mendapatkan massa sebesar 250 gram per elemen bakar untuk kelima elemen bakar. Hasil perhitungan elemen bakar ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 6. Elemen Bakar Reaktor WWR-SM dalam mm [11]

Table 6. Perhitungan Massa U^{235} dalam elemen bakar

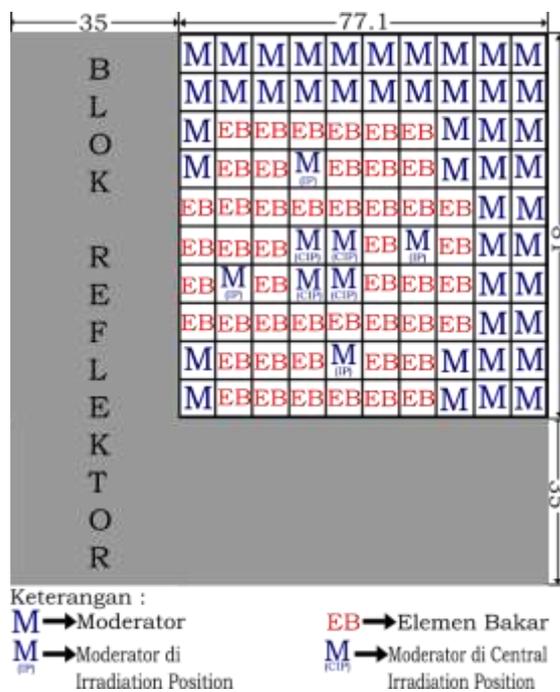
| Bahan Bakar | Pengkayaan (%) | Densitas Uranium (gU/cm ³) | Volume per bahan bakar (cm ³) | Massa U^{235} per bahan bakar (g) | Jumlah bahan bakar/EB | Massa U^{235} /EB (g) |
|-------------|----------------|--|---|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| RSG | 19,75% | 2,96 | 20,331 | 11,8855026 | 21 | 249,59555 |
| HANARI | 19,75% | 2,96 | 20,331 | 11,8855026 | 21 | 249,59555 |
| MARIA | 19,75% | 2,96 | 33,605 | 19,6454830 | | 250,21055 |
| | 19,75% | 2,96 | 48,697 | 28,4682662 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 63,788 | 37,2904648 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 78,88 | 46,1132480 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 93,971 | 54,9354466 | | |
| BRR | 19,75% | 2,96 | 109,062 | 63,7576452 | | 250,5923 |
| | 19,75% | 2,96 | 11,155 | 6,5212130 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 41,823 | 24,4497258 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 47,763 | 27,9222498 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 53,703 | 31,3947738 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 59,643 | 34,8672978 | | |
| BRR | 19,75% | 2,96 | 65,583 | 38,3398218 | | 250,6916 |
| | 19,75% | 2,96 | 71,523 | 41,8123458 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 77,463 | 45,2848698 | | |
| WWR-SM | 19,75% | 2,96 | 69,355 | 40,5449330 | | 250,6916 |
| | 19,75% | 2,96 | 130,315 | 76,1821490 | | |
| | 19,75% | 2,96 | 229,156 | 133,964597 | | |

Hasil perhitungan dari Tabel 6 digunakan untuk mengetahui massa elemen bakar pada OpenMC yang didapatkan dari menghitung volume bahan bakar dikalikan dengan densitas uranium. Nilai densitas U^{235} didapatkan dari densitas uranium keseluruhan dikalikan dengan pengayaan uranium. Pengayaan uranium menunjukkan jumlah *isotope* U^{235} dalam uranium itu sendiri. Untuk volume bahan bakar dari RSG-GAS dan HANARO memiliki volume yang sama sehingga jumlah bahan bakar disesuaikan untuk mencapai massa 250 gram sedangkan bahan bakar dari MARIA, BRR, dan WWR-SM memiliki volume antar bahan bakar dalam satu elemen bakar bervariasi karena penambahan panjang atau diameter bahan bakar sehingga membuat volume juga membesar dengan selisih ketebalan yang sama. Cara perhitungan yang sama dilakukan juga pada bahan bakar lainnya sehingga mendapatkan massa yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Dari kelima elemen bakar diatas kemudian akan dimasukkan kedalam teras kerja (*Typical Working Core*) sehingga akan terdapat 5 teras RSG-GAS dengan elemen bakar yang berbeda-beda. Pada teras RSG-GAS terdiri dari 40 elemen bakar, 8 elemen kendali, dan 8 fasilitas iradiasi dengan ukuran matriks 10 x 10. Untuk penelitian ini hanya berfokus pada elemen bakar sehingga elemen kendali diganti dengan elemen bakar dan untuk fasilitas *Central Irradiation Position* (CIP) & *Irradiation Position* (IP) diisi dengan moderator yang berisi air seperti halnya dengan elemen reflektor dan fasilitas iradiasi lainnya. Blok reflektor yang mengelilingi sisi kiri dan bawah teras terbuat dari berilium dengan penyusunnya terdiri dari berilium assay dan berilium oksida. Pemodelan lengkap desain teras RSG-GAS ditunjukkan pada Gambar 7.

Makalah ini menggunakan teras kerja yang tersusun dari 48 elemen bakar tanpa adanya elemen kendali yang masuk pada teras. Peniadaan elemen kendali pada teras kerja untuk mengetahui pengoperasian reaktor untuk satu siklus operasi dalam keadaan kritis sehingga menghasilkan nilai k_{eff} saat keadaan elemen kendali dinaikkan (*fully up*) dan memenuhi kriteria untuk desain teras RSG-GAS [14]. Pemodelan teras RSG-GAS dengan elemen bakar yang berbeda dibuat dengan ukuran matriks yang sama dengan yang sebenarnya dan untuk beberapa fasilitas

yang diabaikan pada OpenMC diganti dengan moderator berisi air yang berukuran sama dengan elemen bakar bertujuan untuk mengisi bagian yang tidak terisi oleh elemen bakar.



Gambar 7. Pemodelan desain teras dengan blok reflektor dalam satuan mm [13].

Selanjutnya, dalam simulasi OpenMC menggunakan *run_mode* berupa perhitungan *eigenvalue k* untuk mendapatkan nilai k_{eff} . Simulasi dilakukan dengan menggunakan *batches* sebanyak 150 iterasi dengan *generation of batch* sebanyak 2 kali untuk 10.000 partikel yang digunakan dalam setiap iterasi dan *inactive batches* digunakan sebanyak 30 untuk mencegah *tally* mengakumulasi partikel yang belum berada pada distribusi sumber. Penentuan *batches* dan partikel dibuat lebih dari 100 kali iterasi dan partikel berjumlah 10.000 untuk mencegah adanya bias pada nilai k_{eff} dan *tally* serta 2 kali perulangan untuk setiap *batches* dimaksudkan untuk meminimalisir adanya variansi yang tercatat lebih kecil daripada variansi sebenar[15]. Selain untuk mendapatkan nilai k_{eff} , distribusi fluks yang ada pada setiap teras dihitung untuk melihat sebaran fluks selama simulasi berlangsung dan membandingkan dengan antar elemen bakar untuk mengetahui perbedaannya.

Dalam rangka mendapatkan nilai distribusi fluks, diperlukan pengelompokan energi dan identifikasi setiap kisi pada teras kerja. Kelompok energi bertujuan mendapatkan fluks pada rentang energi tertentu dimana partikel berinteraksi dan identifikasi setiap kisi pada teras kerja bertujuan untuk memudahkan dalam menyesuaikan bentuk kisi teras yang sesuai dengan ukuran per elemen penyusun teras tersebut. Untuk kelompok energi, distribusi fluks dihitung berdasarkan 3 grup energi. Pada rentang energi pertama yaitu 0 eV – 0,025 eV merupakan energi termal dimana RSG-GAS beroperasi pada rentang energi ini. Kemudian, rentang energi 0,025 eV – 300 eV termasuk ke dalam energi epitermal dan rentang energi 300 eV – 2×10^6 eV merupakan energi *fast-high*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

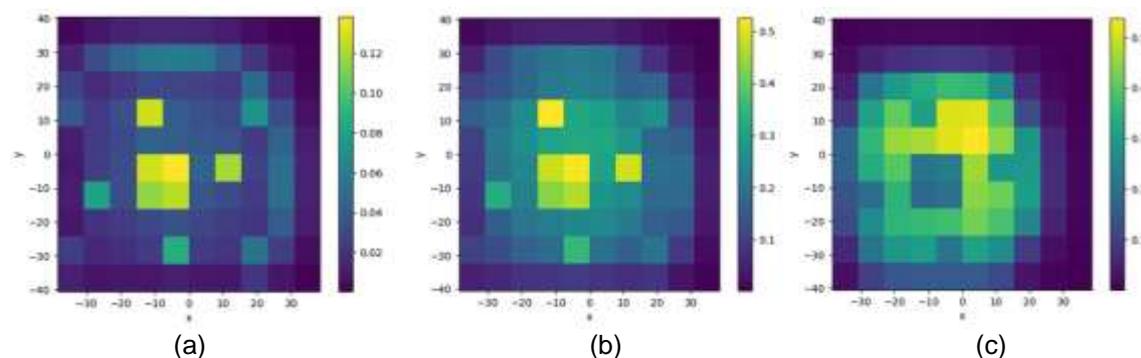
Pemodelan menggunakan OpenMC untuk teras kerja RSG-GAS dengan variasi elemen bakar harus memenuhi kriteria desain teras RSG-GAS yang ada sehingga simulasi pertama yang dilakukan adalah dengan menggunakan elemen bakar dari bahan bakar RSG-GAS sendiri. Hasil simulasi pertama

pada Tabel 7 menunjukkan nilai k_{eff} sebesar 1,10728 dengan dibandingkan dengan nilai k_{eff} untuk memenuhi kriteria desain teras RSG-GAS mendapatkan nilai yang tidak jauh berbeda sehingga pemodelan teras ini dapat dikatakan dapat digunakan walaupun nilai k_{eff} keduanya tidak sama dikarenakan simulasi dengan OpenMC termasuk ke dalam perhitungan yang bersifat probabilitas. Ketidaksesuaian antara nilai k_{eff} hasil dari OpenMC dan referensi ini dapat memengaruhi hasil distribusi fluks yang didapatkan sehingga dapat dilakukan pengamatan pada distribusi fluks untuk setiap teras dengan elemen bakar tertentu.

Tabel 7. Hasil perhitungan k_{eff} elemen bakar RSG-GAS dan referensi[14]

| k_{eff} | k_{eff} referensi |
|-------------------|----------------------------|
| 1,10728 ± 0,00071 | 1,10132 |

Distribusi fluks untuk teras RSG-GAS dapat dilihat pada Gambar 8 yang menunjukkan rentang energi operasi atau energi termal nilai fluks paling besar berada pada CIP dan IP. Hal yang sama juga terjadi pada energi epitermal walaupun terjadi penyusutan nilai fluks.



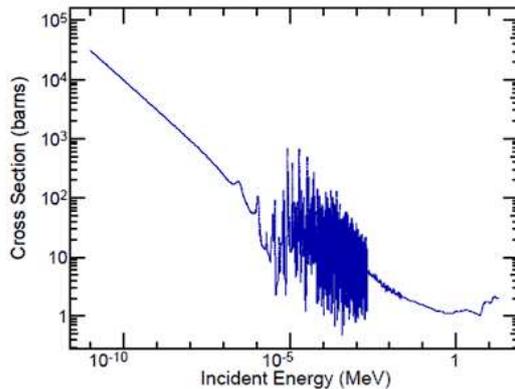
Gambar 8. Distribusi fluks neutron pada rentang energi termal (a); epitermal (b); dan *fast high* (c).

Reaksi fisi yang terjadi pada simulasi ini dipengaruhi oleh tampang lintang nuklir, tampang lintang nuklir adalah kemungkinan terjadinya reaksi nuklir oleh neutron[16]. U^{235} memiliki tampang lintang yang menunjukkan kemungkinan akan terjadinya reaksi fisi akan terjadi saat neutron berada pada energi rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada rentang *fast-high*, neutron memiliki energi yang besar sehingga kemungkinan untuk terjadinya reaksi fisi kecil dan neutron-neutron yang tersebar pada teras tidak banyak berinteraksi dengan elemen bakar yang berisi *isotope* U^{235} menyebabkan nilai

fluks neutron tinggi pada kisi-kisi yang berisi elemen bakar. Untuk memperbesar kemungkinan terjadinya reaksi fisi, neutron diperlambat dengan air ringan yang ada pada teras kerja. Interaksi antara neutron dan air menyebabkan neutron kehilangan energi kinetiknya[16]. Saat neutron mengalami perlambatan pada rentang energi epitermal, terlihat pada CIP dan IP memiliki fluks yang tinggi dibandingkan sebelumnya dan elemen bakar mengalami penurunan nilai fluksnya yang menunjukkan kemungkinan terjadinya fisi lebih besar dibandingkan pada rentang *fast-high*. Kemudian, saat berada dalam

Analisis Pengaruh Geometri *Fuel Assembly* Terhadap Kritikalitas dan Distribusi Fluks Neutron dalam Teras Reaktor RSG-GAS Menggunakan OpenMC (Ibnu Fathan Rastri, Saga Octadamaillah, Sukarman)

rentang energi termal, menunjukkan neutron sudah masuk ke dalam rentang energi yang memilikiampang lintang lebih besar sehingga U^{235} menyerap neutron karena energi neutron sebanding dengan salah satu tingkat energi dalam inti senyawa atau reaksi resonansi[16] dan fluks pada kisi-kisi berisi elemen bakar mengalami penurunan.



Gambar 9. Tampang Lintang Fisi U^{235} [17]

Geometri sebuah elemen bakar terbentuk dengan mempertimbangkan bentuk bahan bakarnya dimana terdapat bahan bakar dengan satu ukuran yang sama memungkinkan untuk dapat disebar pada suatu wadah tanpa satu bahan bakar dengan bahan bakar lainnya tanpa terjadi tumpang tindih seperti bahan bakar pada reaktor RSG-GAS maupun HANARO dan terdapat juga bahan bakar dengan ukuran yang berbeda-beda sehingga saat dikumpulkan dalam satu wadah yang sama akan disusun dengan ukuran yang bervariasi sehingga tidak terjadi tumpang tindih seperti pada elemen bakar pada BRR, WWR-SM, dan MARIA. Jumlah bahan bakar pada satu elemen bahan bakar dapat disesuaikan salah satunya dengan mencapai massa tertentu dari U^{235} dan U^{238} dalam satu elemen bakar atau kumpulan bahan bakar. Simulasi untuk teras kerja RSG-GAS dengan elemen bakar lainnya dapat dilakukan untuk melihat nilai k_{eff} dan kemudian dapat melihat distribusinya pada Tabel 8 dan 9.

Tabel 8. Hasil perhitungan k_{eff} setiap elemen bakar

| Bahan bakar | k_{eff} |
|-------------|---------------------|
| RSG-GAS | 1,10728 +/- 0,00071 |
| HANARO | 1,10804 +/- 0,00066 |
| MARIA | 1,04883 +/- 0,00076 |
| BRR | 1,03940 +/- 0,00066 |
| WWR-SM | 1,00444 +/- 0,00058 |

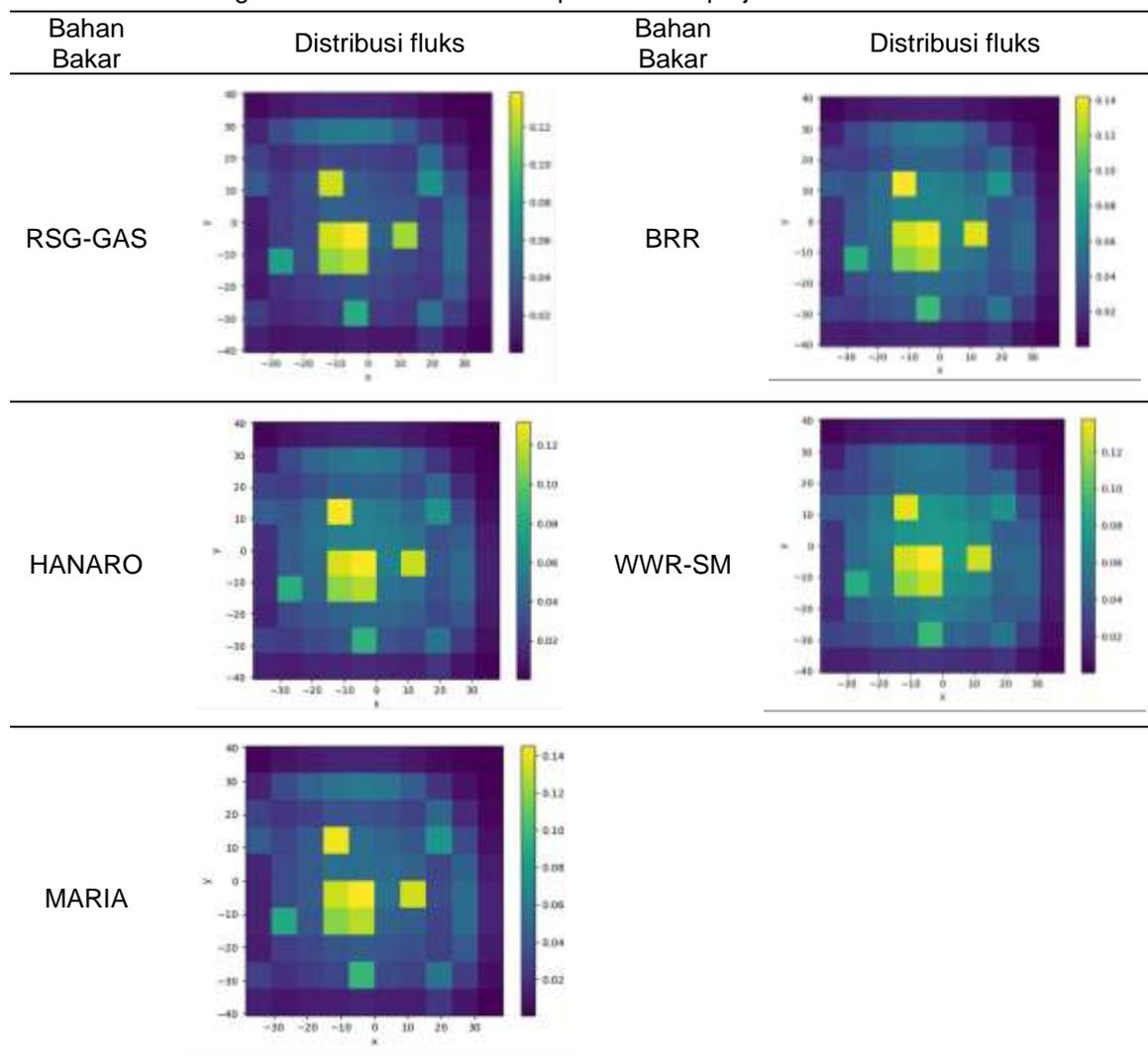
Hasil perhitungan k_{eff} untuk setiap teras dengan elemen bakar lainnya mendapatkan nilai yang bervariasi. Untuk elemen bakar yang berasal dari reaktor HANARO didapatkan nilai yang hampir sama dengan RSG-GAS yaitu sebesar 1,10804. Elemen bakar dari reaktor MARIA didapatkan hasil sebesar 1,04883, kemudian dari reaktor Budapest mendapatkan nilai 1,03940 untuk k_{eff} -nya. Terakhir, elemen bakar dari WWR-SM memiliki nilai k_{eff} sebesar 1,00444 yang merupakan nilai terendah dari kelima elemen bakar. Dari nilai kritikalitas keempat elemen bakar tersebut, semua teras berada dalam kondisi kritis untuk elemen kendali diangkat keatas sehingga saat elemen kendali dimasukkan ke dalam teras akan menurunkan nilai kritikalitas sekarang yang membuat elemen bakar dari reaktor riset Budapest tidak mencapai kondisi kritis. Nilai kritikalitas untuk keadaan saat ini sudah cukup untuk mengetahui adanya perbedaan nilai kritikalitas yang didapatkan dengan geometri dari elemen bakar yang divariasikan ini.

Pada Tabel 8 menampilkan nilai k_{eff} setiap elemen bakar saat dimasukkan ke dalam teras yang sama. Kelima elemen bakar tersebut didapatkan nilai k_{eff} paling tinggi didapatkan oleh elemen bakar dari HANARO sedangkan k_{eff} paling rendah oleh elemen bakar dari WWR-SM. Selain perbedaan pada bentuk geometri, ketebalan dari *meat* masing-masing elemen bakar. Pada elemen bakar dari HANARO, ketebalan *meat* lebih tebal dibandingkan dengan elemen bakar lainnya. Jumlah bahan bakarnya juga paling banyak, sama seperti dengan RSG-GAS. Hal ini memengaruhi nilai k_{eff} menjadi paling tinggi dengan kritikalitasnya masih sesuai dengan kriteria desain teras RSG-GAS karena massa $U-235$ dibatasi hanya 250 gram. Ketebalan *meat* yang paling kecil adalah WWR-SM, walaupun jumlah bahan bakarnya bukan yang paling sedikit. Hal ini menunjukkan bahwa elemen bakar dengan massa U^{235} yang disamakan akan memengaruhi ketebalan dari *meat* untuk mencapai kesamaan massa tersebut. Teras yang diisi dengan kelima elemen bakar mencapai kondisi kritis dalam keadaan elemen kendali *fully up*. Dengan demikian, reaktor dapat beroperasi untuk satu siklus operasi dan juga akan memengaruhi umur dari teras dengan elemen bakar tertentu [14]. Sebagai contoh, elemen bakar dari RSG-GAS dan HANARO akan memiliki umur teras yang lebih lama dibandingkan dengan

elemen bakar yang nilai k_{eff} dibawah kedua elemen bakar tersebut. Pada Tabel 10 menunjukkan distribusi fluks teras dengan elemen bahan bakar berbeda-beda. Nilai fluks yang ditunjukkan pada penelitian ini tidak perlu dilakukan konversi menjadi satuan

sebenarnya dimana satuan yang digunakan masih dalam bentuk partikel-cm/sumber karena hanya sebatas melihat distribusi fluks pada setiap kisi yang ada pada teras kerja reaktor.

Tabel 9. Perbandingan distribusi fluks neutron pada beberapa jenis bahan bakar nuklir.



Interaksi yang terjadi antara neutron dengan elemen bakar atau moderator (CIP dan IP) diindikasikan dengan penunjukkan nilai fluks yang rendah, sedangkan untuk menunjukkan tidak adanya interaksi yang terjadi akan membuat nilai fluks akan tinggi. Untuk distribusi fluks kelimanya sama-sama memiliki nilai fluks yang besar pada CIP dan IP dibandingkan dengan kisi yang berisi elemen bakar. RSG-GAS didesain untuk kegiatan iradiasi sehingga terdapat fasilitas-fasilitas iradiasinya seperti CIP dan IP[18].

Pada elemen bakar RSG-GAS dan WWR-SM, fluks tertingginya hanya berada pada CIP sedangkan untuk ketiga lainnya fluks tertinggi berada pada CIP dan dua IP. Perbedaan lain yang dapat dilihat adalah pada MARIA dan BRR memiliki nilai fluks maksimal yang lebih besar dari yang lainnya. Kelima distribusi fluks yang ada pada Tabel 10 menggunakan rentang energi termal karena reaksi berantai fisi dipertahankan oleh neutron dengan energi rendah [16]. Untuk keperluan iradiasi, fasilitas iradiasi CIP dan IP harus memiliki nilai fluks

Analisis Pengaruh Geometri *Fuel Assembly* Terhadap Kritikalitas dan Distribusi Fluks Neutron dalam Teras Reaktor RSG-GAS Menggunakan OpenMC (Ibnu Fathan Rastri, Saga Octadamailah, Sukarman)

yang tinggi dan nilai fluks pada teras dengan elemen bakar RSG-GAS dijadikan sebagai acuan. Pada teras dengan elemen bakar MARIA dan BRR terlihat memiliki nilai fluks maksimal untuk CIP dan IP lebih tinggi dibandingkan dengan fluks pada elemen bakar yang lainnya, dimana memiliki nilai fluks yang lebih rendah pada CIP dan IP. Kisi-kisi yang berisi elemen bakar pada teras kerja akan memiliki nilai fluks yang rendah sehingga semakin rendah atau gelap warna dari kisi tersebut menunjukkan bahwa kemungkinan terjadi reaksi fisi paling besar karena neutron akan berinteraksi dan tidak berpindah-pindah ke kisi yang lainnya.

KESIMPULAN

Pemodelan teras RSG-GAS dengan elemen bakarnya menggunakan OpenMC telah memenuhi kriteria desain teras yang optimal dengan distribusi fluks terbaik berada pada energi termal. Pengamatan terhadap pengaruh geometri elemen bakar yang berbeda terhadap nilai kritikalitas dan distribusi fluks neutron dalam satu teras yang sama dengan fokus utama pada RSG-GAS, menunjukkan bahwa bentuk geometri elemen bakar yang berbeda memiliki dampak signifikan pada nilai kritikalitas dan distribusi fluks. Nilai kritikalitas tertinggi diperoleh dari elemen bakar HANARO, diikuti oleh RSG-GAS, sementara elemen bakar WWR-SM menunjukkan nilai kritikalitas terendah. Distribusi fluks pada elemen bakar dari MARIA dan BRR menunjukkan distribusi fluks yang lebih baik dibandingkan dengan elemen bakar lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Purwadi, "Karakteristik teras RSG-GAS dengan bakar bakar silisida," *Buletin Ilmiah Sigma Epsilon*, 2017.
- [2] T. Surbakti dan T. M. Sembiring, "Analisis neutronik teras RSG-GAS berbahan bakar silisida," *KFI Vol. 12 No. 3 2001*, 2001.
- [3] T. Surbakti, S. Pinem, T. M. Sembiring, L. Suparlina, and J. Susilo, "Desain konseptual teras reaktor riset inovatif berbahan bakar uranium-molibdenum dari aspek neutronik," *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, 2012.
- [4] A. H. Alnahdi, A. A. Alghamdi, and A. I. Almarshad, "Investigation of the fuel shape impact on the MTR reactor parameters using the OpenMC code," *Processes*, vol. 11, no. 2, p. 637, Feb. 2023.
- [5] S. Octadamailah and Supardjo, "Pengaruh densitas uranium terhadap umur bahan bakar nuklir di dalam reaktor rsg-gas ditinjau dari aspek neutronik," *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 23, no. 2, Aug. 2017.
- [6] P. K. Romano, N. E. Horelik, B. R. Herman, A. G. Nelson, B. Forget, and K. Smith, "OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 82, pp. 90–97, Aug. 2015.
- [7] S. Tukiran, P. Surian, and P. Endiah, "The effect of adding impurities to the high density fuel matrix on the reactivity of the RSG-GAS core," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2193, no. 1, p. 012003, Feb. 2022.
- [8] *Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry*, no. v. 58. Geneva: IARC, World Health Organization, 1993.
- [9] J. Sukmana, J. AK, and I. S. Suwanto, "Analisis iradiasi berilium di teras rsg-gas menggunakan program ORIGEN2," *Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir Tahun 2012*, 2012.
- [10] H. Chae, C. S. Lee, J. M. Park, H. Kim, and Y. S. Kim, "Performance of U3Si–Al dispersion fuel at HANARO full-power condition," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 50, no. 6, pp. 899–906, Aug. 2018.
- [11] P. L. Garner and N. A. Hanan, "Transient analysis for the tajoura critical facility with IRT-2M HEU fuel and IRT-4M leu fuel: ANL independent verification results." *Office of Scientific and Technical Information (OSTI)*, 2005.
- [12] R. B. Pond, N. A. Hanan, J. E. Matos, and C. Maraczy, "A neutronic feasibility study for leu conversion of the budapest research reactor," *Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, 1998.
- [13] S. Pinem, W. Luthfi, P. H. Liem, and D. Hartanto, "Evaluation of neutronics parameters during RSG-GAS commissioning by using Monte Carlo code," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 55, no. 5, pp. 1775–1782, May 2023.

-
- [14] T. Surbakti and P. Purwadi, "Karakteristik reaktivitas teras kerja RSG-GAS selama 30 tahun beroperasi," *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, vol. 7, no. 1, p. 13, Jun. 2017.
- [15] F. Brown, "A review of best practices for monte carlo criticality calculations," *American Nuclear Society 2009 Nuclear Criticality Safety Topical Meeting*, 2009.
- [16] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, *Nuclear reactor analysis*. New York [u.a.]: Wiley, 1976.
- [17] A. V. K. Colton, "Improved 3D modelling of CANDU reactors using transport-fitted diffusion coefficients," 2016.
- [18] N. Luhur, Subiharto, F. A. Muslimu, and U. Hartoyo, "Evaluasi keselamatan radiasi di fasilitas rabbit system RSG-GAS," *Prosiding Seminar Penelitian Danpengelolaan Perangkat Nuklir*, 2013.