PERHITUNGAN SEL BAHAN BAKAR (Th-²³⁵U)O₂ PADA REAKTOR AIR BERTEKANAN (PWR) PADA TINGKAT DAYA 300 MWt

Boni Pahlanop Lapanoro^{1,3,a}, Zaki Su'ud^{1,2},
Asril Pramutadi Andi Mustari^{1,2}

¹Jurusan Fisika FMIPA Institut Teknologi Bandung, Bandung

²Kelompok Keahlian Fisika Nuklir dan Bofisika FMIPA
Institut Teknologi Bandung, Bandung

³Jurusan Fisika FMIPA Universitas Tanjungpura, Pontianak

Email korespondensi: boni8poro@physics.untan.ac.id

[10.26418/pipt.2021.44](https://doi.org/10.26418/pipt.2021.44)

Abstrak

Penelitian mengenai perhitungan sel bahan bakar ThO₂ pada reaktor air bertekanan atau *pressurized water reactor* (PWR) telah dilakukan. Perhitungan ini merupakan studi awal untuk analisis neutronik pada teras PWR dengan melakukan survei parameter dan optimasi untuk disain sel bahan bakar pada tingkat daya sebesar 300 MWt. Sel bahan bakar yang digunakan berjenis (Th-²³⁵U)O₂ dan terdiri dari Thorium (²³²Th) dengan persentase campuran ²³⁵U sebesar 3% - 8%. Selain variasi pada persentase campuran ²³⁵U, dilakukan pula variasi pada fraksi volume bahan bakar mulai dari 40% hingga 60%. Analisis *burnup* dan perhitungan neutronik pada sel bahan bakar dilakukan dengan menggunakan metode probabilitas tumbukan (PIJ) menggunakan kode *standard reactor analysis code* (SRAC) dengan memanfaatkan data nuklida JENDL-4.0. Parameter *input* yang digunakan dalam perhitungan ini adalah densitas berbagai material dalam bahan bakar, fraksi volume bahan bakar, geometri sel bahan bakar, dan level daya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sel bahan bakar secara umum memiliki kinerja yang baik dan dapat digunakan pada teras PWR untuk siklus bahan bakar selama 10 tahun. Dari hasil analisa data perhitungan, diperoleh bahwa kinerja bahan bakar terbaik dimiliki oleh sel dengan fraksi volume bahan bakar sebesar 60% dan tingkat pengayaan ²³⁵U sebesar 6%, dengan kelebihan reaktivitas di awal siklus sebesar 7,8% dk/k dan kelebihan reaktivitas di akhir siklus sebesar 1,7% dk/k.

Kata kunci: analisis neutronik, analisis *burnup*, reaktivitas, *conversion ratio*

I. PENDAHULUAN

Konsumsi energi meningkat pesat di seluruh dunia karena meningkatnya populasi dan pembangunan di berbagai bidang. Saat ini, energi nuklir telah digunakan untuk pembangkit listrik yang menyumbang sekitar 10% dari pasokan listrik dunia. Reaktor air bertekanan atau *pressurized water reactor* (PWR) adalah jenis reaktor nuklir yang paling banyak digunakan sebagai pembangkit listrik dan digunakan pada kapal angkatan laut, seperti kapal selam, kapal induk, dan kapal pemecah es. Bahan bakar untuk reaktor jenis ini umumnya adalah uranium dioksida (UO₂) dengan pelet bahan bakar dimuat pada *zirconium alloy* (Cummins dan Matzie, 2017).

Pada tingkat penggunaan energi saat ini, sumber daya uranium yang tersedia cukup untuk menyediakan energi nuklir selama 100

tahun lagi (IAEA & NEA, 2012). Namun, tingkat konsumsi uranium yang tinggi telah membatasi pasokan sumber daya alam untuk bahan bakar uranium hingga abad ini, meskipun harga bijih uranium tinggi (NEA & IAEA, 2016). Selain itu, penggunaan uranium sebagai bahan bakar juga menghasilkan isotop plutonium yang tidak diinginkan dan aktinida minor berumur panjang seperti Am dan Cm. Oleh karena itu, diperlukan alternatif sumber bahan bakar nuklir. Salah satunya adalah dengan menggunakan bahan bakar berbasis thorium (du Toit dan Naicker, 2018).

Saat ini, penggunaan bahan bakar oksida campuran berbasis thorium pada teras PWR telah menjadi fokus perhatian yang mengarah ke beberapa penelitian mengenai kinerja bahan bakar (Liu, dkk., 2020). Penggunaan bahan bakar thorium dalam PWR dalam siklus bahan bakar satu arah merupakan

pilihan yang menarik karena potensi keuntungan seperti rasio konversi yang tinggi dan pembentukan aktinida minor yang rendah (Tsige-Tamirat, 2011). Penggunaan thorium sebagai bahan bakar dalam reaktor termal memiliki kelebihan dan tantangan dibandingkan dengan penggunaan siklus bahan bakar berbasis uranium tradisional karena jumlah thorium 3-4 kali lipat bila dibandingkan dengan uranium. Selain itu, thorium memiliki faktor reproduksi lebih besar dari ^{235}U dan ^{239}Pu dalam rentang energi termal, menghasilkan kinerja siklus bahan bakar yang lebih baik dalam hal *conversion ratio*. Dari sudut pandang nonproliferasi, penambahan thorium ke PWR menyebabkan lebih sedikit plutonium yang dihasilkan (Gorton, dkk., 2019).

Thorium (^{232}Th) adalah isotop fertil yang akan mengalami transmudasi inti ketika menyerap neutron termal menjadi isotop fisil ^{233}U yang dapat mengalami reaksi fisi berantai. Untuk memulai siklus bahan bakar thorium dengan fisi ^{233}U , perlu disediakan bahan fisil yang cukup di teras reaktor. Ini dapat dilakukan dengan melakukan pengayaan thorium dengan kandungan ^{235}U atau ^{239}Pu . Pengayaan thorium lebih dari 19,9% dan kandungan plutonium yang tinggi tidak diinginkan dari sudut pandang proliferasi dan pemborosan (Humphrey dan Khandaker, 2018).

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan terhadap sel bahan bakar ($\text{Th-}^{235}\text{U}$) O_2 pada teras PWR untuk tingkat daya 300 MWt. Perhitungan sel bahan bakar merupakan studi awal yang perlu dilakukan untuk mendesain teras reaktor. Campuran ^{235}U yang digunakan pada bahan bakar adalah 3%-8%, dengan tebal kelongsong (*cladding*) yang terbuat dari bahan *zirlo* dijaga tetap, sebesar 0,057 cm, dan fraksi volume bahan bakar (*fuel*) terhadap *cladding* dan pendingin (*coolant*) adalah 40%-60%. Parameter yang diamati terhadap variasi persentase ^{235}U dalam bahan bakar dan variasi fraksi volume bahan bakar adalah faktor multiplikasi efektif (k_{eff}), *conversion ratio*, dan *burnup level*.

II. METODOLOGI

Pada penelitian ini, perhitungan sel bahan bakar ($\text{Th-}^{235}\text{U}$) O_2 dilakukan menggunakan program *standar reaktor analysis code* (SRAC). Perhitungan sel ($\text{Th-}^{235}\text{U}$) O_2 pada teras reaktor dilakukan menggunakan modul PIJ yang bekerja berdasarkan metode probabilitas tumbukan atau *collision probability method* (CPM). Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dan karakteristik sel bahan bakar selama waktu pembakaran atau *burnup*. Spesifikasi umum desain PWR yang digunakan sebagai dasar perhitungan sel bahan bakar ditunjukkan pada Tabel I.

Dalam perhitungan, digunakan variasi pada fraksi volume bahan bakar sebesar 40% - 60% dengan kenaikan setiap 5%. Perubahan fraksi bahan bakar ini akan berpengaruh terhadap perubahan jari-jari bahan bakar dan *cladding* yang akan berpengaruh terhadap pembagian *region* pada sel bahan bakar. Persentase ^{235}U yang digunakan pada sel bahan bakar sebesar 3% - 8% dengan kenaikan setiap 1% pada masing-masing fraksi bahan bakar. Perubahan persentase ini akan berpengaruh terhadap densitas atom penyusun bahan bakar yang akan digunakan pada perhitungan dengan modul PIJ.

Tabel 1: Parameter desain PWR

Parameter	Spesifikasi
Daya reaktor	300 MWt
Bahan bakar	($\text{Th-}^{235}\text{U}$) O_2
Struktur <i>cladding</i>	Zirlo
Pendingin (<i>Coolant</i>)	H ₂ O
Tipe sel bahan bakar	<i>Square cell</i>
Persentase ^{235}U	3% - 8%
Densitas bahan bakar	10 g/cm ³
Fraksi bahan bakar	40% - 60%
Densitas <i>cladding</i>	6,5 g/cm ³
Tebal <i>cladding</i>	0,057 cm
Densitas <i>coolant</i> (air)	0,72 g/cm ³
Diameter <i>pitch</i>	1,4 cm
Diameter teras aktif	260 cm
Tinggi teras aktif	245 cm
Periode <i>refueling</i>	10 tahun

Gambar 1: Geometri sel bahan bakar

Tipe sel bahan bakar yang digunakan berbentuk *square* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dengan diameter *pitch* sebesar 1,4 cm dan nilai jari-jari bahan bakar dan *cladding* yang berubah terhadap fraksi bahan bakar. Jenis *cladding* yang digunakan berupa Zirlo yang terdiri dari kandungan 98,1% Zr, 1% Nb, 0,8% Sn, dan 0,1% Fe.

Parameter yang dianalisis dari hasil perhitungan sel bahan bakar di antaranya adalah faktor multiplikasi efektif k_{eff} yang merupakan perbandingan antara jumlah neutron dalam teras reaktor pada suatu generasi terhadap jumlah neutron dalam teras reaktor pada generasi sebelumnya. Jika $k_{eff} = 1$ maka reaktor dalam kondisi kritis, jika $k_{eff} > 1$ maka reaktor dalam kondisi superkritis, dan jika $k_{eff} < 1$, maka reaktor dalam kondisi subkritis. Selain itu, juga dianalisa mengenai *conversion ratio* (CR) yang merupakan perbandingan antara jumlah konsentrasi material fisil di awal dan akhir periode *burnup* tertentu. Parameter lainnya yang juga akan dianalisis adalah *burnup level* yang menunjukkan tingkat pembakaran material fisil dalam bahan bakar.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan dengan modul PIJ pada *SRAC code* yang dilakukan dalam penelitian ini merupakan perhitungan neutronik yang dilakukan dengan menyelesaikan persamaan

multigrup dan *burnup* yang dilakukan berdasarkan parameter *input* seperti persentase berbagai material dalam bahan bakar, fraksi volume bahan bakar, geometri sel bahan bakar, dan level daya. Hasil perhitungan sel bahan bakar menghasilkan beberapa parameter di antaranya level *burnup*, *conversion ratio* (CR), dan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}).

Perbandingan level *burnup* untuk setiap fraksi bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2 terlihat bahwa bahan bakar dengan fraksi volume terkecil memiliki *level burnup* yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan bahan bakar dengan fraksi volume bahan bakar lebih besar. Semakin kecil fraksi volume bahan bakar maka jumlah neutron termal yang dihasilkan akan semakin besar sehingga mempercepat proses pembakaran yang menaikkan level *burnup*. Semakin besar fraksi volume bahan bakar, maka jumlah neutron termal yang dihasilkan akan semakin sedikit sehingga menyebabkan material fisil yang dihasilkan melalui tangkapan neutron termal pada ^{232}Th juga semakin sedikit sehingga menyebabkan *level burnup* menjadi lebih rendah.

Gambar 2: Perubahan level *burnup* untuk setiap fraksi volume bahan bakar

Kinerja bahan bakar pada awal siklus pembakaran atau *beginning of cycle* (BOC) dapat dilihat pada Gambar 3. Tampak bahwa nilai k_{eff} semakin tinggi seiring dengan bertambahnya tingkat pengayaan ^{235}U . Hal ini disebabkan lebih banyak material fisil

yang tersedia sehingga produksi neutron termal semakin meningkat. Sebaliknya seiring dengan bertambahnya fraksi volume bahan bakar, nilai k_{eff} semakin menurun. Hal ini disebabkan berkurangnya fraksi moderator yang tentunya akan memperkecil peluang dihasilkannya neutron termal yang tentu saja berpengaruh terhadap jumlah material fisil yang dihasilkan.

Dari variasi fraksi volume bahan bakar yang dilakukan, fraksi bahan bakar sebesar 60% memberikan kinerja bahan bakar terbaik dalam hal reaktivitas (ρ). Reaktivitas dapat dijabarkan sebagai perbandingan antara $k_{eff} - 1$ terhadap k_{eff} . Sebuah reaktor berada dalam keadaan kritis saat $\rho = 0$, sedangkan reaktor dalam keadaan subkritis pada $\rho < 0$, dan superkritis pada $\rho > 0$. Dari Gambar 4 terlihat bahwa untuk fraksi volume bahan bakar 60%, kinerja terbaik diberikan oleh bahan bakar dengan pengayaan ^{235}U sebanyak 6% dengan kelebihan reaktivitas di awal siklus sebesar 7,8% dk/k dan kelebihan reaktivitas di akhir siklus sebesar 1,7% dk/k.

Gambar 3: Perubahan k_{eff} untuk setiap fraksi bahan bakar terhadap perubahan pengayaan ^{235}U pada BOC

Gambar 4: Pengaruh perubahan konsentrasi ^{235}U selama waktu burnup terhadap nilai k_{eff} untuk fraksi bahan bakar 60%.

Semakin besar fraksi volume bahan bakar maka kelebihan reaktivitas akan semakin berkurang dikarenakan berkurangnya fraksi moderator yang menyebabkan berkurangnya produksi neutron termal. Hal ini tentu saja menyebabkan jumlah material fisil yang terbentuk akan semakin banyak sehingga meningkatkan nilai *conversion ratio*. Perubahan nilai *conversion ratio* terhadap waktu *burnup* untuk setiap fraksi volume bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5: *Conversion ratio* sepanjang waktu burnup untuk sel bahan bakar dengan ^{235}U sebanyak 5%

KESIMPULAN

Hasil perhitungan sel yang dilakukan untuk sel bahan bakar ($\text{Th-}^{235}\text{U}$) O_2 pada PWR untuk tingkat daya 300 MWt, menunjukkan bahwa bahan bakar ini secara umum menunjukkan kinerja yang baik untuk siklus bahan bakar selama 10 tahun. Dari analisa data hasil perhitungan, diperoleh bahwa kinerja bahan bakar terbaik dimiliki oleh sel dengan fraksi volume bahan bakar sebesar 60% dan tingkat pengayaan ^{235}U sebesar 6%, dengan kelebihan reaktivitas di awal siklus sebesar 7,8% dk/k dan kelebihan reaktivitas di akhir siklus sebesar 1,7% dk/k.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas beasiswa yang diberikan untuk melanjutkan studi pada Program Doktor Fisika ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- Cummins, W. E. & Matzie, R., 2017. Design evolution of PWRs: Shippingport to generation III+. *Progress in Nuclear Energy*, Volume xxx, pp. 1-29.
- du Toit, M. H. & Naicker, V. V., 2018. Neutronic design of homogeneous thorium/uranium fuel for 24 month fuel cycles in the European pressurized reactor using MCNP6. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 337, p. 394–405.
- Gorton, J. P., Collins, B. S., Nelson, A. T. & Brown, N. R., 2019. Reactor performance and safety characteristics of ThN-UN fuel concepts in a PWR. *Nuclear Engineering and Design*, Volume 355 .
- Humphrey, U. E. & Khandaker, M. U., 2018. Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: Issues and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 97, p. 259–275.
- IAEA & NEA, 2012. *Uranium 2011: Resources, Production and Demand*. s.l.:s.n.
- Liu, R., Cai, J. & Zhou, W., 2020. Multiphysics modeling of thorium-based fuel performance. *Annals of Nuclear Energy*, Volume 136.
- NEA & IAEA, 2016. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand*. s.l.:NEA. No 7301.
- Tsige-Tamirat, H., 2011. Neutronics assessment of the use of thorium fuels in current pressurized water. *Progress in Nuclear Energy*, Volume 53, pp. 717-721.