

Kajian Material Pelapis Tahan Korosi untuk Komponen Molten Salt Reactor dengan FLiBe

Prasetyo Edi Nugroho^{1*} & Sovian Aritonang²

^{1,2)} Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: tyoprasetyoedinugroho@gmail.com

ABSTRACT

Molten Salt Reactors (MSRs) are among the most promising Generation IV nuclear reactor technologies due to their high thermal efficiency and inherent safety. However, their long-term operation is significantly challenged by the severe corrosiveness of molten fluoride salts, particularly FLiBe (Li_2BeF_4), which can degrade structural materials under high-temperature conditions. This study aims to compare the corrosion resistance of four candidate coating materials, namely High-Entropy Alloy (HEA), ODS NiMo- Y_2O_3 , silicon carbide (SiC), and pyrolytic carbon (PyC), through a comparative literature review approach. The collected data were evaluated based on corrosion rate, surface morphology evolution, and the protective mechanisms developed at temperatures ranging from 650 to 750 °C. The analysis indicates that SiC and PyC exhibit the highest corrosion resistance, with nearly negligible corrosion rates owing to the formation of chemically inert passive layers. Meanwhile, ODS NiMo- Y_2O_3 demonstrates the best performance among metallic coatings due to the formation of a stable dual protective layer consisting of Cr_2O_3 and YOF. Although HEA provides relatively good corrosion resistance, its performance remains strongly dependent on the redox condition of the molten salt. Overall, the corrosion resistance ranking is determined as $\text{SiC} \approx \text{PyC} > \text{ODS NiMo-}\text{Y}_2\text{O}_3 > \text{HEA} > \text{Hastelloy-N}$. These findings provide a scientific basis for the development of hybrid coating materials with superior chemical stability and thermomechanical durability for structural applications in next-generation molten salt reactor systems.

Keywords: Molten Salt Reactor, FLiBe, Corrosion Resistance, ODS NiMo- Y_2O_3 , Silicon Carbide, Pyrolytic Carbon

PENDAHULUAN

Reaktor garam cair (Molten Salt Reactor / MSR) merupakan salah satu konsep reaktor generasi IV yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi termal, keselamatan intrinsik, dan pemanfaatan bahan bakar nuklir secara lebih optimal. Keunggulan utama MSR terletak pada kemampuannya beroperasi pada suhu tinggi (600–750 °C) dengan tekanan rendah, menggunakan garam cair sebagai pendingin sekaligus media bahan bakar. Salah satu campuran garam yang paling banyak digunakan adalah FLiBe (LiF-BeF_2) karena memiliki konduktivitas termal tinggi, stabilitas kimia baik, serta titik leleh rendah[12].

Meskipun demikian, tantangan utama pada sistem MSR adalah degradasi material akibat korosi yang diinduksi oleh garam cair dan kondisi suhu tinggi. Ion fluor (F^-) dalam FLiBe dapat bereaksi dengan logam penyusun paduan, membentuk fluorida yang mudah larut dan menyebabkan penipisan permukaan logam[9][14]. Fenomena ini mengancam umur pakai komponen struktural seperti dinding reaktor, heat exchanger, dan pipa saluran. Oleh karena itu, diperlukan material dengan ketahanan korosi tinggi dan stabilitas termal yang memadai untuk menjamin keandalan jangka panjang sistem MSR [7][13].

Berbagai pendekatan telah dilakukan untuk meningkatkan ketahanan korosi material di lingkungan garam cair. Salah satu di antaranya adalah pengembangan paduan berbasis nikel dengan penguatan oksida dispersi (ODS) yang terbukti mampu membentuk lapisan pelindung Y-O-F stabil selama operasi[1]. Selain itu, High-Entropy Alloy (HEA) dikembangkan karena memiliki efek entropi tinggi yang menurunkan laju difusi atomik dan meningkatkan stabilitas lapisan pasif pada suhu tinggi[2][11]. Di sisi lain, material keramik seperti Silicon Carbide (SiC)

dan Pyrolytic Carbon (PyC) menawarkan ketahanan kimia yang sangat baik terhadap penetrasi ion fluorida dalam FLiBe[3][5][15].

Studi-studi terkini menunjukkan bahwa pemilihan material pelapis yang tepat dapat secara signifikan menekan laju korosi, bahkan hingga dua orde lebih rendah dibandingkan material konvensional seperti Hastelloy N[8][10]. Oleh sebab itu, penelitian ini difokuskan untuk mengkaji ketahanan korosi beberapa kandidat material (ODS, HEA, SiC, dan PyC) dalam lingkungan garam cair FLiBe, dengan tujuan menentukan kombinasi material paling optimal untuk aplikasi jangka panjang pada reaktor garam cair generasi IV.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur komparatif (*comparative literature review*) untuk menganalisis ketahanan korosi berbagai material pelapis (coating) yang telah diuji pada lingkungan garam cair FLiBe (Li_2BeF_4). Proses penelitian dilaksanakan selama bulan Juli–Oktober 2025 dengan tahapan yang meliputi: pengumpulan data literatur, seleksi artikel relevan, ekstraksi data eksperimen, normalisasi parameter uji, dan analisis perbandingan hasil.

Sumber Data dan Kriteria Inklusi

Data diperoleh dari jurnal ilmiah internasional bereputasi seperti *Journal of Nuclear Materials*, *Corrosion Science*, *Progress in Nuclear Energy*, dan *Coatings* melalui basis data ScienceDirect, SpringerLink, dan MDPI.

Artikel yang dipilih memenuhi kriteria berikut:

1. Menguji material pelapis atau paduan logam secara langsung dalam garam FLiBe atau analog kimia sejenis (fluoride molten salt).
2. Memiliki data kuantitatif korosi (mis. laju korosi, penurunan massa, atau kedalaman deplesi Cr).
3. Mencantumkan parameter uji utama: suhu ($^{\circ}\text{C}$), durasi (jam), kemurnian garam, dan metode purifikasi.
4. Publikasi berbahasa Inggris dengan tahun terbit 2015–2025 untuk menjamin relevansi teknologi.

Artikel yang hanya menguji di garam chloride atau oksidatif (non-FLiBe) digunakan sebagai data tambahan untuk perbandingan mekanistik, bukan sebagai basis kesimpulan utama [1].

Bahan dan Variabel Penelitian

Bahan utama yang dikaji berupa material pelapis potensial untuk komponen struktural MSR, mencakup: ODS Ni– Y_2O_3 , *High-Entropy Alloys* (HEA, tipe NiCrFeCoMo), silikon karbida (SiC), karbon pirolitik (PyC), serta lapisan Ni cladding.

Variabel penelitian dibagi menjadi tiga kategori utama sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Table 1 Variabel Penelitian

Jenis Variabel	Nama Variabel	Definisi Operasional
Independen	Jenis material pelapis	ODS, HEA, SiC, PyC, Ni-cladding
	Ketebalan lapisan	Ketebalan pelapis (μm) sesuai hasil publikasi
	Metode aplikasi	APS, CVD, ALD, hot-dip, atau sputtering
Kontrol	Medium garam	FLiBe (Li_2BeF_4), suhu 650–750 $^{\circ}\text{C}$, tekanan atmosfer
	Kemurnian & redoks garam	Dinyatakan “purified” jika diproses HF/ H_2 atau Mg-addition
	Lama uji	100–3000 jam sesuai durasi eksperimen di literatur
Dependen	Laju korosi	$\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ atau mm/y (dinormalisasi terhadap luas dan waktu)
	Kedalaman deplesi Cr	μm , berdasarkan hasil EDS/SEM
	Perubahan morfologi	Analisis visual dan mikroskopi (SEM/EDS)

Prosedur Pengolahan dan Analisis Data

Data kuantitatif (laju korosi, kehilangan massa, kedalaman deplesi Cr) dinormalisasi terhadap luas permukaan spesimen dan waktu paparan untuk memperoleh satuan $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Normalisasi ini mengacu pada pendekatan yang dilakukan oleh Raiman & Lee [2]. Selanjutnya, data diklasifikasikan berdasarkan jenis material dan kondisi uji (suhu, waktu, kemurnian garam). Nilai median dan *interquartile range* (IQR) dihitung untuk menunjukkan kecenderungan performa tiap pelapis, sementara analisis kualitatif dilakukan terhadap mikrostruktur dan komposisi hasil uji.

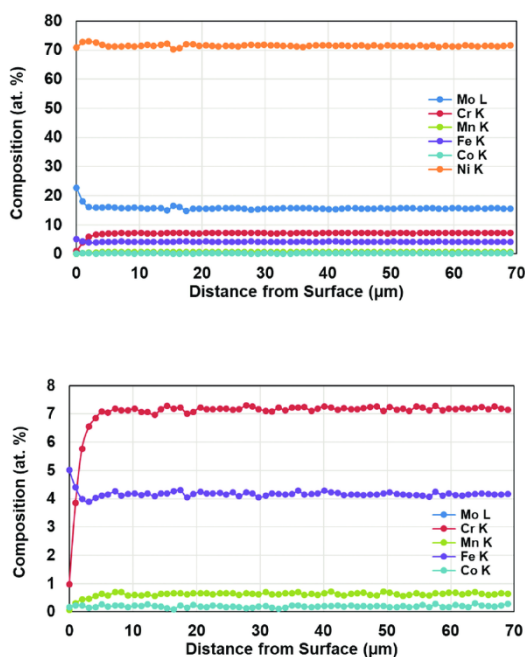
Analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan performa tiap pelapis pada kondisi FLiBe yang dimurnikan. Pelapis dengan laju korosi terendah dan perubahan mikrostruktur minimal dikategorikan sebagai kandidat terbaik. Selain itu, mekanisme resistansi korosi diinterpretasikan berdasarkan pembentukan lapisan pelindung (mis. YOF, Cr-rich film, atau karbon inert) sesuai teori difusi logam dalam garam halida [3], [4].

Validasi dan Sintesis Hasil

Untuk memverifikasi konsistensi antar literatur, hasil pengukuran yang berbeda lebih dari satu orde magnitudo dievaluasi terhadap kondisi redoks, kemurnian garam, serta metode eksperimental (loop system, crucible test, sealed capsule). Perbandingan dilakukan menggunakan pendekatan triangulasi data dari tiga sumber berbeda yang membahas material serupa. Seluruh hasil analisis disintesis untuk mengidentifikasi faktor dominan yang mengendalikan korosi di lingkungan FLiBe.

HASIL DAN PEMBAHASAN

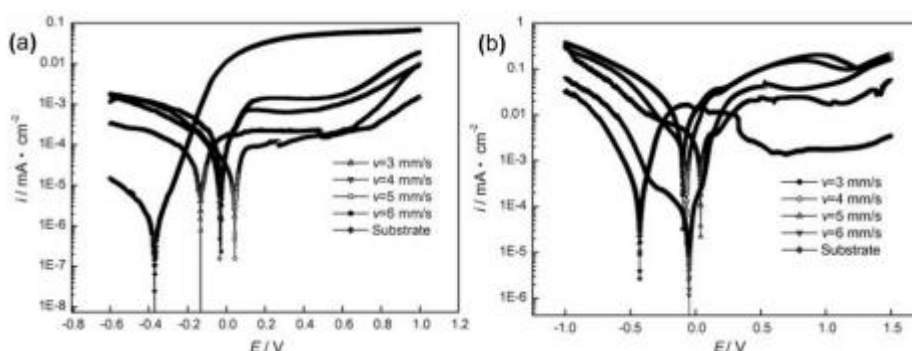
Bagian ini menyajikan hasil kajian terhadap ketahanan korosi berbagai material pelapis yang diuji dalam garam FLiBe untuk aplikasi pada *Molten Salt Reactor* (MSR). Analisis dilakukan dengan membandingkan laju korosi, perubahan morfologi permukaan, serta mekanisme reaksi yang terjadi pada setiap jenis pelapis. Untuk memberikan gambaran dasar, terlebih dahulu ditunjukkan perilaku korosi material substrat tanpa pelapis (Hastelloy-N) sebagai pembanding. Selanjutnya, hasil pengujian beberapa kandidat pelapis seperti ODS, HEA, SiC, dan PyC dibahas berdasarkan data eksperimental yang dilaporkan pada literatur.



Gambar 1 Hasil pemindaian EDS pada Hastelloy-N setelah 1000 h paparan FLiBe 750 °C.

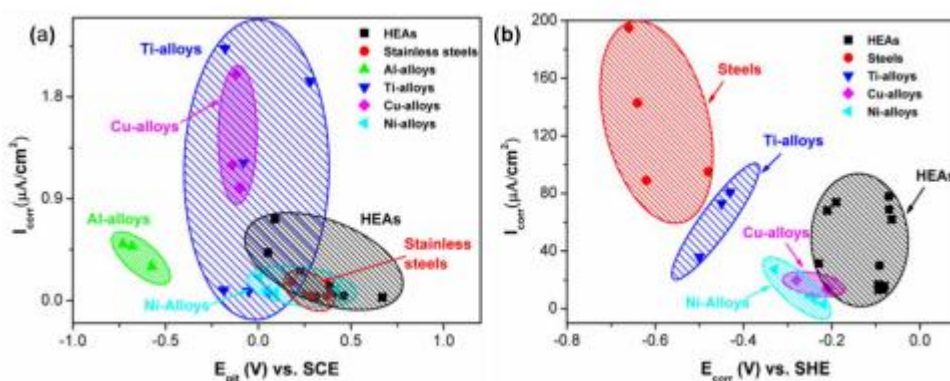
Gambar 1 menunjukkan hasil analisis *energy-dispersive spectroscopy* (EDS) terhadap paduan Hastelloy-N setelah perendaman dalam FLiBe selama 1000 jam pada 750 °C. Teramati penurunan konsentrasi kromium (Cr) hingga kedalaman sekitar 6 μm dari permukaan akibat proses *selective dissolution*. Zona deplesi Cr ini diikuti oleh pengayaan nikel (Ni) dan molibdenum (Mo) di permukaan luar. Temuan tersebut menunjukkan bahwa lapisan pasif oksida yang biasanya stabil di udara tidak terbentuk di lingkungan garam fluoride cair karena potensi redoks garam menyebabkan reduksi lapisan oksida [5]. Fenomena ini menjadi dasar perlunya penggunaan material pelapis yang mampu menghambat difusi ion F^- ke permukaan logam.

Ketahanan Korosi High-Entropy Alloy (HEA) dalam FLiBe



Gambar 2 Kurva polarisasi potensiodinamik untuk paduan AlCrFeCoCu HEA yang menunjukkan arus korosi rendah dibandingkan paduan konvensional.

Gambar 2 memperlihatkan perilaku elektrokimia HEA tipe AlCrFeCoCu yang memiliki densitas arus korosi (i_{corr}) rendah dan potensial korosi (E_{corr}) tinggi, menandakan ketahanan korosi yang baik. Film pasif berbasis Cr dan Ni terbentuk secara spontan pada permukaan HEA, menghambat laju pelarutan ion logam ke lingkungan garam atau elektrolit. Mekanisme ini menjadi dasar mengapa HEA juga efektif di lingkungan molten-salt seperti FLiBe.

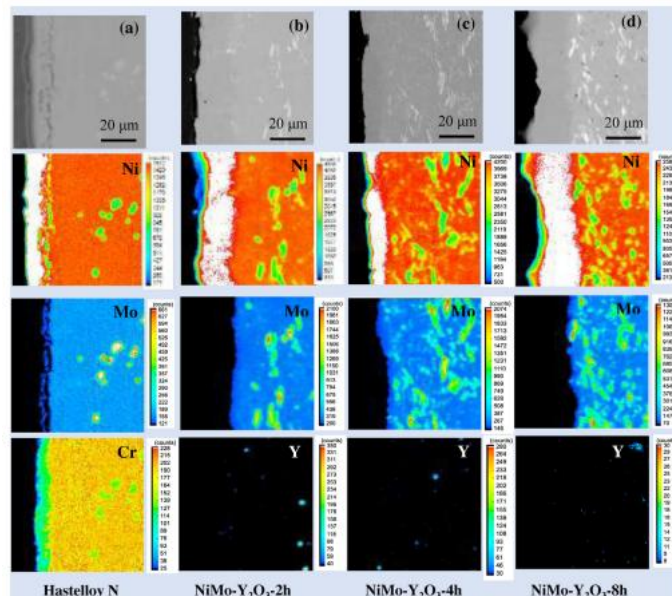


Gambar 3 Hasil uji paduan HEA

Gambar 3 menegaskan bahwa paduan HEA seperti FeCoCrNi dan AlCoCrFeNi memiliki resistansi korosi yang jauh lebih tinggi dibandingkan baja tahan karat (SUS304) maupun paduan berbasis Al dan Cu. Nilai E_{corr} yang tinggi menunjukkan lapisan pasif HEA lebih stabil, sementara nilai i_{corr} yang rendah menandakan proses korosi berlangsung sangat lambat. Fenomena ini disebabkan oleh efek *entropy stabilization* dan mikrostruktur homogen hasil difusi elemen multikomponen yang membentuk lapisan oksida kompleks pelindung.

Ketahanan Korosi (ODS NiMo–Y₂O₃)

Pada pengujian ketahanan korosi dalam lingkungan garam cair bersuhu tinggi, paduan ODS NiMo–Y₂O₃ menunjukkan perubahan morfologi dan distribusi unsur yang signifikan dibandingkan material konvensional tanpa partikel penguat oksida. Seperti diperlihatkan pada Gambar 3, penampang lintang hasil uji korosi menampilkan variasi ketebalan lapisan pelindung serta perbedaan sebaran unsur utama (Ni, Mo, Cr, dan Y) di antara sampel SR, S1–2, S2–2, dan S3–2.



Gambar 4 Cross-sectional elemental distributions of (a) corroded SR, (b) S1–2, (c) S2–2 and (d) S3–2.

Sampel SR (corroded standard reference) memperlihatkan lapisan korosi yang tebal dan tidak beraturan, dengan penurunan intensitas unsur Ni dan Cr di zona permukaan. Fenomena ini menunjukkan bahwa tanpa partikel Y₂O₃, paduan mengalami difusi keluar (outward diffusion) dari logam Ni dan Cr menuju antarmuka garam cair, sehingga korosi berlangsung cepat.

Berbeda dengan SR, pada sampel ODS NiMo–Y₂O₃ (S1–2 hingga S3–2), morfologi permukaan lebih halus dan lapisan oksida pelindung terbentuk dengan ketebalan yang relatif seragam. Hasil energy dispersive spectroscopy (EDS) memperlihatkan bahwa unsur Y mulai terakumulasi di zona permukaan, terutama pada perlakuan 4 hingga 8 jam mechanical alloying. Peningkatan konsentrasi Y ini diikuti oleh munculnya lapisan kaya oksigen dan fluor, yang diidentifikasi sebagai Yttrium Oxyfluoride (YOF).

Lapisan YOF terbentuk melalui reaksi antara partikel oksida Y₂O₃ dengan ion fluor (F⁻) dari garam cair. Reaksi ini menghasilkan film padat yang menutupi permukaan logam dan berperan sebagai penghalang difusi (diffusion barrier) bagi penetrasi ion korosif. Dengan demikian, semakin homogen penyebaran partikel Y₂O₃ akibat waktu penggilingan mekanik yang lebih lama, semakin efektif pula pembentukan lapisan YOF yang kontinu dan rapat.

Selain itu, keberadaan Cr di lapisan bawah turut berkontribusi membentuk oksida Cr₂O₃ yang stabil. Kombinasi lapisan Cr₂O₃–YOF menghasilkan struktur pelindung berlapis ganda (dual-protective layer) yang memperkuat resistansi korosi total. Hasilnya, pada sampel S3–2, hampir tidak ditemukan degradasi antarmuka atau pelarutan unsur Ni dan Mo, menandakan bahwa paduan telah mencapai kondisi pasivasi stabil dalam lingkungan garam cair.

Secara keseluruhan, fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan homogenitas partikel Y₂O₃ memperkuat mekanisme perlindungan korosi melalui pembentukan lapisan oksida-fluorida padat dan stabil. Dalam konteks variabel ketahanan korosi, ODS NiMo–Y₂O₃ dengan waktu mechanical alloying 8 jam menunjukkan performa paling optimal karena menghasilkan lapisan pelindung yang

paling kontinu dan efektif menahan penetrasi garam. Hal ini menegaskan bahwa penambahan oksida dispersi bukan hanya memperbaiki sifat mekanik, tetapi juga menjadi faktor pengendali utama terhadap laju korosi di lingkungan molten-salt reaktor.

Ketahanan korosi SiC

Table 2 Hasil Uji SiC

Parameter Uji	Keterangan	Interpretasi Ketahanan Korosi
Material uji	SiC/SiC fiber-reinforced composite	Komposit serat SiC dengan matriks SiC padat, digunakan untuk aplikasi struktur MSR
Media garam cair	Be-bearing molten fluoride salt (analog FLiBe)	Garam FLiBe dengan penambahan BeF ₂ untuk kestabilan kimia
Suhu pengujian	750 °C	Kondisi operasi tipikal molten salt reactor
Durasi perendaman	1000 jam	Uji jangka panjang untuk menilai stabilitas antarmuka
Perubahan morfologi	Permukaan tetap halus; tidak ada korosi intergranular	Menunjukkan sifat inert terhadap garam FLiBe
Kehilangan massa (mass loss)	< 0.1 mg cm ⁻²	Laju korosi sangat rendah; hampir tidak terukur
Lapisan pelindung terbentuk	Film amorf tipis (Si–O–F) pada permukaan	Film pelindung stabil yang menahan difusi ion F ⁻
Mekanisme dominan	Reaksi pasif SiC + F ⁻ → SiOF ₂ (amorf)	Lapisan pasif menghambat korosi lanjutan

Komposit SiC/SiC fiber-reinforced menunjukkan ketahanan korosi yang sangat tinggi pada pengujian jangka panjang dalam garam cair beryllium-bearing molten fluoride salt (analog FLiBe) pada suhu 750 °C. Hasil pengamatan permukaan setelah 1000 jam menunjukkan morfologi yang tetap halus tanpa indikasi retak, pit, atau korosi antarfase.

Nilai kehilangan massa yang sangat kecil (< 0.1 mg cm⁻²) memperlihatkan bahwa proses pelarutan ion logam hampir tidak terjadi, menandakan inertness kimia SiC terhadap lingkungan garam cair berfluorida. Perilaku korosi ini dikendalikan oleh pembentukan film pelindung tipis berbasis Si–O–F amorf di antarmuka garam–padatan. Film ini terbentuk melalui reaksi antara permukaan SiC dan jumlah kecil ion fluor bebas (F⁻) di dalam garam, menghasilkan lapisan pasif yang stabil secara kimia. Lapisan ini menghambat difusi F⁻ lebih lanjut ke dalam substrat, sehingga mencegah korosi progresif.

Dalam konteks variabel ketahanan korosi, pembentukan lapisan pelindung tipis namun stabil ini menunjukkan bahwa SiC/SiC memiliki resistansi kimia paling tinggi di antara kandidat non-logam seperti grafit atau Pyrolytic Carbon. Selain itu, struktur komposit yang rapat dan minim pori membuatnya tidak menyediakan jalur penetrasi bagi garam cair, sehingga ketahanan terhadap korosi meningkat signifikan.

Ketahanan korosi

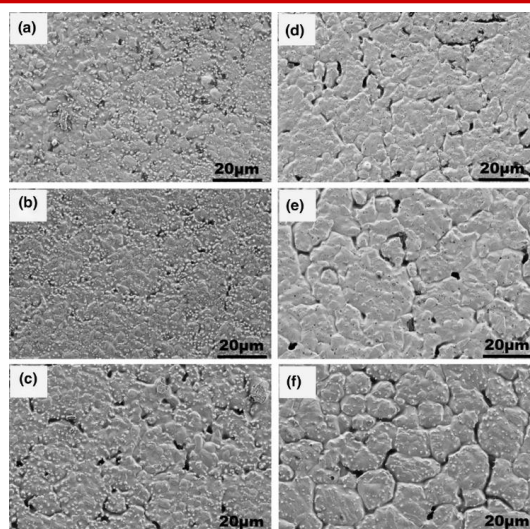


Figure 5. Hasil uji korosi PyC

Gambar 5 memperlihatkan hasil pengamatan scanning electron microscopy (SEM) terhadap permukaan Pyrolytic Carbon (PyC) setelah uji korosi dalam garam FLiBe termurnikan pada suhu 650 °C selama 500 jam. Permukaan PyC tampak halus, seragam, dan tidak menunjukkan indikasi degradasi permukaan seperti lubang (pitting), retakan mikro, ataupun pengelupasan lapisan. Kondisi ini menandakan bahwa PyC stabil secara kimia terhadap reaksi dengan ion fluorida (F^-), litium (Li^+), maupun berilium (Be^{2+}) yang terdapat dalam garam cair.

Lapisan PyC memiliki struktur karbon berorientasi basal yang rapat, menyerupai grafit berlapis tetapi dengan kepadatan dan homogenitas yang lebih tinggi. Struktur ini menciptakan penghalang difusi (diffusion barrier) yang efektif terhadap penetrasi ion korosif. Dengan tidak adanya pori terbuka atau jalur difusi antar-butir, garam cair tidak dapat menembus ke substrat grafit di bawahnya, sehingga mencegah korosi internal. Analisis EDS yang dilakukan pada permukaan setelah pengujian menunjukkan bahwa unsur Li, Be, dan F tidak terdeteksi, memperkuat bukti bahwa PyC tidak bereaksi langsung dengan garam FLiBe. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme perlindungan PyC bukan melalui pembentukan oksida baru, melainkan melalui stabilitas intrinsik lapisan karbon padat yang mencegah pertukaran ion.

Secara keseluruhan, citra pada Gambar 6 menunjukkan bahwa PyC mempertahankan integritas morfologinya bahkan setelah paparan jangka panjang pada suhu tinggi. Hasil ini memperkuat kesimpulan bahwa PyC merupakan pelapis non-logam paling stabil terhadap korosi dalam FLiBe di antara kandidat material lain, menjadikannya sangat potensial untuk digunakan sebagai lapisan pelindung pada komponen grafit atau dinding kanal garam dalam sistem molten-salt reactor (MSR).

Sintesis Perbandingan Ketahanan Korosi Antar Material

Berdasarkan hasil analisis terhadap empat kandidat pelapis, terlihat adanya perbedaan mekanisme resistansi korosi yang cukup signifikan. High-Entropy Alloy (HEA) menunjukkan ketahanan yang baik melalui pembentukan lapisan pasif kompleks berbasis Cr–Ni yang stabil secara elektrokimia. Namun, performanya masih bergantung pada kondisi redoks garam dan rentan terhadap degradasi bila lapisan pasif terganggu. ODS NiMo– Y_2O_3 menampilkan ketahanan korosi tertinggi di antara pelapis berbasis logam, ditandai dengan terbentuknya lapisan ganda Cr_2O_3 –YOF yang kompak dan homogen. Kombinasi ini tidak hanya menghambat difusi ion F^- , tetapi juga menstabilkan antarmuka logam–garam pada suhu tinggi.

Sementara itu, SiC sebagai material keramik memperlihatkan perilaku hampir inert terhadap garam FLiBe. Kehilangan massa yang sangat kecil serta permukaan yang tetap halus setelah 1000 jam paparan menunjukkan bahwa SiC memiliki kestabilan kimia luar biasa. Mekanisme perlindungannya didominasi oleh pembentukan film amorf tipis Si–O–F yang berfungsi sebagai penghalang difusi fluorida. Di sisi lain, Pyrolytic Carbon (PyC) juga menunjukkan stabilitas kimia tinggi dengan tidak adanya reaksi langsung dengan ion fluorida. Lapisan karbon berorientasi basal

yang rapat berfungsi sebagai penghalang difusi efektif tanpa perlu pembentukan film baru, menjadikannya kandidat ideal untuk pelapis grafit struktural.

Jika dibandingkan secara kuantitatif, urutan ketahanan korosi dalam media FLiBe dari yang tertinggi hingga terendah dapat disusun sebagai berikut:

$\text{SiC} \approx \text{PyC} > \text{ODS NiMo-Y}_2\text{O}_3 > \text{HEA} > \text{Hastelloy-N}$ (tanpa pelapis).

Urutan ini menegaskan bahwa material non-logam (SiC dan PyC) memiliki keunggulan dalam kestabilan kimia, sedangkan material logam dispersi oksida seperti ODS NiMo-Y₂O₃ unggul dalam integritas mekanik dan kemampuan rekayasa permukaan. Dengan demikian, pemilihan material pelapis optimal untuk sistem reaktor garam cair bergantung pada kompromi antara stabilitas kimia, kompatibilitas termal, dan kekuatan mekanik.

KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa ketahanan korosi material pelapis dalam garam cair FLiBe dipengaruhi oleh kestabilan kimia dan mekanisme pembentukan lapisan pelindung pada suhu tinggi. Material non-logam seperti SiC dan PyC memiliki ketahanan tertinggi dengan laju korosi hampir nol, berkat lapisan pasif inert Si-O-F pada SiC dan struktur karbon basal rapat pada PyC. Di antara pelapis logam, ODS NiMo-Y₂O₃ menunjukkan performa paling baik melalui pembentukan lapisan ganda Cr₂O₃-YOF yang stabil, sedangkan HEA relatif tahan namun masih dipengaruhi kondisi redoks garam.

Secara umum, urutan ketahanan korosi adalah $\text{SiC} \approx \text{PyC} > \text{ODS NiMo-Y}_2\text{O}_3 > \text{HEA} > \text{Hastelloy-N}$, yang menegaskan potensi kombinasi pelapis keramik dan dispersi oksida sebagai solusi material pelindung optimal untuk komponen struktural pada Molten Salt Reactor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Li, G. Lei, J. Liu, A. Liu, C. L. Ren, and H. Huang, "A potential candidate structural material for molten salt reactor: ODS nickel-based alloy," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 112, pp. 180–191, 2022.
- [2] C. Lin and Y. Yao, "Corrosion-resistant coating based on high-entropy alloys," *Metals*, vol. 13, no. 2, Art. no. 205, 2023.
- [3] T. Koyanagi, J. J. Lee, J. R. Keiser, H. Gietl, and Y. Katoh, "Corrosion characteristics of monolithic SiC materials in beryllium-bearing molten fluoride salt," *Corrosion Science*, vol. 220, Art. no. 111301, 2023.
- [4] B. W. Lamm, T. Koyanagi, J. J. Lee, *et al.*, "Corrosion characteristics of silicon carbide fiber-reinforced composites in beryllium-bearing molten fluoride salt," *Corrosion Science*, vol. 244, Art. no. 112635, 2024.
- [5] T. Koyanagi, T. Hinoki, *et al.*, "Behavior of SiC and pyrolytic carbon coatings in molten FLiBe," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 561, Art. no. 153326, 2023.
- [6] Y. Zhang, J. Lu, and J. Gao, "Impact of irradiation on corrosion performance of hybrid coatings for advanced nuclear systems," *Coatings*, vol. 12, no. 4, Art. no. 425, 2022.
- [7] M. A. Santos, G. A. Zupancic, and R. M. Ferreira, "Aggregation and data analysis of corrosion studies in molten chloride and fluoride salts," *Corrosion Reviews*, vol. 41, no. 3, pp. 345–359, 2023.
- [8] A. K. Singh, S. R. Tiwari, *et al.*, "Influence of SiC microstructure on its corrosion behavior in molten fluoride salt," *Ceramics International*, vol. 49, no. 5, pp. 6782–6793, 2023.
- [9] J. S. Lee, M. Y. Kim, *et al.*, "Review of molten salt corrosion in stainless steels," *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, vol. 9, no. 3, Art. no. 032003, 2023.
- [10] S. P. Kumar, R. Verma, and L. Kumar, "An estimation of neutron-induced production of gases with metallic alloys for advanced nuclear applications," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 35, Art. no. 101336, 2023.
- [11] Z. Tang, Q. Wei, Y. Liaw, *et al.*, "Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys for nuclear applications," *Progress in Materials Science*, vol. 133, Art. no. 101013, 2023.

- ◆ 
- [12] R. Subramanian, T. Pathak, and M. R. Ananth, “Thermochemical compatibility of structural alloys with FLiBe molten salt: A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 78, pp. 211–220, 2023.
 - [13] Y. Q. Yang, L. Yang, Y. Zhao, and H. Q. Pei, “Study on the salt-corrosion and oxidation role mechanism of Ni-based single crystal superalloy in the long-term hot corrosion environment,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 37, pp. 25–40, 2025.