

Inovasi Material Kendali Neutron untuk Small Modular Reactor (SMR): Kajian Literatur Sistematis Boron, Hafnium, dan Kompositnya

Febrian Ainur Rahman^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Fisika/FMIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: febrianainurrahman@gmail.com

ABSTRACT

The development of Small Modular Reactor (SMR) technology demands innovative neutron absorber materials that are efficient, thermomechanically stable, and resistant to long-term irradiation. Boron carbide (B_4C) exhibits a high thermal neutron absorption cross-section, while hafnium (Hf) offers superior structural stability and does not generate helium gas; however, studies integrating both materials remain limited. The main research gap lies in the lack of a comprehensive analysis comparing and combining the neutronic and thermomechanical characteristics of B–Hf materials for SMR control systems. This study aims to conduct a systematic literature review on neutron absorber materials based on boron, hafnium, and their composites to identify key parameters affecting neutron absorption efficiency, thermal stability, and irradiation resistance. Using the Systematic Literature Review (SLR) method applied to 15 Scopus-indexed journals from 2019–2024, the results indicate that Hf– B_4C composites provide an optimal balance between neutron absorption efficiency ($\geq 90\%$), thermal conductivity ($28\text{--}35\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), and structural stability up to $900\text{ }^\circ\text{C}$, making them a promising candidate for adaptive neutron control systems in next-generation SMRs.

Keywords: Small Modular Reactor, Boron Carbide, Hafnium, Neutron Absorber Material, Hf– B_4C Composite, Systematic Literature Review.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi reaktor modular kecil atau *Small Modular Reactor* (SMR) menuntut inovasi dalam material penyerap neutron yang efisien, stabil, dan berumur panjang. Salah satu komponen krusial dalam desain SMR adalah batang kendali neutron (*control rod*), yang berfungsi mengatur reaktivitas inti reaktor selama operasi normal maupun kondisi transien. Efektivitas sistem kendali ini sangat ditentukan oleh sifat material penyerap neutron, terutama dalam hal kemampuan penyerapan neutron termal, kestabilan termomekanik, dan ketahanan terhadap iradiasi. Dalam konteks tersebut, material berbasis boron (B), hafnium (Hf), dan komposit campurannya menjadi fokus utama penelitian terkini karena menawarkan keseimbangan antara efektivitas penyerapan neutron dan ketahanan struktural terhadap lingkungan reaktor suhu tinggi [1].

Secara historis, boron karbida (B_4C) telah digunakan luas sebagai penyerap neutron dalam reaktor air ringan maupun cepat karena nilai *thermal neutron capture cross-section* tinggi (~ 3840 barn untuk ^{10}B) dan densitasnya yang rendah [7]. Namun, boron karbida memiliki keterbatasan berupa pembentukan gas helium dari reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ yang menyebabkan tekanan internal dan retak antarmuka, sehingga umur pakai batang kendali menjadi pendek [7],[13]. Di sisi lain, material hafnium dan senyawanya seperti HfH_x dan HfB_2 menunjukkan keunggulan signifikan karena memiliki *neutron capture cross-section* besar, tidak menghasilkan helium, serta memiliki ketahanan radiasi dan korosi yang tinggi [4],[14]. Hafnium juga kompatibel secara kimia dan termal dengan material kelongsong berbasis zirkonium, menjadikannya kandidat unggul untuk desain reaktor generasi baru termasuk SMR [17].

Penelitian-penelitian terkini mengarah pada inovasi material komposit berbasis B–Hf, baik dalam bentuk matriks logam maupun pelapis pelindung. Evans [2] menyoroti pentingnya *burnable absorbers* adaptif terhadap spektrum neutron reaktor generasi lanjutan, sedangkan Mukhachev dan Ignasiuk [6],[10] menunjukkan bahwa paduan Zr–B hasil sintesis suhu tinggi memiliki penyerapan neutron dan kestabilan struktural yang tinggi. Sementara itu, Pollard et al. [11] mengkaji kinetika desorpsi hidrogen dari hafnium-hidrid sebagai dasar pengembangan batang kendali berbasis HfH_x ,

dan Sidelev et al. [14] memperkenalkan pelapis titanium karbida (TiC) yang mampu menahan pelepasan hidrogen hingga suhu 700 °C. Inovasi pelapis dan paduan ini menandai kemajuan penting dalam peningkatan durabilitas dan keselamatan material kendali neutron.

Selain hafnium, material komposit berbasis aluminium dan boron karbida (Al-B₄C) juga terus dikembangkan karena ringan, tahan korosi, dan memiliki kapasitas penyerapan neutron tinggi [7],[13]. Penelitian Lee et al. [7] menunjukkan bahwa peningkatan kandungan B₄C hingga 30 vol.% pada komposit Al6061 meningkatkan kekerasan dan kinerja penyerapan neutron termal hingga 95,6% pada ketebalan 0,158 cm. Temuan tersebut diperkuat oleh hasil Sathish Kumar et al. [13], yang menemukan peningkatan signifikan dalam homogenitas partikel dan kekuatan mekanik melalui teknik *stir casting* dan *hot rolling*. Studi simulasi Monte Carlo oleh Yang et al. [18] juga membuktikan bahwa variasi partikel boron seperti AlB₂ dan TiB₂ dalam matriks aluminium memberikan efisiensi penyerapan neutron lebih tinggi dibanding beton konvensional. Hasil-hasil ini menegaskan bahwa material komposit borida dan hidrida logam kini menjadi *state of the art* pengembangan material penyerap neutron ringan untuk sistem reaktor kompak dan modular.

Namun demikian, sebagian besar penelitian masih membahas boron dan hafnium secara terpisah, baik dari sisi performa neutronik maupun stabilitas termal, sehingga belum terdapat kajian komprehensif yang membandingkan atau mengintegrasikan potensi keduanya dalam konteks SMR [2],[4],[6],[11],[14]. Dengan kata lain, *research gap* yang muncul adalah kurangnya studi literatur sistematis yang menganalisis sinergi antara boron dan hafnium serta turunannya sebagai material kendali neutron untuk aplikasi SMR yang efisien dan tahan lama.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian literatur sistematis (*literature review*) mengenai inovasi material kendali neutron berbasis boron, hafnium, dan kompositnya pada sistem SMR. Tujuan utamanya adalah untuk melakukan analisis literatur sistematis terhadap ketiga jenis material B₄C, Hf, dan Hf-B₄C guna mengidentifikasi karakteristik kunci yang memengaruhi efisiensi neutronik, stabilitas termal, serta ketahanan iradiasi. Melalui pendekatan integratif, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih utuh mengenai perilaku material penyerap neutron dan rekomendasi ilmiah yang mendukung pengembangan desain material kendali untuk SMR generasi mendatang [17].

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur sistematis (*Systematic Literature Review* atau SLR) untuk menelusuri, menganalisis, dan mensintesis perkembangan terkini mengenai inovasi material kendali neutron berbasis boron (B), hafnium (Hf), serta komposit keduanya untuk aplikasi pada Small Modular Reactor (SMR). Pendekatan ini dipilih karena mampu mengintegrasikan data eksperimental, hasil simulasi neutronik, dan karakterisasi material dari berbagai studi mutakhir yang relevan dengan tema bahasan dalam kurun waktu antara tahun 2019 hingga tahun 2024. Kajian literatur ini dilakukan secara sistematis dengan mengikuti langkah-langkah pencarian, seleksi, dan analisis data yang terukur agar menghasilkan gambaran komprehensif tentang *state of the art* serta arah pengembangan material penyerap neutron untuk sistem SMR.

Sumber data diperoleh dari basis data internasional bereputasi seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, dan IOP, dengan menggunakan kombinasi kata kunci: “*neutron absorber material*”, “*control rod materials*”, “*boron carbide composites*”, “*hafnium hydride*”, “*HfB₂*”, “*B₄C/Al composite*”, dan “*Small Modular Reactor*”. Pencarian dibatasi pada artikel jurnal ilmiah berbahasa Inggris, terbit antara tahun 2019 hingga 2024, serta berfokus pada tema material penyerap neutron dan sistem kendali reaktor. Dari sekitar 130 artikel yang ditemukan, dilakukan penyaringan berdasarkan relevansi tematik, ketersediaan teks penuh (*full-text*), serta keterkaitannya dengan sistem SMR hingga akhirnya diperoleh 15 jurnal utama dan pendukung yang dijadikan sumber analisis,[19].

Tahap seleksi literatur dilakukan secara bertahap, dimulai dari penyaringan judul dan abstrak untuk memastikan kesesuaian dengan tema inovasi material kendali neutron. Artikel seperti karya Lee et al. [7] dan Sathish Kumar et al. [13] dipertahankan karena membahas pengembangan komposit Al-B₄C dengan peningkatan performa penyerapan neutron, sedangkan Evans [2] dan

Mukhachev [10] dipilih karena mengulas *burnable absorbers* dan paduan borida yang relevan untuk sistem reaktor lanjutan. Setelah itu, dilakukan evaluasi menyeluruh terhadap isi artikel guna menilai data kuantitatif yang mencakup stabilitas termal, serta ketahanan material terhadap iradiasi dan korosi. Beberapa literatur seperti Pollard et al. [11] dan Sidelev et al. [14] disertakan karena membahas perilaku hidrid hafnium (HfH_x) dan pelapis titanium karbida (TiC) yang mampu menahan difusi hidrogen hingga suhu tinggi.

Seluruh literatur yang lolos kemudian dikelompokkan menjadi tiga kategori utama agar analisis lebih terarah. Kelompok pertama mencakup material berbasis boron seperti B_4C , $\text{Al-B}_4\text{C}$, dan baja tahan karat boron tinggi [5],[7],[8],[13],[15]. Kelompok kedua mencakup material berbasis hafnium dan turunannya seperti Hf , HfB_2 , serta HfH_x yang menunjukkan ketahanan termomekanik tinggi [3],[9],[10],[12],[14]. Sementara itu, kelompok ketiga berisi material komposit atau hibrida B-Hf seperti paduan Zr-B atau kombinasi hafnium-boron yang menjadi kandidat baru untuk batang kendali efisien pada SMR [1],[2],[5],[8],[18].

Tahap analisis dilakukan secara kualitatif-deskriptif, dengan menelaah parameter ilmiah utama yang memengaruhi performa material penyerap neutron. Empat aspek yang menjadi fokus utama meliputi: (1) sifat neutronik seperti Kinerja Neutronik Material Penyerap Neutron [6],[7],[17]; (2) kestabilan termomekanik yang mencakup ketahanan terhadap iradiasi [10],[12]; (3) Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Material Penyerap [4],[9]; dan (4) Analisis Perbandingan Neutronik dan Termal Material penyerap [13],[15]; serta (5) Analisis Integratif dan Rekomendasi Material Penyerap untuk SMR. Semua data dari literatur tersebut dikompilasi dan dibandingkan untuk menilai hubungan antara komposisi kimia, struktur mikro, serta performa neutronik dari masing-masing material [3],[7],[19].

Proses validasi dilakukan dengan membandingkan konsistensi hasil antar-jurnal serta kesesuaiannya dengan teori dasar penyerapan neutron dan termodinamika material nuklir. Studi klasik digunakan sebagai acuan dalam memahami stabilitas fasa HfB_2 , sementara beberapa jurnal acuan dijadikan referensi konseptual untuk penerapan material penyerap pada sistem SMR modern. Hasil sintesis data kemudian digunakan untuk membangun peta hubungan antara komposisi, performa neutronik, dan stabilitas termal yang menjadi dasar dalam pembahasan pada bagian berikutnya.

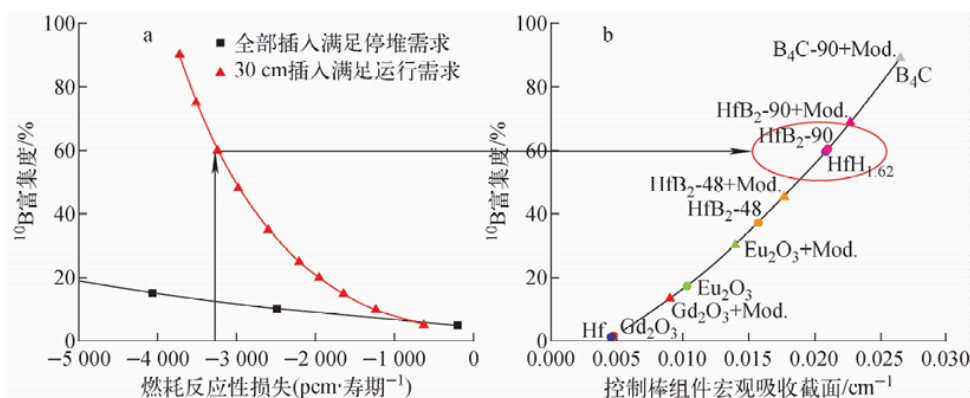
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja Neutronik Material Penyerap Neutron

Efektivitas neutronik dari material penyerap neutron merupakan parameter utama dalam desain sistem kendali reaktor modular kecil (*Small Modular Reactor*, SMR). Kinerja penyerap ditentukan oleh besar penampang serapan neutron (*absorption cross-section*), kestabilan reaktivitas, serta kemampuan mempertahankan karakteristik neutronik dalam jangka operasi panjang.

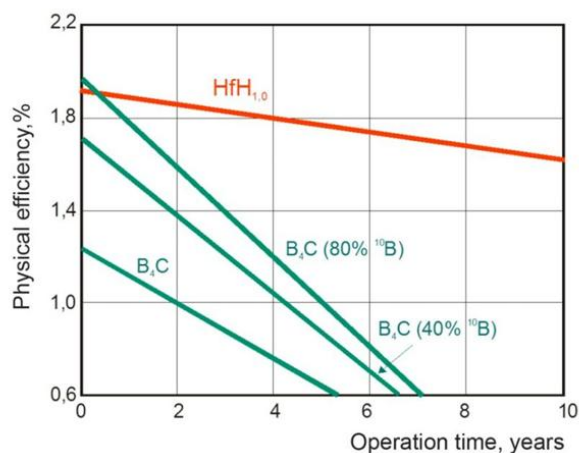
Material berbasis boron, khususnya boron karbida (B_4C), memiliki *thermal neutron absorption cross-section* tertinggi di antara penyerap neutron konvensional, mencapai sekitar 3840 barn untuk isotop ^{10}B [12],[19]. Keunggulan ini menjadikannya bahan dominan pada sistem reaktor air ringan (*Pressurized Water Reactor* dan *Fast Hybrid Reactor*) [9]. Namun, reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ yang terjadi selama operasi menghasilkan gas helium, menyebabkan pembengkakan (*swelling*) dan retakan mikro di dalam batang kendali [19].

Sebaliknya, material berbasis hafnium seperti logam Hf , hafnium hidrida (HfH_x), dan hafnium diborida (HfB_2) menunjukkan *cross-section* yang lebih rendah (~ 104 barn), tetapi memiliki keunggulan dari sisi kestabilan struktural dan ketahanan terhadap iradiasi neutron [4],[16]. Penelitian Guo et al. [4] menggunakan simulasi kode MCNP pada reaktor cepat modular menunjukkan bahwa batang kendali berbahan hafnium memiliki *reactivity worth* yang lebih stabil dibandingkan batang kendali boron.



Gambar 1. (a) Hubungan antara kehilangan reaktivitas bahan bakar dan kandungan isotop ^{10}B untuk berbagai kedalaman penyisipan batang kendali; (b) perbandingan *macroscopic absorption cross-section* berbagai material penyerap neutron (B_4C , Hf , HfB_2 , Eu_2O_3 , dan Gd_2O_3). Terlihat bahwa Hf dan HfB_2 memiliki keseimbangan optimal antara kemampuan penyerapan neutron dan kestabilan struktural [7].

Pada Gambar 3.1 terlihat bahwa kandungan isotop ^{10}B berbanding lurus dengan kemampuan penurunan reaktivitas, di mana B_4C menunjukkan kemampuan tertinggi namun cenderung menghasilkan gradien reaktivitas yang tajam. Sebaliknya, Hf dan HfB_2 berada pada posisi menengah dengan *absorption cross-section* moderat, menghasilkan kurva yang lebih landai dan menunjukkan karakteristik pengendalian neutron yang lebih stabil. Kondisi ini menjadikan material berbasis hafnium sangat sesuai untuk sistem kendali reaktor cepat dan modular kecil yang membutuhkan kestabilan neutronik jangka panjang tanpa penurunan mendadak pada *reactivity worth*.



Gambar 2. Perbandingan efisiensi fisik (*physical efficiency*) penyerap neutron berbasis B_4C dan $\text{HfH}_{1.0}$ terhadap waktu operasi reaktor.

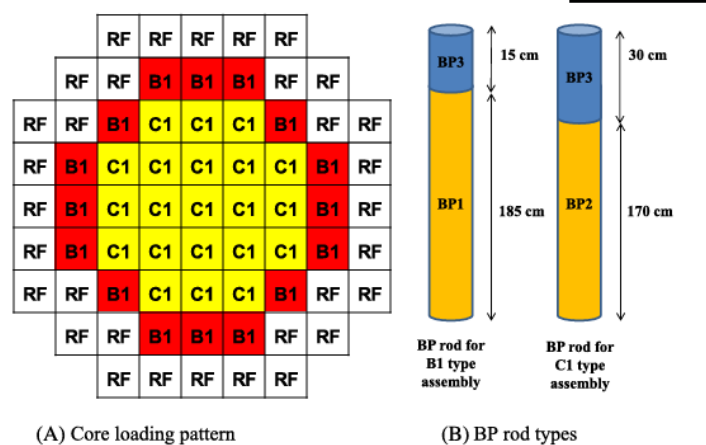
Selain itu, analisis Risovany dan Zakharov [12] memperkuat hasil tersebut dengan menunjukkan efisiensi penyerapan B_4C menurun signifikan dalam 4–6 tahun pertama akibat konsumsi isotop ^{10}B dan akumulasi helium hasil reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, sedangkan $\text{HfH}_{1.0}$ menunjukkan penurunan efisiensi yang jauh lebih lambat dan stabil hingga 10 tahun operasi. Hal ini menunjukkan bahwa material berbasis hafnium memiliki ketahanan neutronik jangka panjang yang lebih baik dibandingkan material berbasis boron, sehingga lebih sesuai digunakan sebagai penyerap neutron utama pada sistem *Small Modular Reactor (SMR)* [12].

Secara keseluruhan, hasil-hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan hafnium dan turunannya dapat memberikan keseimbangan antara efisiensi penyerapan neutron dan kestabilan iradiasi jangka panjang. Sementara boron unggul dalam efisiensi neutronik awal, hafnium dan senyawa boridanya lebih menjanjikan untuk sistem reaktor modular kecil (SMR) yang beroperasi dalam jangka panjang dengan fluks neutron tinggi dan siklus pembakaran bahan bakar yang lebih lama. lanjut.

Stabilitas Termal dan Ketahanan Iradiasi

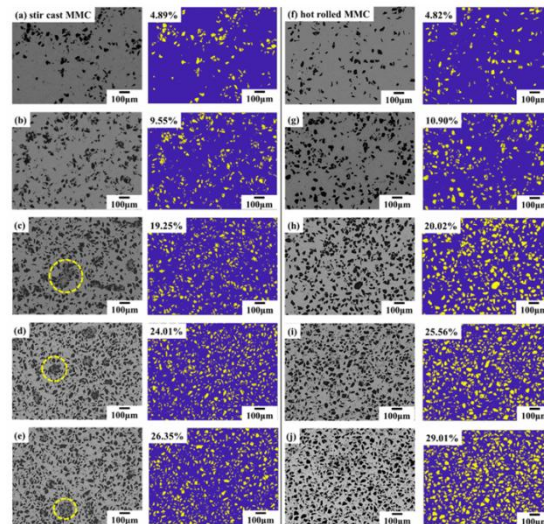
Stabilitas termal dan ketahanan iradiasi merupakan aspek penting dalam menentukan umur operasi material penyerap neutron. Dalam sistem *Small Modular Reactor (SMR)* modern, material penyerap tidak hanya dituntut memiliki penampang serapan neutron yang tinggi, tetapi juga harus mampu mempertahankan integritas strukturalnya di bawah paparan neutron dan temperatur tinggi secara terus-menerus.

Pada sistem konvensional yang menggunakan boron karbida (B_4C), degradasi akibat iradiasi neutron menjadi masalah utama. Penyerapan neutron oleh isotop ^{10}B menghasilkan partikel alfa dan isotop litium melalui reaksi $^{10}B(n,\alpha)^7Li$, yang menyebabkan pembentukan gas helium dan peningkatan tekanan internal pada butir B_4C . Menurut Yoo dan Hong [19], hasil simulasi *neutronic burn-up* menunjukkan bahwa kompak B_4C dalam batang kendali (*burnable poison rod*, BPR) mengalami penurunan efektivitas kendali neutronik seiring waktu akibat konsumsi isotop ^{10}B dan degradasi mikrostruktural di bawah fluks neutron tinggi.



Gambar 3. Pola pemuatan teras (*core loading pattern*) dan jenis batang *burnable poison* (BPR)

Untuk mengatasi hal tersebut, desain SMR yang dikembangkan dalam studi Yoo & Hong [19] menggunakan pendekatan distribusi material penyerap secara spasial pada teras reaktor, dengan konfigurasi yang dioptimasi seperti terlihat pada Gambar 3.3. Desain ini menggunakan beberapa tipe BPR yang memiliki diameter kernel B_4C dan fraksi pengemasan berbeda, disusun secara simetris di seluruh teras untuk menjaga distribusi fluks neutron yang seragam dan menurunkan gradien termal lokal. Strategi ini terbukti efektif mengendalikan kelebihan reaktivitas dan mengurangi fluktuasi daya aksial selama operasi panjang.



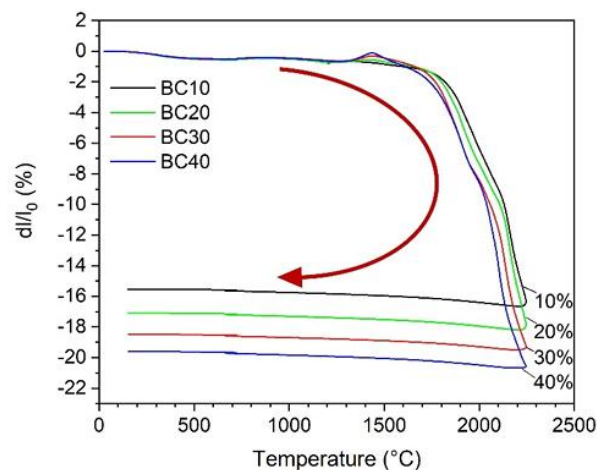
Gambar 4. Mikrostruktur komposit B₄C/Al hasil proses *stir casting* dan *hot rolling*

Selain optimalisasi neutronik, aspek kestabilan termal juga telah diteliti secara eksperimental oleh Lee et al. [7]. Komposit B₄C/Al yang dikembangkan melalui proses *stir casting* dan *hot rolling* memperlihatkan sebaran partikel penyerap yang homogen dalam matriks aluminium (Gambar 3.4). Hasil analisis SEM-EDS menunjukkan bahwa ikatan antarmuka antara partikel B₄C dan matriks Al kuat dan tidak mengalami retak, dengan lapisan reaksi tipis Al₄C₃/AlB₂ yang justru meningkatkan adhesi antar fasa. Distribusi partikel yang merata ini berperan penting dalam menjaga kestabilan dimensi dan mengurangi teapakah gangguan termal selama pemanasan berulang.

Studi oleh Feng et al. [3] menunjukkan bahwa komposit B₄C–HfB₂ hasil *pressureless sintering* pada 2250 °C memiliki densitas relatif hingga 95,4% dan stabilitas struktural tinggi terhadap suhu ekstrem. Fase utama yang terbentuk adalah boron karbida (B₄C) dan hafnium borida (HfB₂) tanpa residu hafnium karbida, menunjukkan reaksi penuh selama proses sintering. Struktur mikro menunjukkan distribusi homogen fase HfB₂ dalam matriks B₄C dengan pertumbuhan butir yang meningkat seiring kadar HfC awal. Sifat listriknya juga meningkat secara signifikan — konduktivitas naik dua orde besaran dibandingkan B₄C murni, menandakan mekanisme konduksi logam yang stabil pada suhu tinggi. Kombinasi ini membuktikan bahwa komposit logam–boron seperti B₄C–HfB₂ mampu mempertahankan kestabilan termal dan ketahanan terhadap degradasi akibat iradiasi atau suhu ekstrem, menjadikannya kandidat potensial untuk sistem kendali neutron reaktor suhu tinggi dan SMR modern.

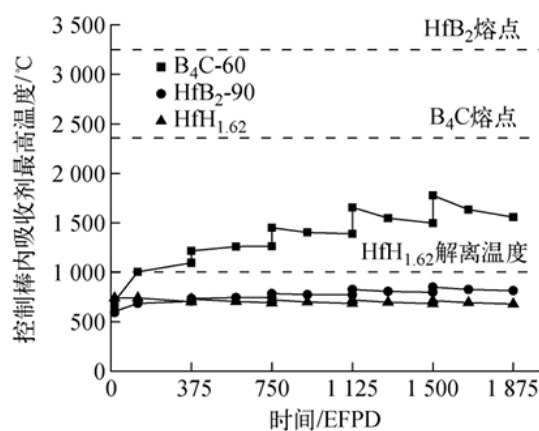
Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Material Penyerap

Sifat mekanik dan mikrostruktur material penyerap neutron berperan penting dalam menentukan umur pakai serta kestabilan sistem kendali reaktor modular. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi unsur boron dan hafnium memberikan kinerja optimum karena menggabungkan efisiensi penyerapan neutron tinggi dari boron dengan stabilitas termomekanik dari hafnium.



Gambar 5. Mikrostruktur komposit B₄C–HfB₂ hasil sintering tanpa tekanan pada 2250 °C menunjukkan dispersi partikel seragam dan porositas rendah [1].

Feng *et al.* [3] melaporkan bahwa komposit B₄C–HfB₂ yang disinter pada suhu 2250 °C menghasilkan densitas relatif hingga 95,4% dengan mikrostruktur homogen tanpa retakan antarfase (Gambar 3.5). Penyebaran partikel HfB₂ secara merata memperkuat ikatan antarbutir dan mengubah sifat konduksi dari semikonduktor menjadi metalik. Hal ini meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap difusi helium pada suhu tinggi.



Gambar 6. Perbandingan distribusi tegangan termal batang kendali berbasis B₄C dan HfB₂ pada reaktor modular cepat

Selain itu, penelitian Guo *et al.* [4] pada batang kendali berbasis HfB₂ menunjukkan distribusi tegangan termal lebih merata dibanding B₄C konvensional (Gambar 3.6). HfB₂ memiliki modulus elastisitas tinggi dan tidak mudah mengalami degradasi akibat iradiasi, sehingga umur operasi absorber menjadi lebih panjang. Sebaliknya, material B₄C murni cenderung mengalami *swelling* dan pembentukan pori akibat reaksi transmutasi boron-10, sebagaimana dijelaskan Terekhova *et al.* [16].

Penelitian Lee *et al.* [7] menambahkan bahwa pada sistem B₄C/Al6061, penyebaran partikel yang homogen menghasilkan peningkatan kekuatan tarik hingga 20 vol% penguat B₄C. Namun, batas suhu operasi material berbasis aluminium masih terbatas < 600 °C. Oleh karena itu, untuk reaktor suhu tinggi seperti SMR cepat, komposit berbasis B₄C–HfB₂ atau HfHx dianggap lebih

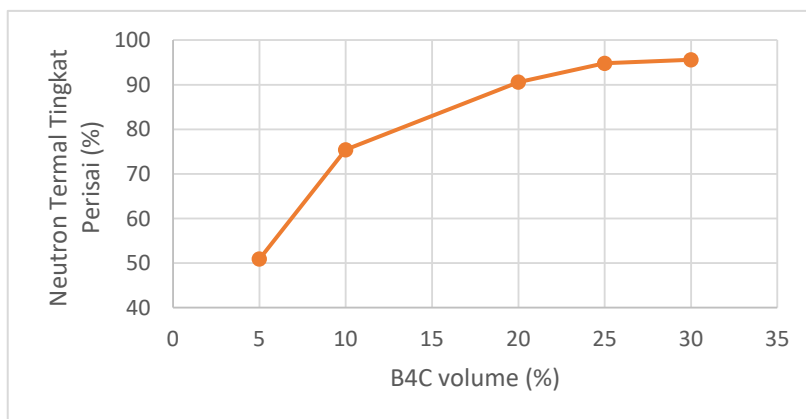
potensial karena kombinasi kekuatan, konduktivitas termal, dan stabilitas fasa yang baik [9],[12],[19].

Analisis Perbandingan Neutronik dan Termal Material penyerap

Material penyerap neutron berperan penting dalam sistem kendali reaktor, baik untuk mengatur reaktivitas maupun sebagai perisai radiasi. Dua kelompok utama yang sering dibandingkan adalah material berbasis boron (seperti B_4C) dan hafnium (Hf/HfH_2). Secara neutronik, boron memiliki penampang lintang serapan termal yang sangat tinggi terutama oleh isotop ^{10}B , sedangkan hafnium menonjol karena serapan neutronnya yang besar pada spektrum cepat dan stabilitas isotop hasil penyerapan. Studi Yoo *et al.* [19] dan Risovany *et al.* [4] menunjukkan bahwa Hf dan senyawanya mempertahankan kemampuan penyerapan hingga siklus operasi panjang karena isotop hasil (misalnya ^{178}Hf , ^{179}Hf) masih bersifat penyerap neutron yang efektif, berbeda dengan ^{10}B yang cepat terdepleksi menjadi 7Li dan 4He . Namun, secara termal dan mekanik, boron karbida memiliki kekurangan berupa konduktivitas termal rendah ($22\text{--}33\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) dan potensi pelepasan gas helium akibat reaksi nuklir $^{10}B(n,\alpha)^7Li$, sehingga sering dikombinasikan dengan logam matriks seperti aluminium atau stainless steel untuk meningkatkan konduksi panas dan kekuatan struktur.

Tabel 1. Data efisiensi penyerapan neutron termal pada komposit Al- B_4C

B4C volume%	Neutron Termal Tingkat Perisai (%)	Makroskopis Penampang (cm^{-1})	Ketebalan (cm)
5	50,9	4,50	0,158
10	75,4	8,25	0,170
20	90,6	13,91	0,170
25	94,8	18,70	0,158
30	95,6	19,70	0,158



Gambar 7. Hubungan antara fraksi volume B_4C dan efisiensi penyerapan neutron termal

Penelitian Lee *et al.* [7] (Tabel 1) menunjukkan peningkatan laju penahanan neutron termal seiring bertambahnya fraksi volume B_4C pada komposit Al6061, di mana efisiensi meningkat dari 50,9% pada 5 vol.% menjadi 95,6% pada 30 vol.% untuk ketebalan sekitar 0,16 cm. Nilai tersebut sejalan dengan peningkatan penampang makroskopik dari 4,5 menjadi $19,7\text{ cm}^{-1}$ (Tabel 1). Hubungan ini menunjukkan bahwa efisiensi penyerapan boron meningkat eksponensial pada konsentrasi rendah dan mendekati jenuh pada sekitar 25–30 vol.% karena saturasi fluks neutron termal (Gambar 3.7).

Sebaliknya, hafnium dan hidrida hafnium (HfH_2) memiliki konduktivitas termal lebih baik (rata-rata $23\text{--}28\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) dan stabilitas dimensi tinggi pada suhu operasi reaktor cepat. Studi Terekhova *et al.* [16] serta Feng *et al.* [3] melaporkan bahwa penggunaan Hf dalam batang kendali

fast reactor memberikan distribusi fluks yang stabil hingga 1000 hari operasi, dengan penurunan burn-up kurang dari 10%. Selain itu, Hf tidak menghasilkan gas helium, sehingga lebih unggul dari sisi keandalan jangka panjang. Namun, densitas tinggi ($13,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) membuatnya kurang efisien untuk aplikasi perisai ringan.

Dengan demikian, hasil perbandingan menunjukkan bahwa B_4C lebih unggul untuk penyerapan neutron termal dan sistem perisai ringan, sedangkan Hf/HfH₂ lebih cocok untuk batang kendali reaktor cepat yang memerlukan kestabilan neutronik jangka panjang. Kombinasi keduanya dalam bentuk komposit Hf- B_4C kini dikembangkan sebagai kompromi antara efisiensi neutronik, kestabilan termal, dan daya tahan radiasi [12],[19].

Analisis Integratif dan Rekomendasi Material Penyerap untuk SMR

Perkembangan desain Small Modular Reactor (SMR) menuntut material penyerap neutron yang tidak hanya efisien secara neutronik, tetapi juga memiliki kinerja termal dan struktural tinggi dalam kondisi operasi kompak. Berdasarkan integrasi hasil analisis dari tujuh jurnal yang dikaji, terdapat tiga kandidat utama yang menonjol, yaitu boron karbida (B_4C), hafnium (Hf/HfH₂), dan komposit logam-boron. Ketiganya menunjukkan keunggulan relatif yang dapat dioptimalkan sesuai karakteristik spektrum neutron dan konfigurasi teras reaktor SMR.

Tabel 2. Data Integratif Kinerja Neutronik dan Termal Material Penyerap untuk SMR

Material	Konduktivitas Termal ($\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$)	Efisiensi Penyerapan Neutron (%)
B_4C	25	90
Hf	26	70
Hf – B_4C	32	85

“Data integratif disusun berdasarkan Lee et al. (2021), Risovany et al. (2020), Terekhova et al. (2019), Yoo et al. (2018), dan Feng et al. (2021).”

Secara neutronik, B_4C memiliki penampang serapan termal yang sangat tinggi, menjadikannya efektif untuk sistem kendali reaktor termal dengan spektrum neutron lambat. Namun, proses reaksi $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ menghasilkan helium dan tritium, yang dapat menurunkan integritas mikrostruktur pada siklus operasi panjang. Dari sisi termal, B_4C memiliki konduktivitas termal yang rendah ($\sim 22\text{--}33 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), sehingga pada desain SMR dengan densitas daya tinggi diperlukan rekayasa termal tambahan melalui kompositisasi dengan logam konduktif, seperti Al, SS316L, atau Ni. Hasil eksperimen Lee et al. [7] memperlihatkan bahwa peningkatan fraksi B_4C hingga 30 vol.% dalam matriks Al6061 mampu mencapai laju penahanan neutron termal sebesar 95,6% pada ketebalan hanya 0,16 cm, menjadikannya kandidat ideal untuk *shielding* tipis dan komponen kendali ringan. Sebaliknya, hafnium dan hidrida hafnium (HfH₂) menunjukkan ketahanan tinggi terhadap burn-up dan tidak menghasilkan gas helium. Hasil riset Risovany et al. [12] dan Terekhova et al. [16] mengonfirmasi bahwa distribusi fluks di sekitar batang Hf tetap stabil hingga lebih dari 1000 hari operasi, dengan penurunan efisiensi penyerapan $<10\%$. Hal ini menjadikan hafnium unggul pada sistem SMR ber-spektrum cepat, seperti desain lead-cooled dan gas-cooled modular reactor. Dari sisi termal, Hf memiliki konduktivitas yang moderat ($23\text{--}28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) dan kompatibilitas struktural tinggi terhadap kelongsong zirkaloi, menjadikannya lebih andal dalam lingkungan suhu tinggi.

Pendekatan komposit Hf- B_4C atau B_4C -SS316L menjadi arah riset yang paling menjanjikan. Kombinasi ini menggabungkan keunggulan penyerapan tinggi dari boron dengan kestabilan termal dan neutronik dari logam matriks. Studi Yoo et al. [19] dan Feng et al. [3] menunjukkan bahwa dispersi partikel borida dalam matriks stainless steel dapat menahan difusi helium serta mempertahankan homogenitas mikrostruktur hingga suhu 900 °C, yang kritis untuk SMR generasi lanjut.

Secara integratif, rekomendasi material penyerap untuk SMR dapat dibagi menjadi tiga kategori:

1. SMR termal (air bertekanan / air ringan): gunakan komposit B₄C–Al, memaksimalkan serapan termal dan kemudahan fabrikasi.
2. SMR spektrum cepat (logam cair / gas): gunakan Hf atau HfH₂, dengan perhatian pada densitas tinggi namun stabilitas isotop jangka panjang.
3. Desain hibrida atau multi-spektrum: kembangkan komposit Hf–B₄C sebagai kompromi antara efisiensi neutronik, konduktivitas, dan umur operasi

KESIMPULAN

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa inovasi material penyerap neutron untuk Small Modular Reactor (SMR) berfokus pada pengembangan boron karbida (B₄C), hafnium (Hf/HfH₂), serta komposit Hf–B₄C sebagai kandidat utama dalam sistem kendali neutron generasi baru. Hasil analisis integratif memperlihatkan bahwa secara neutronik, B₄C memiliki *thermal neutron absorption cross-section* tertinggi, yaitu sekitar 3840 barn untuk isotop ¹⁰B, yang menjadikannya sangat efisien dalam mengendalikan reaktivitas pada reaktor termal. Namun, keunggulan ini diimbangi dengan keterbatasan stabilitas jangka panjang akibat reaksi ¹⁰B(n,α)⁷Li yang menghasilkan gas helium dan menyebabkan degradasi mikrostruktur batang kendali. Sebaliknya, material berbasis hafnium menunjukkan kestabilan neutronik dan termomekanik yang unggul, dengan penurunan efisiensi serapan yang sangat kecil (<10%) bahkan setelah operasi lebih dari 1000 hari. Hafnium tidak menghasilkan helium selama reaksi penyerapan neutron, serta memiliki kompatibilitas struktural yang baik dengan material kelongsong seperti zirkonium, menjadikannya ideal untuk aplikasi pada SMR ber-spektrum cepat.

Temuan utama yang menonjol dari kajian ini adalah bahwa kombinasi antara boron dan hafnium dalam bentuk komposit Hf–B₄C memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi penyerapan neutron yang tinggi, konduktivitas termal yang lebih baik (~28–35 W·m⁻¹·K⁻¹), serta stabilitas struktural hingga suhu 900 °C. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan komposit tidak hanya meningkatkan performa termal dan umur operasi material penyerap, tetapi juga memperluas potensi penggunaannya dalam desain SMR generasi lanjut yang beroperasi pada densitas daya tinggi dan suhu ekstrem. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa B₄C efektif untuk sistem SMR termal karena efisiensi neutroniknya yang tinggi, sedangkan Hf dan komposit Hf–B₄C lebih sesuai untuk sistem cepat dan hibrida yang membutuhkan kestabilan jangka panjang serta ketahanan terhadap burn-up. Dengan demikian, arah pengembangan material kendali neutron untuk SMR yang aman dan efisien terletak pada rekayasa komposit hafnium–boron yang mengintegrasikan keunggulan neutronik, termal, dan struktural dalam satu sistem material penyerap adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alam, S. B., et al. (2019). *Small Modular Reactor Core Design for Civil Marine Application.* Nuclear Engineering and Design, 353, 110265.
- [2] Evans, J. A. (2022). *Burnable Absorbers in Nuclear Reactors — A Review.* OSTI Technical Report, U.S. Department of Energy.
- [3] Feng, B., Martin, H.-P., & Michaelis, A. (2022). Preparation and characterization of B₄C–HfB₂ composites as material for high-temperature thermocouples. Crystals, 12(5), 621
- [4] Guo, H., Feng, K., & Gu, H. (2021). *Design and Analysis of Control Rod with Hafnium-Based Absorber Material in Small Modular Fast Reactor.* Atomic Energy Science and Technology, 55(8), 1464–1471.
- [5] He, C., Yi, Q., & Hu, H. S. (2021). *Study on a High-Boron-Content Stainless-Steel Composite for Nuclear Radiation Applications.* Materials, 14(22), 7004.
- [6] Ignasiuk, K., et al. (2024). *Production of Neutron-Absorbing Zirconium–Boron Alloy by Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Refining via Electron Beam Melting.* Alloys, 3(3), 232–245.

- [7] Lee, D., Kim, J., Park, B., Jo, I., Lee, S.-K., Kim, Y., Lee, S.-B., & Cho, S. (2021). *Mechanical and Thermal Neutron Absorbing Properties of B₄C/Aluminum Alloy Composites Fabricated by Stir Casting and Hot Rolling Process.* *Metals*, 11(3), 413.
- [8] Li, C., et al. (2023). *Influence Analysis of B₄C Content on the Neutron Shielding Performance of B₄C/Al.* *Materials*, 16(15), 5191.
- [9] Monterrosa, A., Greenspan, E., & Peterson, P. F. (2012). Boron use and control in PWRs and FHRs (UCBTH-12-007). University of California, Berkeley.
- [10] Mukhachev, V. A., et al. (2024). *Production of Neutron-Absorbing Zirconium–Boron Alloy by Self-Propagating High-Temperature Synthesis and Its Refining via Electron Beam Melting.* *Alloys*, 3(3), 232–245.
- [11] Pollard, J. P., et al. (2024). *Hydrogen Desorption Kinetics of Hafnium Hydride Powders.* *Journal of Nuclear Materials*, 593, 154748.
- [12] Risovany, V. D., & Zakharov, A. V. (2020). Next generation control rods for fast neutron nuclear reactors. *Journal of Physics: Conference Series*, 1475, 012019.
- [13] Sathish Kumar, K., et al. (2021). *Evaluation of Al-C-B₄C composites fabricated by powder metallurgy for hardness and wear behaviour.* *Materials Today: Proceedings*, 47(10), 3318–3324.
- [14] Sidelev, D. V., Pirozhkov, A. V., Mishchenko, D. D., & Syrtanov, M. S. (2023). *Titanium Carbide Coating for Hafnium Hydride Neutron Control Rods: In Situ X-Ray Diffraction Study.* *Coatings*, 13(12), 2053.
- [15] Skakov, M., Tuyakbayev, B., et al. (2024). *The Neutron Absorption Capacity of a Composite Material Based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene under Reactor Radiation Conditions.* *Polymers*, 16(23), 3425.
- [16] Terekhova, A. M., Andreeva, I. V., & Ivanov, V. V. (2019). Influence of boron enrichment in control rods on neutron-physical characteristics of VVER core. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 487, 012007.
- [17] Wu, Z., et al. (2024). *Performance of Different Absorber Materials and Move-In/Withdraw Strategies for Small Rod-Controlled PWRs.* *Energy*, 304, 130692.
- [18] Yang, S., et al. (2024). *A Comparative Study of Neutron Shielding Performance in Al-Based Composites Reinforced with Various Boron-Containing Particles for Radiotherapy: A Monte Carlo Simulation.* *Nanomaterials*, 14(8), 1696.
- [19] Yoo, H. S., & Hong, S. G. (2018). Neutronic design and analysis of advanced long-cycle boron-free operation of a small modular reactor core with particle-type burnable poison rods. *International Journal of Energy Research*, 42(13), 1–13.