

# Urania

## Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

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



### ANALISIS KRITIKALITAS PROSES *HYDRIDING* SERTA PENYIMPANAN PADUAN $U_{Mo}$ DAN $U_{Zr}$ SEBAGAI KANDIDAT BAHAN BAKAR REAKTOR RISET MENGGUNAKAN OPENMC

Saga Octadamailah<sup>1</sup>, Anissa Isnaini<sup>1</sup>, Rohmad Sigit<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN  
K.S.T. B.J. Habibie, Gedung 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, 15314  
e-mail: [saga001@brin.go.id](mailto:saga001@brin.go.id)

(Naskah diterima: 26–02–2023, Naskah direvisi: 20–03–2023, Naskah disetujui: 30–03–2023)

#### ABSTRAK

#### ANALISIS KRITIKALITAS PROSES *HYDRIDING* SERTA PENYIMPANAN PADUAN $U_{Mo}$ DAN $U_{Zr}$ SEBAGAI KANDIDAT BAHAN BAKAR REAKTOR RISET MENGGUNAKAN OPENMC.

Penelitian bahan bakar reaktor riset saat ini mengarah pada peningkatan densitas uranium untuk menghasilkan fluks neutron yang lebih tinggi dalam rangka peningkatan produksi radioisotop serta efisiensi dan akurasi pada berbagai pengujian material. Pengembangan bahan bakar nuklir di Indonesia saat ini dalam rangka peningkatan densitas uranium salah satunya adalah pengembangan  $U_{Mo}$  dan  $U_{Zr}$ . Salah satu proses pembuatan serbuk  $U_{Mo}$  dan  $U_{Zr}$  adalah melalui proses *hydriding-dehydriding* yang melibatkan uranium diperkaya, serta gas hidrogen bertekanan tinggi. Kombinasi tersebut menghadirkan potensi kecelakaan kritikalitas yang harus diperhitungkan sebelumnya. Perhitungan kritikalitas dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenMC, yaitu sebuah simulasi fisika nuklir yang menggunakan metode Monte Carlo. Dalam simulasi ini digunakan dua jenis paduan, yaitu  $U_{7Mo}$  dan  $U_{6Zr}$ . Simulasi dilakukan dengan menggunakan 10.000 partikel dan 44 *batch* sebagai pengaturan parameter. Dari hasil simulasi diperoleh nilai  $k_{eff}$  untuk paduan  $U_{7Mo}$  adalah sebesar 0,0297, sedangkan untuk  $U_{6Zr}$  adalah sebesar 0,0314. Kedua nilai tersebut jauh di bawah nilai kritis yang mengindikasikan bahwa potensi kecelakaan kritikalitas sangat rendah. Pada simulasi penyimpanan hasil proses hidriding, terdapat potensi terjadi kecelakaan kritikalitas jika botol penyimpanan diletakkan dalam posisi berdekatan tanpa diberi jarak. Untuk mengatasi risiko tersebut, setiap botol harus diberi jarak aman dan perlu adanya batasan massa uranium per satuan volume yang diijinkan.

**Kata kunci:**  $U_{7Mo}$ ,  $U_{6Zr}$ , kritikalitas, *hydriding*, monte carlo, openMC.

**ABSTRACT****CRITICALITY ANALYSIS OF HYDRIDING PROCESSES AND STORAGE MANAGEMENT OF UMo AND Uzr ALLOY AS RESEARCH REACTOR FUEL CANDIDATES USING OPENMC.**

Current research on research reactor fuel is focused at increasing uranium density to produce higher neutron flux in order to increase radioisotope production as well as efficiency and accuracy in various material tests. Research and developments of nuclear fuel in Indonesia in order to increase uranium density is the development of UMo and Uzr. One of the processes for making UMo and Uzr powder is through a hydriding-dehydriding process which involves enriched uranium, and high pressure hydrogen gas. This combination presents the potential for criticality accidents that must be anticipated. Criticality calculations were carried out using OpenMC software, which is a nuclear physics simulation that uses the Monte Carlo method. In this simulation, two types of alloys are used, namely U7Mo and U6Zr. Simulations were carried out using 10,000 particles and 44 batches as parameter settings. From the simulation results, the  $k_{eff}$  value for the U7Mo and U6Zr alloy are 0.0297 and 0.0314, respectively. Both values are far below the critical value, indicating that the potential for criticality accidents is very low. In the storage simulation of hydriding products, there is the potential for criticality accidents if the storage bottles are placed close together without any distance. To anticipate this risk, each bottle must be given a safe distance and there needs to be a limit on the permitted mass of uranium per unit volume.

**Keywords:** U7Mo, U6Zr, criticality, hydriding, monte carlo, openMC.

Analisis Kritikalitas Proses *Hydriding* Serta Penyimpanan Paduan U7Mo dan U6Zr Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset Menggunakan OpenMC (Saga Octadamailah, Anissa Isnaini, Rohmad Sigit)

## PENDAHULUAN

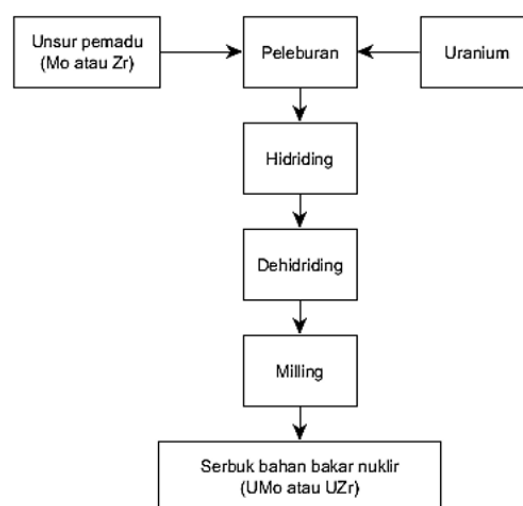
Penelitian bahan bakar reaktor riset saat ini cenderung mengarah pada peningkatan densitas uranium di dalam bahan bakar yang salah satu tujuan utamanya adalah menghasilkan fluks neutron yang lebih tinggi[1]-[2]. Fluks neutron yang tinggi merupakan faktor kritis dalam penggunaan reaktor riset. Tingginya nilai fluks neutron memungkinkan potensi peningkatan produksi radioisotop serta efisiensi dan akurasi pada berbagai pengujian material, sehingga dapat lebih berkontribusi pada perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di berbagai bidang, termasuk kedokteran, industri, dan penelitian ilmiah[3].

Salah satu reaktor riset yang dimiliki oleh Indonesia saat ini adalah Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) yang berada di Kawasan Sains dan Teknologi (KST) B.J. Habibie Serpong. Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy dimanfaatkan untuk banyak tujuan, diantaranya adalah produksi radioisotop, iradiasi material, pengujian berbasis neutron dan beberapa kegiatan litbang lainnya termasuk bahan bakar nuklir. Bahan bakar yang digunakan oleh RSG-GAS saat ini adalah bahan bakar silisida  $U_3Si_2$  yang terdispersi dalam matriks Al dengan densitas 2,96  $gU/cm^3$ . Dalam upaya peningkatan unjuk kerja dan keekonomian bahan bakar reaktor riset, pengembangan bahan bakar silisida  $U_3Si_2/Al$  telah mencapai densitas 4,8 dan 5,2  $gU/cm^3$ . Bahan bakar  $U_3Si_2/Al$  densitas 4,8  $gU/cm^3$  telah memasuki tahapan uji pascairadiasi dengan hasil evaluasi yang cukup baik [4]-[8].

Selain bahan bakar silisida, bahan bakar nuklir untuk reaktor riset yang potensial dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan peningkatan densitas uranium antara lain UMo dan UZr. Berdasarkan beberapa data penelitian, kedua jenis bahan bakar tersebut memberikan potensi peningkatan densitas uranium hingga mencapai 7  $gU/cm^3$ , memiliki sifat fisika dan sifat mekanik yang baik serta menunjukkan stabilitas dan performa yang baik di dalam teras reaktor [9]-[12].

Meskipun paduan UMo atau UZr menawarkan densitas yang lebih tinggi, proses manufaktur serbuk bahan bakar paduan tersebut memiliki tantangan. Paduan UMo dan UZr hasil peleburan cenderung bersifat ulet, sehingga tidak dapat menggunakan metode *grinding* untuk

memperoleh serbuk. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk membuat serbuk bahan bakar adalah proses *hydriding-dehydriding*. Proses tersebut berdasarkan pada kemampuan fasa U- $\alpha$  untuk membentuk  $UH_3$  pada atmosfer hidrogen.  $UH_3$  adalah sebuah senyawa yang bersifat getas dan memiliki densitas relatif rendah[13]. Terbentuknya senyawa  $UH_3$  yang bersifat rapuh memungkinkan untuk membentuk paduan UMo dan UZr menjadi serbuk. Proses pembuatan serbuk untuk paduan UMo dan UZr menggunakan metode hidriding ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir proses pembuatan serbuk paduan UMo dan UZr.

Fasilitas fabrikasi bahan bakar uranium harus memenuhi beberapa syarat termasuk mempertahankan material fisil dalam keadaan subkritis [14]. Oleh karena itu, pada pembuatan paduan UMo dan UZr melalui proses hidriding perlu dilakukan perhitungan nilai kritikalitasnya. Nilai kritikalitas merupakan perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan suatu generasi dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya [15]. Kritikalitas dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya bentuk dan dimensi peralatan yang berisi bahan bakar nuklir, konsentrasi bahan bakar nuklir dalam larutan, massa dan komposisi isotop bahan bakar nuklir, dan sifat fisik dan kimia bahan bakar nuklir [16].

Faktor yang harus diperhatikan pada pembuatan serbuk melalui proses hidriding adalah penggunaan uranium pengkayaan sebesar 19,75% dalam paduan UMo dan UZr. Peningkatan pengkayaan uranium

berpotensi menyebabkan terjadinya kecelakaan kritikalitas, yaitu kondisi ketika reaksi fisi berantai terjadi dengan cepat dan tidak terkendali. Kritikalitas tidak terkontrol dapat menghasilkan jumlah energi terutama dalam bentuk panas yang besar pelepasan radiasi, dan pelepasan gas fisi[17]. Hal tersebut dapat membahayakan keselamatan manusia dan lingkungan. Selain itu, dalam proses hidriding tersebut, bahan bakar dipanaskan dalam suasana gas hidrogen bertekanan. Hidrogen merupakan unsur moderator yang baik, yang dapat memperlambat neutron dan berpotensi meningkatkan probabilitas terjadinya reaksi fisi sehingga berpengaruh pada kritikalitas[18]. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya-upaya untuk mencegah terjadinya kecelakaan kritikalitas nuklir dan memastikan keselamatan selama proses hidriding dan selama penggunaan bahan bakar nuklir tersebut.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan parameter keselamatan kritikal pada fabrikasi dan penyimpanan serbuk UMo dan UZr melalui proses hidriding. Parameter-parameter ini disebut dengan faktor pengendalian kritikalitas yang dapat membantu untuk memahami keselamatan kritikalitas[19]. Penentuan parameter keselamatan kritikalitas dapat dilakukan dengan perhitungan menggunakan perangkat lunak seperti kode OpenMC. Dengan menggunakan metode Monte Carlo, OpenMC dapat memprediksi perilaku neutron dalam reaktor dan mengidentifikasi potensi risiko terjadinya kecelakaan kritikalitas. Dengan demikian, simulasi ini memungkinkan penilaian risiko yang tepat dan desain bahan bakar nuklir yang lebih aman.

## METODOLOGI

OpenMC merupakan perangkat lunak simulasi fisika nuklir yang bersifat *open-source* dan menerapkan metode Monte Carlo dalam perhitungan kritikalitas. Metode ini mengandalkan pendekatan probabilistik dengan menggunakan sampel acak. Dengan mengidentifikasi model geometri sistem nuklir dan menentukan sifat fisika materi dan neutron, OpenMC dapat melakukan simulasi interaksi neutron dengan materi secara realistis. Melalui iterasi sejumlah besar neutron, parameter kritikalitas seperti reaktivitas efektif ( $k_{\text{eff}}$ ) dapat dihitung,

memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang performa sistem nuklir dalam mendukung reaksi nuklir berantai.

### a. Deskripsi bahan dan alat yang digunakan pada proses hidriding

Bahan nuklir yang digunakan dalam perhitungan adalah paduan U7Mo dan U6Zr dengan densitas  $7,0 \text{ g/cm}^3$ . Komposisi masing-masing bahan ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Komposisi paduan U7Mo dan U6Zr.

	Unsur	U	Mo	Mix
U7Mo	Komposisi (%)	93	7	100
	Densitas ( $\text{g/cm}^3$ )	19,10	10,28	18,48
	Unsur	U	Zr	Mix
U6Zr	Komposisi (%)	94	6	100
	Densitas ( $\text{g/cm}^3$ )	19,10	6,49	18,34

Proses hidriding menggunakan wadah sampel dan tabung retort yang terbuat dari kaca pyrex. Spesifikasi kaca pyrex yang digunakan dalam perhitungan ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Komposisi material kaca Pyrex.

Unsur	Komposisi
B	4,0062%
O	53,9562%
Na	2,8191%
Al	1,1644%
Si	3,7722%
K	0,3321%

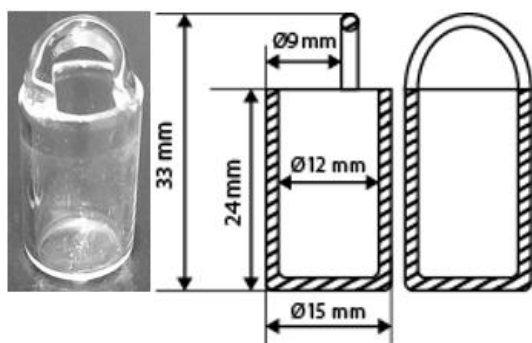
Untuk mendapatkan material yang rapuh, paduan direaksikan dengan gas hidrogen. Selama proses hidriding, gas hidrogen dimasukkan ke dalam tabung retort yang sudah diisi dengan paduan U7Mo atau U6Zr. Untuk mempercepat reaksi, tekanan gas hidrogen yang diberikan adalah 1400 mBar.

### b. Pembuatan model geometri

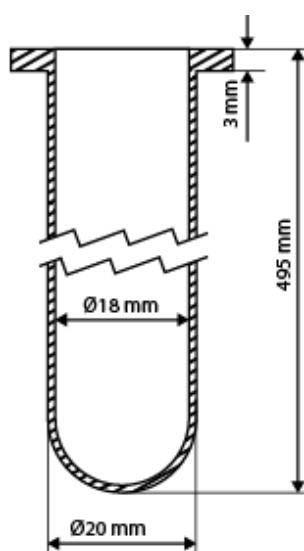
Model geometri dibuat menggunakan bahasa pemrograman Python. Terdapat dua model geometri yang akan dibuat, yaitu geometri untuk wadah sampel dan tabung retort. Geometri wadah sampel ditunjukkan pada Gambar 2 dan untuk geometri tabung retort ditunjukkan pada Gambar 3. Wadah

Analisis Kritikalitas Proses *Hydriding* Serta Penyimpanan Paduan U7Mo dan U6Zr Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset Menggunakan OpenMC (Saga Octadamailah, Anissa Isnaini, Rohmad Sigit)

sampel digunakan sebagai tempat paduan pejal yang ingin dirapuhkan sekaligus memudahkan masuknya sampel ke dalam tabung retort. Penggunaan wadah sampel adalah menghindari risiko kontak langsung antara paduan pejal dengan tabung retort.



Gambar 2. Geometri wadah sampel.



Gambar 3. Geometri tabung retort.

Tabung retort memiliki panjang 495 mm, sementara wadah sampel memiliki panjang 33 mm. Hal ini memungkinkan tabung retort dapat diisi dengan beberapa wadah sampel secara berurutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada pelaksanaan proses hidriding, seringkali tabung retort diisi dengan 2-3 sampel sekaligus. Namun dalam simulasi ini, jumlah sampel yang dimasukkan ke dalam tabung retort akan divariasikan dari 1 hingga maksimal 14 buah. Variasi jumlah sampel dilakukan untuk melihat pengaruh jumlah sampel terhadap perubahan tingkat kritikalitas dan perilaku neutron dalam tabung retort.



Gambar 4. Hasil hidriding paduan uranium.

Pada pelaksanaan proses hidriding, seringkali tabung retort diisi dengan 2-3 sampel sekaligus. Namun dalam simulasi ini, jumlah sampel yang dimasukkan ke dalam tabung retort akan divariasikan dari 1 hingga maksimal 14 buah. Variasi jumlah sampel dilakukan untuk melihat pengaruh jumlah sampel terhadap perubahan tingkat kritikalitas dan perilaku neutron dalam tabung retort.

### c. Penentuan parameter simulasi OpenMC

Dalam perhitungan OpenMC, pendekatan yang digunakan adalah probabilistik, sehingga hasilnya dipengaruhi oleh beberapa parameter simulasi. Parameter-parameter ini termasuk jumlah partikel neutron yang digunakan dalam simulasi, jumlah generasi dari setiap *batch*, jumlah *batch* yang digunakan, dan jumlah *batch* yang dikecualikan dari perhitungan statistik.

Pada awal generasi partikel, posisi neutron di dalam sistem cenderung belum homogen karena distribusi partikel masih berfluktuasi. Karena kondisi ini, perhitungan statistik belum dilakukan pada tahap awal, namun penting untuk mencatat posisi neutron di dalam sistem saat itu untuk penggunaan pada tahap selanjutnya. Kondisi homogenisasi tercapai setelah beberapa generasi, di mana distribusi partikel menjadi lebih stabil dan representatif. Pada tahap ini, perhitungan statistik dapat dilakukan dengan lebih akurat dan hasil perhitungan menjadi lebih dapat diandalkan.

Dengan memahami dan mengatur parameter-parameter simulasi ini dengan bijak, akurasi hasil perhitungan OpenMC dapat ditingkatkan dan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang perilaku neutron di dalam sistem yang sedang disimulasikan.

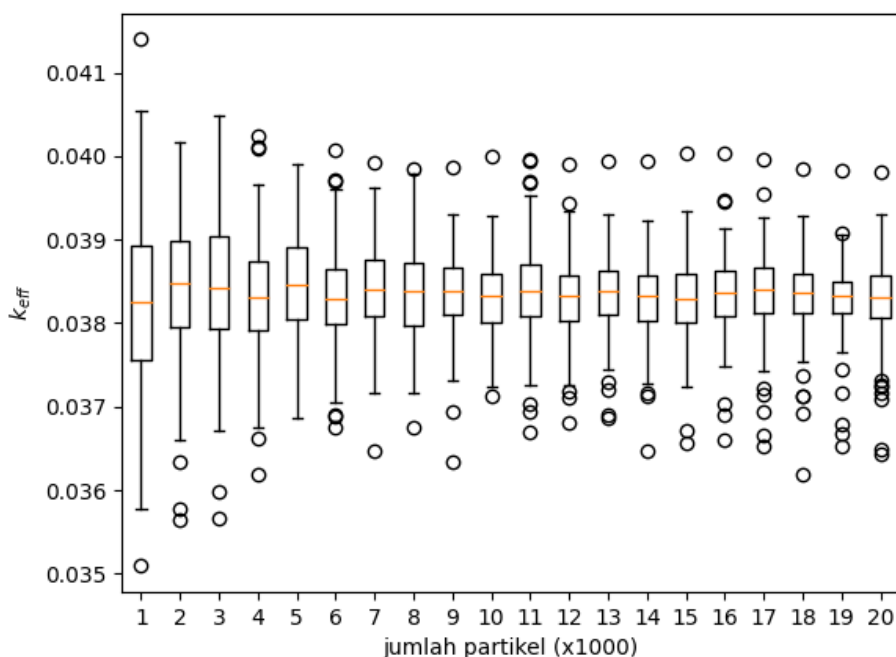
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan nilai  $k_{eff}$  dengan variasi jumlah partikel dengan kelipatan 1000, mulai dari 1000 hingga 20000 partikel ditunjukkan pada Gambar 5 berikut. Pada tahap awal perhitungan, jumlah *batch* yang digunakan adalah sebanyak 40 dengan jumlah generasi dalam setiap *batch* sebesar 5 generasi. Hal ini berarti terdapat 200 siklus yang dihitung.

Data hasil perhitungan nilai  $k_{eff}$  yang terdapat dalam Gambar 5 dipresentasikan dalam bentuk diagram kotak garis (*box plot*) untuk memfasilitasi pemahaman lebih mendalam mengenai variasi data. Melalui

diagram tersebut, dapat diamati bahwa seiring dengan peningkatan jumlah partikel dalam simulasi, ukuran kotak dan panjang garis dalam diagram cenderung mengecil. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan jumlah partikel secara umum dapat mengurangi deviasi nilai hasil perhitungan.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, OpenMC menggunakan perhitungan dengan metode Monte Carlo, di mana sampel acak digunakan untuk memodelkan perilaku neutron dalam sistem nuklir. Distribusi normal yang terlihat pada diagram kotak garis menandakan bahwa sampel tersebut teracak dengan baik dan tidak memiliki kecenderungan nilai tertentu. Distribusi normal menunjukkan kehandalan metode simulasi yang digunakan. Hal ini memberikan keyakinan bahwa hasil perhitungan yang diperoleh adalah representatif dari perilaku sebenarnya dalam sistem nuklir yang sedang disimulasikan.

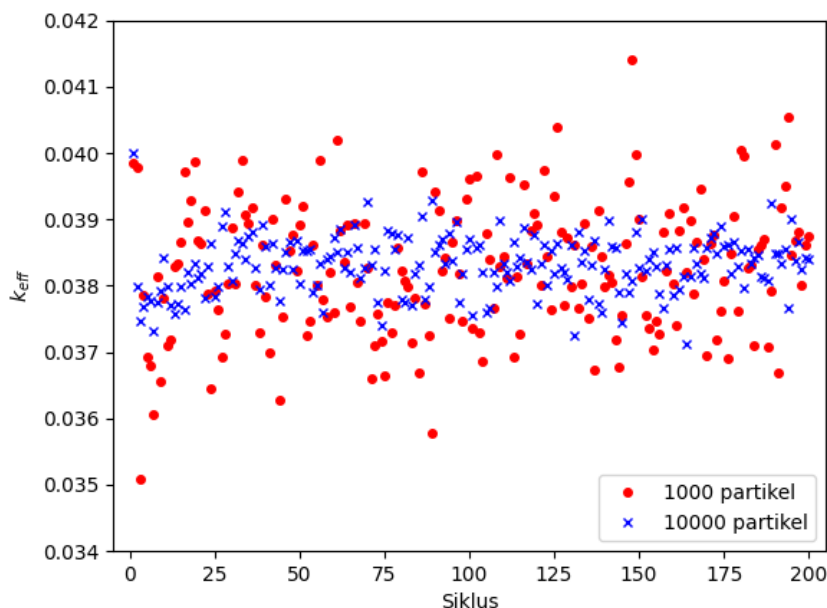


Gambar 5. Grafik nilai  $k_{eff}$  terhadap jumlah partikel

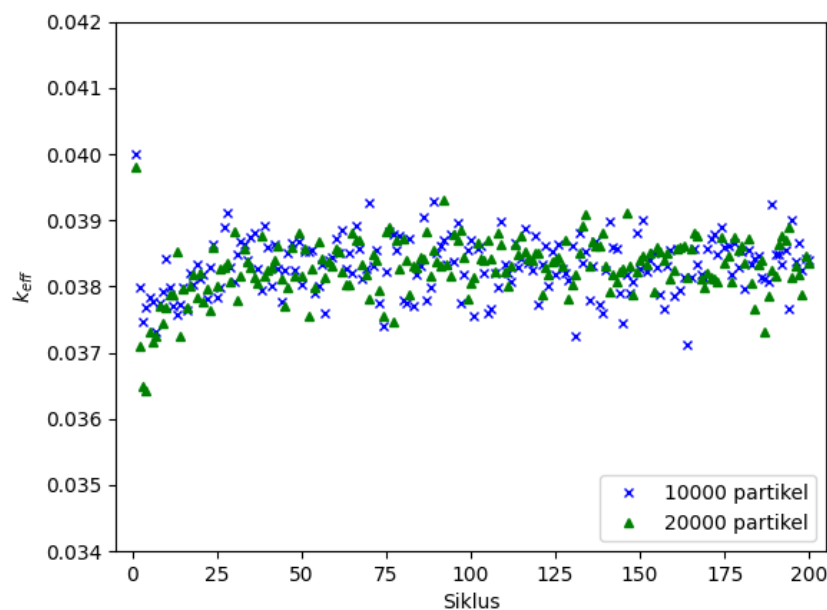
Pada perhitungan dengan jumlah partikel lebih besar atau sama dengan 9000, perubahan nilai deviasi tidak begitu signifikan. Untuk mendapatkan perspektif yang lebih rinci, dilakukan perbandingan data hasil perhitungan pada tiga kasus, yaitu dengan jumlah partikel 1000, 10000, dan

20000. Perbandingan hasil perhitungan untuk jumlah partikel 1000 dan 10000 ditunjukkan pada Gambar 6, sedangkan perbandingan hasil perhitungan  $k_{eff}$  untuk jumlah partikel 10000 dan 20000 ditunjukkan pada Gambar 7.

Analisis Kritikalitas Proses *Hydriding* Serta Penyimpanan Paduan U7Mo dan U6Zr Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset Menggunakan OpenMC (Saga Octadamailah, Anissa Isnaini, Rohmad Sigit)



Gambar 6. Perbandingan nilai  $k_{eff}$  antara 1000 partikel dan 10000 partikel.



Gambar 7. Perbandingan nilai  $k_{eff}$  antara 10000 partikel dan 20000 partikel

Pada Gambar 6 terlihat bahwa sebaran nilai  $k_{eff}$  yang dihasilkan menggunakan 1000 partikel memiliki rentang yang lebih besar jika dibandingkan dengan simulasi menggunakan 10000 partikel. Ini menunjukkan bahwa dengan jumlah partikel yang lebih tinggi, variasi hasil perhitungan menjadi lebih kecil dan dapat menurunkan nilai deviasi. Namun, pada Gambar 7, sebaran nilai  $k_{eff}$  antara simulasi dengan 10000 partikel dan 20000 partikel tidak

menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan jumlah partikel lebih dari 10000 tidak memberikan dampak yang cukup signifikan untuk menurunkan deviasi nilai  $k_{eff}$ . Sebaliknya, penambahan jumlah partikel yang lebih tinggi justru berpotensi meningkatkan waktu simulasi yang diperlukan, tanpa memberikan keuntungan yang signifikan dalam pengurangan deviasi nilai  $k_{eff}$ . Dengan mempertimbangkan hal ini,

dapat disimpulkan bahwa parameter jumlah partikel yang optimal untuk simulasi adalah 10000. Pada jumlah partikel ini, sebaran nilai  $k_{eff}$  relatif lebih sempit dan mendekati nilai sebenarnya, sementara waktu simulasi tetap dalam kisaran yang efisien. Gambar 5 menunjukkan bahwa baik saat menggunakan 10000 partikel maupun 20000 partikel, terdapat nilai  $k_{eff}$  yang *outlier*. Jika digabungkan dengan hasil pengamatan pada Gambar 5, dapat diketahui bahwa nilai *outlier* tersebut muncul pada awal siklus simulasi. Pada tahap awal siklus, posisi partikel dalam sistem belum mencapai homogenitas yang diinginkan, yang mempengaruhi hasil simulasi.

OpenMC menyediakan fitur yang memungkinkan untuk melewati perhitungan statistik pada tahap awal sebelum kondisi homogen tercapai. Dari informasi yang diberikan dalam Gambar 7, diasumsikan bahwa kondisi homogenitas tercapai setelah 20 siklus. Ini berarti 20 siklus pertama atau 4 *batch* pertama tidak diikutsertakan dalam perhitungan statistik. Dengan kata lain, hasil dari *batch-batch* awal tersebut tidak dianggap aktif. Berdasarkan asumsi ini, jumlah *batch* yang digunakan untuk parameter perhitungan selanjutnya adalah sebanyak 44 dengan 4 *batch* pertama yang tidak diaktifkan dalam perhitungan statistik. Pendekatan ini memastikan bahwa hasil simulasi lebih mencerminkan kondisi sistem yang homogen dan hasil perhitungan menjadi lebih akurat.

Hasil perhitungan awal mendapatkan parameter-parameter input penting yang akan membentuk dasar perhitungan selanjutnya. Parameter-parameter tersebut antara lain sebagai berikut.

1. Jumlah Partikel: Sejumlah 10000 partikel akan digunakan dalam simulasi. Pemilihan jumlah partikel ini didasarkan pada hasil pengamatan bahwa dengan jumlah ini, nilai  $k_{eff}$  menunjukkan stabilitas yang diharapkan dan sebaran nilai lebih terkendali.
2. Jumlah *Batch*: Terdapat 44 *batch* yang akan digunakan dalam perhitungan. Namun, 4 *batch* pertama tidak akan diikutsertakan dalam perhitungan statistik, mengingat bahwa pada awal siklus posisi partikel belum mencapai homogenitas. Pendekatan ini memberikan akurasi yang lebih baik terhadap kondisi yang diinginkan.

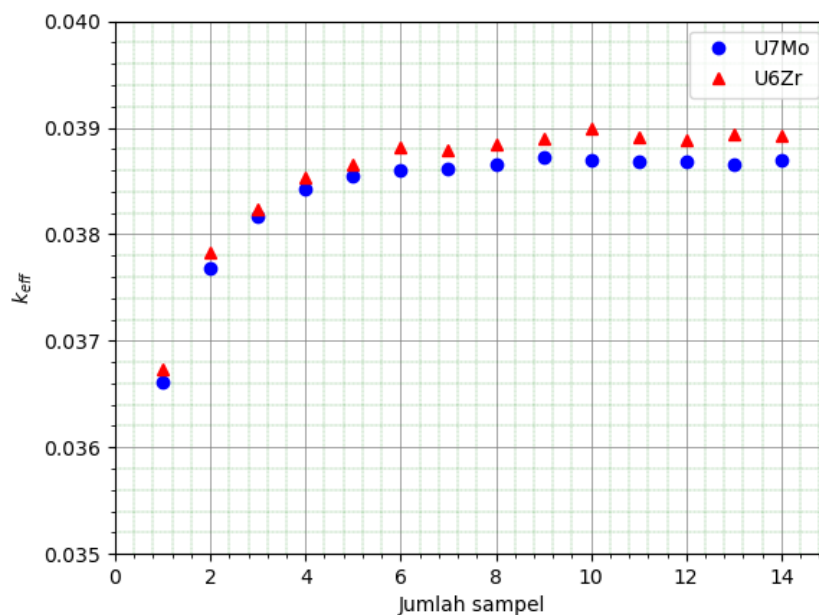
Langkah-langkah ini diperlukan untuk menghasilkan hasil perhitungan yang lebih andal dan representatif terhadap sistem yang sedang disimulasikan.

Hasil simulasi perhitungan kekritisan pada tabung retort dengan berbagai variasi jumlah wadah sampel ditunjukkan pada Gambar 8. Peningkatan nilai  $k_{eff}$  terlihat ketika jumlah sampel di dalam tabung retort bertambah, namun setelah jumlah sampel mencapai 6 atau lebih banyak, nilai  $k_{eff}$  mulai menunjukkan nilai yang stabil. Hal ini menunjukkan bahwa moderator dalam tabung retort yang berperan untuk mengubah energi neutron dari cepat ke termal sudah mulai mencapai tingkat kejenuhan. Dalam kasus ini, gas hidrogen bertindak sebagai moderator dan mengisi ruang kosong di dalam tabung retort. Meskipun jumlah sampel bertambah dan massa uranium meningkat, jumlah moderator dalam tabung retort cenderung tetap dan bahkan dapat berkurang. Hal ini mengakibatkan jumlah neutron yang dapat dimoderasi juga tetap. Hal inilah yang menyebabkan nilai  $k_{eff}$  tidak berubah walaupun massa uranium di dalam tabung retort ditambah. Nilai  $k_{eff}$  maksimum yang diperoleh dari hasil perhitungan adalah sebesar 0,0297 untuk paduan U7Mo, dan 0,0314 untuk U6Zr. Kedua nilai tersebut jauh di bawah batas kondisi kritis, sehingga potensi kecelakaan kekritisan pada proses hidriding sangat kecil.

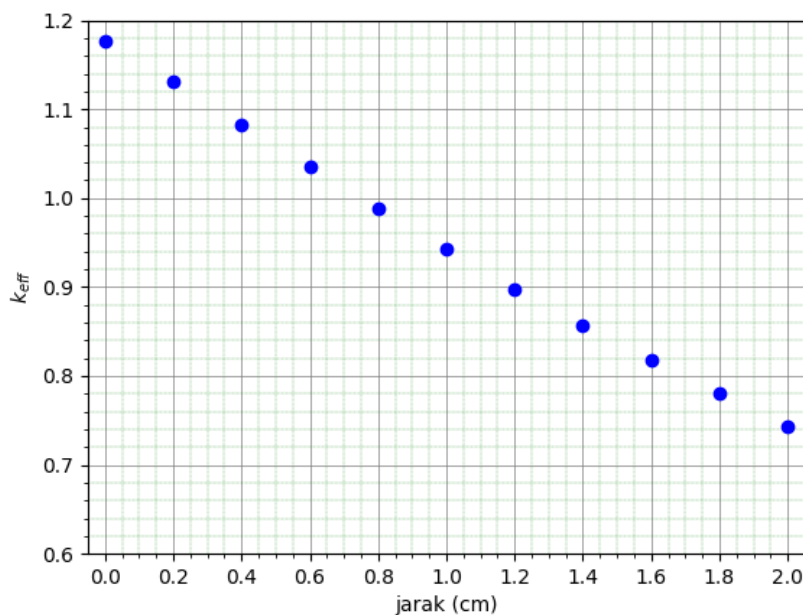
Setelah proses hidriding selesai, material hasil proses hidriding tidak langsung dilakukan *milling*, melainkan dimasukkan ke dalam botol-botol kecil berukuran 60 ml dan ditempatkan di dalam desikator. Untuk melengkapi perhitungan kritikalitas pada proses hidriding, dilakukan juga perhitungan massa maksimum uranium yang diperbolehkan untuk disimpan dalam volume tertentu. Perhitungan ini untuk memastikan bahwa proses penyimpanan di dalam desikator dalam kondisi aman dan terkendali. Pada Gambar 8 terlihat bahwa paduan U6Zr memiliki nilai kritikalitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan U7Mo. Hal ini berarti jika perhitungan U6Zr menunjukkan kondisi subkritis, maka bisa disimpulkan bahwa U7Mo juga akan subkritis. Oleh sebab itu pada perhitungan berikutnya paduan yang digunakan sebagai model hanya paduan U6Zr. Hasil perhitungan kritikalitas dalam botol penyimpanan dapat dilihat pada Gambar 9.



Analisis Kritikalitas Proses *Hydriding* Serta Penyimpanan Paduan U7Mo dan U6Zr Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset Menggunakan OpenMC (Saga Octadamailah, Anissa Isnaini, Rohmad Sigit)



Gambar 8. Grafik hasil simulasi perhitungan kekritisan pada tabung retort dengan variasi jumlah sampel.



Gambar 9. Grafik hasil perhitungan kekritisan pada botol penyimpanan dengan variasi jarak antar botol.

Asumsi yang diberikan pada perhitungan adalah bahwa desikator memiliki ukuran yang sangat besar, sehingga mampu menampung banyak botol. Dengan asumsi tersebut, potensi kebocoran neutron dari sistem dapat diabaikan, sehingga menciptakan batasan kondisi yang lebih umum. Dengan demikian hasil perhitungan dapat diterapkan pada desikator atau tempat

penyimpanan berukuran berapapun, tanpa khawatir akan kebocoran neutron. Hasil perhitungan kekritisan pada Gambar 9 menunjukkan bahwa ruang penyimpanan akan mengalami kondisi superkritik (dengan nilai  $k_{inf}$  sebesar 1,176) jika botol diletakkan saling berhimpitan tanpa ada jarak di antara botol. Kondisi subkritik (dengan nilai  $k_{inf}$  kurang dari 1) baru tercapai ketika antara

botol diberi jarak sebesar 0,8 cm. Melalui pertimbangan nilai deviasi dari hasil perhitungan, maka ditetapkan nilai  $K_{inf}$  maksimal yang diperbolehkan adalah sebesar 0,9. Nilai ini dapat tercapai jika jarak antara botol minimal sebesar 1,2 cm.

Perhitungan tersebut berlaku jika botol yang digunakan adalah botol berukuran 60 ml, namun jika botol yang digunakan memiliki ukuran yang berbeda, maka digunakan batasan yang lebih umum, yaitu jumlah massa uranium per satuan volume maksimum yang diperbolehkan. Ukuran kisi untuk botol berukuran 60 ml adalah 3,86 x 3,86 x 10 cm. Ketika ditambahkan jarak antar botol sebesar 1,2 cm, ukuran kisi menjadi 5,06 x 5,06 x 10 cm, sehingga volumenya adalah sebesar 256,03 cm<sup>3</sup>. Massa paduan U6Zr dalam botol berukuran 60 ml adalah 1100,58 g, sehingga massa uranium per satuan volume maksimum adalah 4,30 g/cm<sup>3</sup>. Berdasarkan informasi tersebut, uranium hasil proses hidriding dapat disimpan dalam botol ukuran berapapun tanpa perlu menghitung ulang batas keselamatan kritikalitas.

## SIMPULAN

Simulasi yang telah dilakukan menggunakan OpenMC pada proses hidriding menghasilkan nilai  $k_{eff}$  yang jauh di bawah batas kondisi kritis. Hal tersebut menandakan peluang terjadinya kecelakaan kritikalitas dalam proses hidriding adalah sangat kecil. Risiko kecelakaan kritikalitas muncul ketika uranium sebagai hasil proses hidriding dimasukkan ke dalam botol-botol dan disimpan dalam satu wadah besar tanpa memberikan penjarak antar botol. Risiko kecelakaan kritikalitas dapat dicegah dengan mengatur geometri dan jarak serta penetapan batas massa uranium per satuan volume.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada rekan kerja di Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran, khususnya Bapak Yatno Dwi Agus Susanto selaku operator alat *hydriding-dehydriding*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Supardjo *et al.*, "Pengembangan teknologi bahan bakar reaktor riset berbasis U-Mo/Al [Fabrikasi dan pengujian pelat elemen bakar U-Mo-Xm (M=Ti, Zr, Si)]," *Pros. Semin. Hasil-hasil Penelit. EBN Tahun 2017*, pp. 116–129, 2018.
- [2]. Masrukan and J. Setiawan, "Karakteristik ingot paduan U-Zr-Nb pasca proses quenching," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 23, no. 2, hal. 87–96, 2017. doi: 10.17146/urania.2017.23.2.3522.
- [3]. S. B. Chafle, S. Sengupta, P. Mukherjee, K. Sasidharan, and V. K. Raina, "High flux research reactor," March, pp. 43–45, 2017.
- [4]. P. H. Liem, S. Amini, A. G. Hutagaol, and T. M. Sembiring, "Nondestructive burnup verification by gamma-ray spectroscopy of LEU silicide fuel plates irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor," *Annals Nuclear Energy*, vol. 56, pp. 57–65, 2013.
- [5]. A. B. Ginting and P. H. Liem, "Absolute burnup measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique," *Annals Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 613–620, 2015.
- [6]. M. K. Ajiriyanto, A. B. Ginting, and Junaedi, "Analisis metalografi pelat elemen bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 24, no. 1, hal. 39–50, 2018.
- [7]. R. Sigit, R. Artika, H. F. Rahmatullah, S. Ismarwanti, A. B. Ginting, Supardjo, "Uji pasca iradiasi pelat elemen bakar U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al densitas 4,8 gU/cm<sup>3</sup> pada burnup 60%: pengamatan visual dan analisis citra," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 28, no. 3, hal. 135–142, 2022.
- [8]. J. C. Sihotang, M. K. Ajiriyanto, A. S. D. Putri, E. Nurlaily, A. B. Ginting, "Study of fission gas bubbles and interaction layer on irradiated U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al density of 4.8 gU/cm<sup>3</sup>," *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 28, no. 2, hal. 69–78, Jun. 2022.
- [9]. D. E. Janney and S. L. Hayes, "Experimentally Known Properties of U-10Zr Alloys: A Critical Review," *Nucl. Technol.*, vol. 203, no. 2, pp. 109–128, 2018. doi: 10.1080/00295450.2018.1435137.
- [10]. T. W. Cho *et al.*, "Thermophysical properties of heat-treated U-7Mo/Al

- dispersion fuel,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 501, pp. 31–44, 2018.  
doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.01.027.
- [11]. S. Van Den Berghe and P. Lemoine, “Review of 15 years of high-density lowenriched UMo dispersion fuel development for research reactors in Europe,” *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 125–146, 2014.  
doi: 10.5516/NET.07.2014.703.
- [12]. T. Yao *et al.*, “ $\alpha$ -U and  $\omega$ -UZr<sub>2</sub> in neutron irradiated U-10Zr annular metallic fuel,” *Journal of Nuclear Materials*, vol. 542, 2020.  
doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152536.
- [13]. T. Surbakti, S. P, and T. S, “Analisis Pengaruh densitas bahan bakar silisida terhadap parameter kinetik teras reaktor RSG-GAS,” *J. Penelit. Fis. dan Apl.*, vol. 3, no. 1, p. 19, 2013.  
doi: 10.26740/jpfa.v3n1.p19-30.
- [14]. S. Balart *et al.*, “U-Mo alloy powder obtained by a hydride-dehydride process,” *Int. Meet. Reduc. Enrich. Res. Test React. Las Vegas, Nevada*, vol. c, pp. 5–10, 2000.
- [15]. S. S. Guide, “Safety through international standards IAEA Safety Standards for protecting people and the environment Specific Safety Guide Safety of Uranium Fuel Fabrication Facilities,” vol. 6, [Online]. Available: <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>.
- [16]. P. A. Artiani, Mirawaty, and K. Heriyanto, “Analisis sub-kritikalitas rak bahan bakar nuklir bekas RSG-GAS menggunakan aluminium,” *Urania*, vol. 23, no. 2, pp. 127–138, 2017.
- [17]. Y. Naito and H. Okuno, “Nuclear criticality safety handbook (English translation). Technical Report JAERI-Review 95-013.,” 1995.
- [18]. D. A. Costa, M. E. Cournoyer, J. F. Merhege, V. E. Garcia, and A. N. Sandoval, “A primer on criticality safety,” *J. Chem. Heal. Saf.*, vol. 24, no. 3, pp. 7–13, May 2017.  
doi: 10.1016/j.jchas.2016.12.001.
- [19]. T. Inl, “Criticality Safety Basics for INL FMHs and CSOs,” April, 2012.

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG