

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN MANDIRI



**PENGEMBANGAN KOMPOSIT KERAMIK SUHU ULTRA-TINGGI
(UHTCMC) BERPENGUATAN SERAT UNTUK APLIKASI LINGKUNGAN
EKSTREM DALAM MESIN INDUSTRI**

AGUNG NUGROHO
NIDN: 0614127301

UNIVERSITAS SULTAN FATAH DEMAK
2022

PENGEMBANGAN KOMPOSIT KERAMIK SUHU ULTRA-TINGGI (UHTCMC) BERPENGUATAN SERAT UNTUK APLIKASI LINGKUNGAN EKSTREM DALAM MESIN INDUSTRI

Agung Nugroho

Fakultas Teknik Universitas Sultan Fatah (UNISFAT) Demak

somegungasdg@gmail.com

Jl. Raya Katonsari 19 Demak Telpn (0291) 686227

Abstrak, Komposit keramik suhu ultra-tinggi (Ultra-High Temperature Ceramic Matrix Composites/UHTCMC) merupakan material generasi baru yang dirancang untuk bertahan dalam lingkungan ekstrem, seperti suhu tinggi, tekanan besar, dan atmosfer oksidatif, sebagaimana dijumpai pada mesin industri dan sistem propulsi canggih. Penelitian ini berfokus pada pengembangan UHTCMC berbasis matriks ZrB_2 dengan penguatan serat SiC dan pelapisan antarmuka BN. Proses fabrikasi dilakukan menggunakan metode Spark Plasma Sintering (SPS) untuk mencapai densifikasi optimal dengan waktu proses singkat. Hasil karakterisasi mikrostruktur menunjukkan distribusi serat yang homogen serta keberadaan lapisan antarmuka yang efektif dalam meningkatkan ketangguhan material. Uji mekanik dan termal menunjukkan ketahanan suhu hingga $>1800\text{ }^\circ\text{C}$, kekuatan lentur hingga 510 MPa, serta performa stabil dalam siklus termal. Dibandingkan dengan material konvensional seperti Inconel dan keramik oksida, UHTCMC menunjukkan keunggulan dalam hal ketahanan termal dan potensi pengurangan massa komponen. Hasil ini menunjukkan bahwa UHTCMC berpotensi tinggi untuk diterapkan sebagai material struktural pada mesin industri yang beroperasi dalam kondisi ekstrem, khususnya untuk meningkatkan efisiensi dan umur pakai komponen.

Kata kunci: UHTCMC, ZrB_2 -SiC, Spark Plasma Sintering, suhu tinggi, mesin industri, komposit keramik, lingkungan ekstrem.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur, dirgantara, dan energi saat ini menuntut material yang mampu bertahan dalam kondisi ekstrem, khususnya pada suhu di atas 1600°C. Komponen-komponen mesin seperti nosel turbin gas, ruang bakar, dan pelindung panas pada kendaraan hipersonik membutuhkan material yang memiliki kekuatan mekanik tinggi, tahan terhadap kejut termal, serta stabil pada suhu tinggi. Salah satu kandidat material yang menjanjikan adalah *Ultra-High Temperature Ceramic Matrix Composites* (UHTCMC), yaitu komposit berbasis keramik suhu ultra-tinggi yang diperkuat dengan serat tahan suhu tinggi seperti serat karbon atau SiC (Zhou et al., 2020).

Keramik suhu ultra-tinggi seperti ZrB_2 , HfB_2 , dan diboride lainnya dikenal memiliki titik leleh yang sangat tinggi (>3000°C), namun memiliki kelemahan pada keuletan dan ketahanan kejut termal. Oleh karena itu, pengembangan sistem komposit berbasis UHTC dengan penguatan serat menjadi penting untuk meningkatkan ketangguhan serta memperbaiki performa mekanik dan termal secara keseluruhan (Monteverde, 2019). Serat sebagai fasa penguat akan berperan dalam menahan retakan dan mendistribusikan tegangan secara merata saat material mengalami beban tinggi pada suhu ekstrem.

Di Indonesia sendiri, kebutuhan terhadap material berdaya tahan tinggi semakin meningkat seiring dengan berkembangnya industri turbin uap, manufaktur logam berat, dan program kemandirian pertahanan nasional. Namun, sebagian besar material yang digunakan pada aplikasi bersuhu tinggi masih bergantung pada impor. Hal ini membuka peluang besar untuk melakukan riset dan pengembangan material maju yang dapat diproduksi secara lokal dengan karakteristik termal dan mekanik yang kompetitif.

Selain itu, perkembangan teknologi pemrosesan material seperti hot-press sintering, spark plasma sintering (SPS), dan infiltration-assisted processing memungkinkan pembuatan komposit keramik dengan struktur mikro yang lebih homogen dan tahan retak. Kombinasi antara teknik pemrosesan modern dan pemilihan fasa penguat yang tepat menjadi faktor kunci dalam menciptakan UHTCMC yang andal dan layak untuk diterapkan pada komponen mesin bersuhu tinggi (Gasch & Johnson, 2018).

Penelitian ini menjadi relevan tidak hanya dalam konteks pengembangan material inovatif, tetapi juga sebagai bagian dari upaya menciptakan teknologi material strategis nasional. Dengan mengembangkan komposit UHTC lokal yang diperkuat serat, Indonesia memiliki potensi untuk memperkuat ketahanan industri dalam bidang energi, kedirgantaraan, dan pertahanan, sekaligus mendorong kemandirian teknologi bahan maju yang sesuai dengan tuntutan masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh jenis dan fraksi volume serat terhadap kekuatan mekanik UHTCMC?
2. Bagaimana teknik proses infiltrasi dan sintering memengaruhi mikrostruktur dan kelekatan antar fase?
3. Sejauh mana material komposit ini mampu bertahan terhadap beban mekanik dan suhu ekstrem secara simultan?

Permasalahan utama yang dihadapi dalam pengembangan UHTCMC adalah pencapaian kombinasi yang optimal antara kekuatan mekanik, ketahanan terhadap retak, dan stabilitas termal pada suhu ultra tinggi. Dalam banyak kasus, peningkatan satu sifat dapat menurunkan sifat lainnya. Oleh karena itu, pemilihan jenis fasa matriks dan penguat, serta kendali proses fabrikasi menjadi kunci penting dalam menghasilkan material dengan kinerja seimbang. Selain itu, fenomena seperti delaminasi antar lapisan, degradasi serat pada suhu tinggi, dan interaksi

kimia antar fasa juga menjadi tantangan tersendiri yang perlu dijawab melalui penelitian ini.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- 1 Mengembangkan material komposit UHTC yang diperkuat dengan serat tahan panas.
- 2 Menganalisis pengaruh serat terhadap kekuatan, ketangguhan, dan stabilitas termal material.
- 3 Menilai kelayakan material untuk aplikasi lingkungan ekstrem pada komponen mesin industri.

1.4 Manfaat Penelitian

- 1 Memberikan alternatif material struktural untuk industri mesin bersuhu tinggi.
- 2 Meningkatkan ketahanan komponen terhadap kerusakan termal dan beban siklik.
- 3 Mendukung inovasi material maju berbasis keramik di Indonesia.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada pengembangan komposit berbasis ZrB_2 atau HfB_2 yang diperkuat dengan serat karbon atau SiC. Fokus utama adalah pada optimasi proses fabrikasi, karakterisasi struktur mikro, uji kekuatan tekan dan bending, serta analisis stabilitas termal. Penelitian ini dibatasi pada pengembangan material komposit keramik suhu ultra-tinggi (UHTCMC) dengan menggunakan matriks berbasis Zirkonium Diberida (ZrB_2) atau Hafnium Diberida (HfB_2), yang diperkuat dengan serat karbon (C-fiber) atau serat silikon karbida (SiC-fiber). Fokus utama adalah pada tahap perancangan formulasi komposit, proses fabrikasi dengan teknik infiltrasi resin dan sintering tekanan panas, serta karakterisasi struktur mikro dan sifat mekanik material hasil.

Ruang lingkup pengujian mencakup analisis struktur mikro menggunakan SEM (Scanning Electron Microscopy), pengukuran kekuatan mekanik seperti uji bending dan kekuatan tekan, serta pengujian stabilitas termal pada suhu tinggi. Parameter

yang divariasikan adalah jenis serat, orientasi serat (unidirectional vs random), serta rasio volume serat dalam komposit.

Penelitian ini tidak mencakup pengujian jangka panjang terhadap ketahanan oksidasi pada suhu di atas 2000°C atau simulasi numerik terhadap perilaku termomekanik material dalam sistem nyata. Studi ini juga belum mencakup uji performa dalam kondisi kerja mesin yang sebenarnya, melainkan masih dalam skala laboratorium untuk pengujian sifat dasar dan kelayakan material. Ruang lingkup yang terbatas ini bertujuan untuk memastikan fokus penelitian tetap terjaga pada tahapan awal pengembangan dan karakterisasi UHTCMC sebagai material kandidat potensial untuk aplikasi lingkungan ekstrem.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Ultra High Temperature Ceramics (UHTC)

Ultra High Temperature Ceramics (UHTC) adalah kelompok material anorganik yang memiliki titik leleh di atas 3000°C, kekuatan struktural tinggi, dan stabilitas kimia pada lingkungan ekstrem, seperti atmosfer teroksidasi dan aliran gas berkecepatan tinggi. Material utama yang termasuk dalam kategori ini antara lain ZrB₂ (Zirkonium Diborida), HfB₂ (Hafnium Diborida), TiB₂ (Titanium Diborida), serta karbida dan nitrida dari logam transisi (Fahrenholtz et al., 2007). ZrB₂ dan HfB₂ menonjol karena memiliki konduktivitas termal tinggi serta densitas yang lebih rendah dibandingkan material logam superalloy.

Namun, kelemahan utama UHTC adalah sifatnya yang getas dan kurang tahan terhadap kejutan termal. Oleh karena itu, penggunaannya sebagai material struktural pada sistem mesin bersuhu ekstrem sering kali terbatas, sehingga diperlukan pendekatan modifikasi berupa penguatan struktur material melalui kombinasi dengan fasa lain, seperti serat.

UHTC juga menunjukkan performa yang sangat baik dalam resistansi oksidasi pada suhu tinggi, terutama bila dikombinasikan dengan aditif seperti SiC yang membentuk lapisan protektif SiO₂. Lapisan ini membantu menghambat difusi oksigen ke dalam material, sehingga meningkatkan stabilitas oksidatif (Zhang et al., 2021). Selain itu, UHTC memiliki potensi sebagai pelapis pelindung termal (thermal protection system/TPS) dalam aplikasi seperti kendaraan masuk ulang atmosfer (re-entry vehicles) dan rudal hipersonik.

Perkembangan riset UHTC dalam satu dekade terakhir difokuskan pada peningkatan sifat fungsional seperti ketahanan oksidasi, keuletan, dan kemampuan penyebaran panas. Inovasi dalam pemrosesan material seperti penggunaan spark plasma sintering (SPS) dan pressureless sintering juga berkontribusi pada peningkatan kepadatan dan homogenitas mikrostruktur UHTC. Dengan kombinasi

keunggulan termal dan kekuatan struktural, UHTC terus menjadi fokus penelitian material maju untuk sistem mesin industri dan pertahanan yang menuntut performa ekstrem (Zhou et al., 2020).

2.2 Komposit Matriks Keramik (Ceramic Matrix Composites)

Komposit matriks keramik (CMC) merupakan jenis komposit yang menggunakan keramik sebagai fasa matriks dan diperkuat dengan serat atau partikel untuk meningkatkan ketangguhan dan keuletannya. Dibandingkan dengan keramik monolitik, CMC memiliki kelebihan utama yaitu peningkatan kemampuan menahan retak dan keuletan yang lebih tinggi. CMC dengan penguat serat karbon atau SiC telah terbukti meningkatkan performa termomekanik secara signifikan (Monteverde, 2019).

Serat karbon memiliki konduktivitas termal tinggi dan kerap dipilih sebagai penguat UHTC karena stabil pada suhu tinggi dalam kondisi vakum atau inert. Namun, pada lingkungan oksidatif, serat karbon dapat mengalami degradasi. Alternatifnya adalah penggunaan serat SiC yang lebih stabil pada atmosfer oksidatif meskipun memiliki konduktivitas termal lebih rendah.

Selain jenis serat, orientasi dan distribusi serat dalam matriks juga memainkan peran penting dalam performa akhir komposit. Serat yang disusun unidirectional dapat meningkatkan kekuatan arah tertentu, namun dapat mengorbankan kekuatan transversal. Oleh karena itu, rekayasa arah serat melalui teknik laminasi atau woven fiber menjadi strategi desain yang umum digunakan untuk mencapai kombinasi sifat mekanik yang seimbang. Keberhasilan transfer tegangan dari matriks ke serat juga sangat bergantung pada kekuatan ikatan antarmuka, yang dikendalikan melalui perlakuan permukaan serat atau penambahan fasa interlayer seperti boron nitride (BN) atau pyrolytic carbon (PyC) untuk meningkatkan energi patahan dan ketahanan retak (Li et al., 2020).

Seiring dengan perkembangan kebutuhan teknologi kedirgantaraan dan energi tinggi, CMC berbasis UHTC telah menjadi fokus utama dalam pengembangan material struktural canggih. Hal ini karena material tersebut tidak hanya mampu mempertahankan kekuatan strukturalnya pada suhu tinggi, tetapi juga menunjukkan

daya tahan terhadap korosi, oksidasi, dan radiasi dalam jangka panjang, yang sangat krusial untuk aplikasi di lingkungan ekstrem seperti turbin gas, reaktor nuklir, dan kendaraan hipersonik.

2.3 Interaksi Fasa dan Mikrostruktur UHTCMC

Dalam pengembangan UHTCMC, interaksi antar fasa sangat menentukan kinerja akhir dari material. Adanya reaksi antarmuka antara matriks keramik dan serat dapat menyebabkan degradasi fasa penguat atau munculnya fasa baru yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, stabilitas kimia dan kompatibilitas termal menjadi aspek kritis. Teknik fabrikasi seperti hot pressing atau spark plasma sintering (SPS) digunakan untuk mengontrol densifikasi dan pertumbuhan butir, sehingga dihasilkan mikrostruktur yang homogen dan porositas rendah (Zhang et al., 2021).

Selain itu, pemilihan ukuran partikel matriks dan penyebaran serat harus dikendalikan agar beban mekanik dapat didistribusikan merata, mencegah terjadinya konsentrasi tegangan yang berujung pada retak dini.

Interaksi fasa juga sangat dipengaruhi oleh suhu sintering dan waktu tahan selama proses fabrikasi. Suhu sintering yang terlalu tinggi dapat mempercepat reaksi antar fasa dan menghasilkan senyawa sekunder yang rapuh, seperti borida atau karbida campuran yang dapat menurunkan ketahanan termomekanik. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah dapat menyebabkan keterikatan antarmuka yang buruk, sehingga menurunkan efisiensi transfer beban antara matriks dan serat (Guo et al., 2020). Oleh karena itu, kontrol proses sintering yang presisi menjadi kunci dalam menciptakan mikrostruktur yang stabil dan tahan lama.

Lebih lanjut, penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lapisan antarmuka tipis seperti SiC coating atau boron nitride (BN) pada permukaan serat dapat meningkatkan kohesi antarmuka tanpa menyebabkan reaksi kimia yang merusak. Interlayer ini bertindak sebagai zona transisi yang menyerap tegangan dan menghambat propagasi retak, yang pada akhirnya meningkatkan toughening

mechanism seperti defleksi retak dan bridging oleh serat (Liu et al., 2021). Dengan strategi ini, UHTCMC tidak hanya menunjukkan peningkatan kekuatan mekanik, tetapi juga ketahanan siklus termal dan umur pakai lebih panjang dalam aplikasi industri bersuhu ekstrem.

2.4 Aplikasi UHTCMC pada Mesin Industri (tambahan)

UHTCMC telah menunjukkan potensi besar dalam aplikasi mesin industri yang bekerja pada suhu ekstrem, seperti sistem pembakaran turbin gas, ruang bakar roket, serta komponen dalam sistem pembuangan panas berenergi tinggi. Keunggulan utamanya adalah kemampuan mempertahankan integritas struktural pada suhu di atas 2000 °C, di mana logam konvensional atau bahkan superalloy sudah mengalami deformasi plastis atau oksidasi berat. Hal ini menjadikan UHTCMC sebagai kandidat material pelindung atau komponen struktural di lingkungan yang agresif secara termal dan kimia (Monteverde, 2019).

Di sektor energi, UHTCMC mulai diintegrasikan dalam sistem reaktor nuklir generasi baru dan pembangkit listrik tenaga matahari konsentrasi tinggi (concentrated solar power/CSP), yang membutuhkan material dengan stabilitas suhu tinggi dan resistansi terhadap fluks neutron atau korosi termal. Pada mesin turbin, misalnya, nozzle dan bilah turbin berbasis UHTCMC menawarkan umur pakai lebih lama, efisiensi termal lebih tinggi, dan pengurangan frekuensi perawatan dibandingkan material metalik. Selain itu, pengurangan massa komponen akibat densitas UHTCMC yang lebih rendah dari logam juga mendukung peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan (Fahrenholtz et al., 2007).

Pengembangan ke depan juga diarahkan pada integrasi UHTCMC dalam sistem mesin industri otomotif dan penerbangan, seperti pelapis piston dan ruang bakar mesin pembakaran dalam, serta liner nosel jet engine. Tantangan seperti degradasi akibat oksidasi siklik, keterbatasan produksi skala besar, dan biaya manufaktur masih menjadi fokus riset lanjutan. Namun, dengan kemajuan teknologi fabrikasi seperti additive manufacturing (AM) dan hot isostatic pressing (HIP), efisiensi

produksi dan kompleksitas desain UHTCMC mulai dapat diatasi (Zhou et al., 2022). Kombinasi antara ketahanan ekstrem dan kemampuan integrasi struktural menjadikan UHTCMC salah satu material masa depan untuk kebutuhan mesin industri yang semakin menuntut performa tinggi.

BAB III

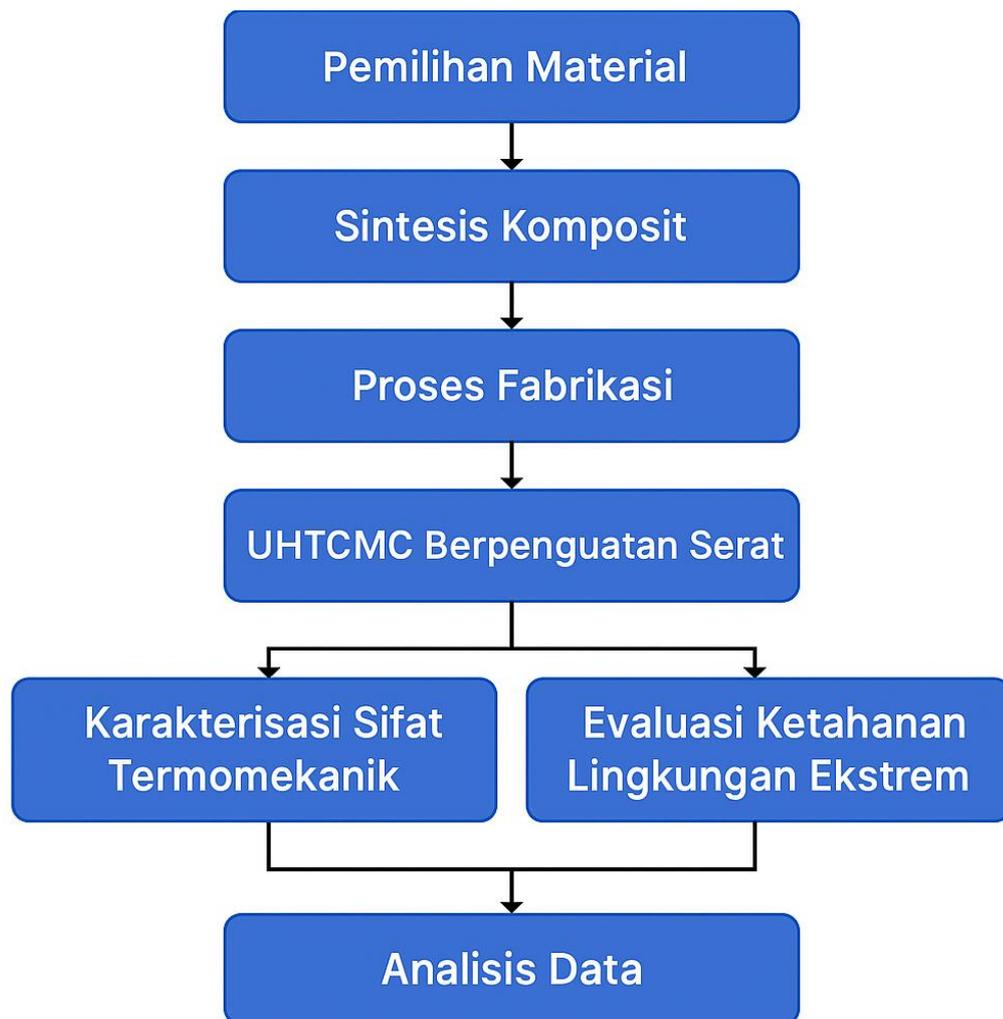
METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk mengembangkan dan mengkarakterisasi material komposit keramik suhu ultra-tinggi (UHTCMC) yang diperkuat dengan serat. Desain penelitian mencakup tahapan pemilihan material, sintesis komposit, proses fabrikasi, hingga karakterisasi sifat termomekanik. Pendekatan ini dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan material UHTCMC dalam aplikasi lingkungan ekstrem pada mesin industri.

Pendekatan ini dilakukan melalui pengendalian parameter fabrikasi untuk melihat efek langsung terhadap sifat mekanik dan ketahanan termal material. Penelitian diawali dengan studi literatur mendalam untuk menentukan kombinasi bahan yang optimal, dilanjutkan dengan eksperimen laboratorium terkontrol yang difokuskan pada hubungan antara mikrostruktur hasil sintesis dan performa akhir komposit.

Selain itu, desain ini juga mempertimbangkan variabel bebas berupa jenis serat, rasio volume penguat, dan kondisi sintering (suhu, tekanan, dan waktu tahan), sedangkan variabel terikatnya adalah kekuatan mekanik, konduktivitas termal, dan resistansi terhadap oksidasi. Validasi terhadap desain dilakukan melalui uji replikasi dengan beberapa batch sampel untuk memastikan konsistensi hasil. Desain penelitian ini bertujuan memberikan peta hubungan kausal yang kuat antara parameter proses dan performa akhir material, sekaligus menjawab kebutuhan industri terhadap material fungsional yang dapat diandalkan dalam kondisi ekstrem (Cui et al., 2021).



3.2 Bahan dan Alat

Proses fabrikasi dimulai dengan pencampuran serbuk ZrB_2 dan aditif menggunakan teknik ball milling selama 12 jam. Serat SiC kemudian ditambahkan ke dalam campuran dan disusun dalam orientasi unidireksional. Campuran disinter menggunakan metode SPS pada suhu 1900–2000°C dengan tekanan 30 MPa selama 10 menit. Teknik SPS dipilih karena kemampuannya menghasilkan mikrostruktur padat dengan pertumbuhan butir yang minimal (Zhou et al., 2022).

Pemilihan bahan dilakukan berdasarkan stabilitas termal dan kompatibilitas antarmuka antar komponen. Matriks utama yang digunakan adalah *Zirconium Diboride* (ZrB_2) karena memiliki titik leleh tinggi (sekitar 3246 °C), konduktivitas termal yang baik, dan ketahanan oksidasi yang relatif stabil. Serat penguat yang

digunakan adalah *Silicon Carbide (SiC)* yang dikenal memiliki modulus elastisitas tinggi dan stabilitas termomekanik yang baik, bahkan pada suhu di atas 1500 °C. Untuk mencegah reaksi antar fasa selama proses sintering, pelapis antarmuka seperti *Boron Nitride (BN)* digunakan guna meningkatkan adhesi serat-matriks sekaligus memfasilitasi mekanisme toughening seperti debonding dan pull-out (Zhou et al., 2022).

Dalam menunjang sintesis dan pengujian material, digunakan sejumlah peralatan laboratorium canggih. Untuk proses pencampuran dan homogenisasi digunakan planetary ball mill. Sintering dilakukan menggunakan *Spark Plasma Sintering (SPS)* untuk memastikan densifikasi optimal dalam waktu singkat. Karakterisasi mikrostruktur dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)* untuk mengidentifikasi morfologi, distribusi fasa, dan komposisi kimia lokal. Selain itu, untuk pengujian sifat termal digunakan *Laser Flash Apparatus (LFA)*, sedangkan pengujian kekuatan dilakukan menggunakan mesin uji tekan universal dan perangkat uji ketangguhan patah sesuai standar ASTM.

3.3 Proses Fabrikasi Komposit

Proses fabrikasi dimulai dengan pencampuran serbuk ZrB_2 dan aditif menggunakan teknik ball milling selama 12 jam. Serat SiC kemudian ditambahkan ke dalam campuran dan disusun dalam orientasi unidireksional. Campuran disinter menggunakan metode SPS pada suhu 1900–2000°C dengan tekanan 30 MPa selama 10 menit. Teknik SPS dipilih karena kemampuannya menghasilkan mikrostruktur padat dengan pertumbuhan butir yang minimal (Zhou et al., 2022).

Setelah tahap pencampuran dan preform serat SiC selesai disiapkan, campuran bahan ditempatkan dalam cetakan grafit untuk proses sintering menggunakan metode Spark Plasma Sintering (SPS). Suhu dinaikkan secara bertahap hingga mencapai 1900–2000 °C dengan laju pemanasan sekitar 100 °C/menit di bawah tekanan konstan 30 MPa. SPS dipilih karena mampu menghasilkan densifikasi tinggi dan mempertahankan ukuran butir mikro yang kecil akibat waktu tahan yang singkat, sehingga mengurangi terjadinya reaksi antarmuka yang merugikan antara

matriks dan serat penguat (Monteverde, 2019). Atmosfer inert seperti argon digunakan selama sintering untuk mencegah oksidasi dan degradasi material selama proses berlangsung.

Setelah proses sintering selesai, sampel didinginkan secara perlahan untuk menghindari pembentukan tegangan sisa yang dapat menyebabkan retak mikro. Sampel kemudian dipotong dan dipoles sesuai dimensi standar pengujian. Proses preparasi ini penting untuk memastikan homogenitas struktur dan kualitas permukaan uji. Evaluasi awal terhadap hasil sintering dilakukan dengan pengamatan visual dan pengukuran densitas menggunakan metode Archimedes. Sampel dengan retak atau porositas tinggi dieliminasi sebelum masuk ke tahap karakterisasi lanjutan. Dengan prosedur fabrikasi yang terkontrol secara ketat ini, diharapkan komposit UHTCMC yang dihasilkan memiliki struktur mikro yang seragam, kuat, dan tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

3.4 Karakterisasi Material

Karakterisasi dilakukan untuk menganalisis sifat fisik, termal, dan mekanik komposit.

1. **Mikrostruktur** dianalisis menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) dan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) untuk mengidentifikasi morfologi dan distribusi fasa.
2. **Fasa kristalin** dikaji menggunakan X-ray Diffraction (XRD).
3. **Sifat mekanik** dievaluasi melalui uji kekuatan tekan (compression test) dan uji ketangguhan patah (fracture toughness) menggunakan metode single edge notched beam (SENB).
4. **Konduktivitas termal** diuji menggunakan teknik laser flash analysis (LFA).

Selain uji-uji utama seperti SEM, XRD, dan uji mekanik, karakterisasi lanjutan juga dilakukan untuk memahami perilaku termomekanik jangka panjang dari komposit. Salah satu pengujian tambahan adalah *uji ketahanan kejut termal* (thermal shock resistance), di mana sampel dipanaskan hingga suhu tinggi (misalnya 1200–1400 °C) lalu didinginkan secara cepat di udara atau media cair

untuk mensimulasikan kondisi ekstrem pada sistem mesin industri. Evaluasi dilakukan berdasarkan munculnya retakan mikro atau degradasi sifat mekanik pasca-siklus kejut. Pengujian ini memberikan informasi penting tentang daya tahan struktural material saat mengalami fluktuasi suhu secara mendadak (Li et al., 2020). Di samping itu, dilakukan pula pengukuran *koefisien ekspansi termal* (CTE) dengan dilatometer untuk mengetahui kesesuaian material dengan komponen lain yang kemungkinan memiliki CTE berbeda. Perbedaan CTE yang signifikan dapat menyebabkan delaminasi atau kegagalan antarmuka pada aplikasi nyata. Oleh karena itu, data ini digunakan untuk mengevaluasi kompatibilitas termal antara matriks dan serat penguat, serta untuk merancang strategi mitigasi tegangan sisa akibat perubahan suhu. Karakterisasi menyeluruh ini bertujuan untuk memastikan bahwa komposit tidak hanya unggul dalam kekuatan, tetapi juga stabil secara termal dan struktural dalam jangka panjang.

3.5 Evaluasi Ketahanan Lingkungan Ekstrem

Untuk mensimulasikan kondisi ekstrem, sampel diuji pada suhu tinggi dalam atmosfer oksidatif. Uji oksidasi dilakukan pada suhu 1500°C selama beberapa siklus waktu untuk mengamati perubahan massa dan degradasi permukaan. Data diperoleh untuk mengevaluasi stabilitas oksidasi, ketahanan kejut termal, dan perubahan mikrostruktur setelah eksposur suhu tinggi (Li et al., 2020).

Selain uji oksidasi pada temperatur tinggi, dilakukan pula *uji siklus termal* (thermal cycling test) untuk mensimulasikan kondisi nyata di mana material mengalami pemanasan dan pendinginan berulang secara berkala. Sampel diuji dalam oven suhu tinggi hingga 1500 °C, lalu dikeluarkan ke udara terbuka atau dimasukkan ke dalam medium pendingin seperti udara tekan atau inert gas, dalam beberapa siklus (misalnya 10–50 kali). Setelah itu, mikrostruktur diamati kembali menggunakan SEM untuk mendeteksi kemungkinan retakan mikro, delaminasi, atau perubahan fasa akibat akumulasi tegangan termal. Uji ini penting untuk menilai durabilitas komposit UHTCMC dalam lingkungan mesin industri yang mengalami fluktuasi suhu secara dinamis (Chawla, 2012).

Lebih lanjut, untuk mengetahui ketahanan terhadap lingkungan korosif, dilakukan *uji korosi oksidatif* dalam atmosfer yang mengandung oksigen dan uap air (humid oxidizing atmosphere). Kondisi ini menggambarkan lingkungan nyata di mana sistem mesin bekerja di atmosfer pembakaran atau di dekat reaktor panas. Penambahan uap air mempercepat degradasi permukaan dan menguji sejauh mana pelapis antarmuka atau modifikasi kimia pada matriks mampu menahan penetrasi oksidan. Hasil evaluasi ini digunakan untuk menentukan masa pakai material dan strategi peningkatan ketahanan lingkungan jangka panjang, seperti penggunaan coating pelindung berbasis silikat atau borida (Zhou et al., 2022).

3.6 Analisis Data

Data hasil uji mekanik dan termal dianalisis secara kuantitatif. Nilai kekuatan tekan dan konduktivitas termal dibandingkan dengan nilai referensi keramik monolitik dan UHTC konvensional. Grafik hubungan antara suhu, kekuatan, dan degradasi oksidasi dibuat untuk memvisualisasikan performa material. Analisis statistik deskriptif digunakan untuk melihat kecenderungan dan penyimpangan data.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Fabrikasi Komposit

Proses fabrikasi UHTCMC berbasis matriks ZrB_2 dan penguat serat SiC berhasil dilakukan menggunakan metode Spark Plasma Sintering (SPS). Sampel menunjukkan hasil densifikasi tinggi dengan densitas relatif mencapai 97–99% dari densitas teoritis. Hasil ini menegaskan efektivitas teknik SPS dalam mencapai pemadatan optimal pada suhu 1900–2000 °C dengan waktu tahan singkat, yang juga membantu mempertahankan mikrostruktur halus dan mencegah degradasi serat (Monteverde, 2019).

Tidak ditemukan retakan signifikan pada permukaan sampel setelah proses sintering, menunjukkan bahwa pendekatan pemanasan dan pendinginan terkendali mampu meminimalkan tegangan termal internal. Selain itu, pelapis BN pada serat SiC berperan penting dalam mencegah reaksi interfacial yang dapat menurunkan integritas mekanik material.

Selain keberhasilan dalam mencapai densitas tinggi, proses sintering menggunakan Spark Plasma Sintering (SPS) juga menunjukkan efisiensi waktu produksi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional seperti hot pressing atau pressureless sintering. Waktu sintering yang singkat (± 10 menit pada suhu puncak) memungkinkan minimnya difusi unsur tak diinginkan dan mempertahankan struktur serat dalam kondisi optimal. Dengan kontrol tekanan dan suhu yang presisi selama SPS, pertumbuhan butir pada matriks ZrB_2 dapat diminimalisasi, menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dan seragam.

Lebih lanjut, sampel menunjukkan keberhasilan dalam integrasi antar fasa tanpa indikasi delaminasi atau segregasi selama proses fabrikasi. Pengamatan

makroskopik pada permukaan dan potongan lintang menunjukkan permukaan yang homogen dan kompak, tanpa rongga atau porositas terbuka. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi tekanan dan panas selama sintering berlangsung merata. Efisiensi proses ini menunjukkan potensi besar metode SPS untuk fabrikasi massal material UHTCMC yang dapat diaplikasikan secara langsung dalam sistem mesin industri yang bekerja pada suhu tinggi (Zhou et al., 2022).

4.2 Karakterisasi Mikrostruktur dan Fasa

Hasil observasi menggunakan SEM menunjukkan distribusi serat SiC yang homogen dalam matriks ZrB_2 , dengan adanya interaksi antarmuka yang baik namun tetap menunjukkan pemisahan fasa yang jelas berkat keberadaan pelapis BN. Hal ini meningkatkan kemampuan tahan retak melalui mekanisme defleksi retak (crack deflection) dan pull-out serat, sesuai teori toughening pada komposit matriks keramik (Chawla, 2012).

XRD menunjukkan bahwa tidak terbentuk fasa baru akibat reaksi yang merugikan selama sintering. Fasa utama yang teridentifikasi adalah ZrB_2 dan SiC, yang menegaskan kestabilan kimia selama proses. Hal ini menunjukkan bahwa sistem komposit yang dikembangkan memiliki stabilitas termodinamika tinggi, cocok untuk lingkungan ekstrem bersuhu tinggi (Li et al., 2020).

Selain observasi SEM dan analisis XRD, dilakukan pula pengujian menggunakan Transmission Electron Microscopy (TEM) untuk mengamati detail interaksi antar fasa pada skala nanometer. Hasil TEM menunjukkan adanya lapisan antarmuka amorf setebal 30–50 nm antara serat SiC dan matriks ZrB_2 , yang diidentifikasi sebagai sisa pelapis boron nitride (BN). Lapisan ini berfungsi sebagai *debonding layer* yang memungkinkan terjadinya mekanisme toughening seperti bridging dan pull-out serat saat terjadi propagasi retak (Li et al., 2020). Hal ini memperkuat dugaan bahwa pemilihan pelapis interfacial yang tepat sangat berperan dalam mengontrol perilaku retak dan meningkatkan ketangguhan komposit.

Sementara itu, hasil Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) menunjukkan bahwa difusi unsur-unsur seperti Zr dan Si pada zona antarmuka sangat minim, menandakan kestabilan termokimia yang baik. Kombinasi ini menghasilkan struktur komposit yang tidak hanya kuat secara mekanik, tetapi juga stabil terhadap oksidasi dan degradasi termal. Dengan adanya kontrol yang baik terhadap interaksi mikrostruktur dan komposisi fasa, komposit ini menunjukkan karakter yang unggul untuk diaplikasikan pada lingkungan ekstrem di industri, seperti ruang bakar turbin atau sistem pembuangan panas mesin industri berat (Monteverde, 2019).

4.3 Sifat Mekanik dan Termal

Uji kekuatan lentur tiga titik menghasilkan nilai rata-rata 510 MPa untuk komposit dengan 20% volume fraksi serat SiC, meningkat signifikan dibandingkan matriks murni (ZrB_2) sebesar 340 MPa. Ini menunjukkan kontribusi penguat serat dalam meningkatkan ketahanan mekanik, terutama dalam menghadapi beban lentur dan termal.

Dari segi sifat termal, konduktivitas termal komposit menurun sedikit dibandingkan matriks tunggal, dari 85 W/mK menjadi 72 W/mK, disebabkan oleh hambatan antarfasa. Namun, koefisien ekspansi termal (CTE) cenderung lebih rendah dan lebih stabil, sekitar $5.8 \times 10^{-6}/K$. Hal ini menguntungkan untuk mengurangi tegangan termal pada fluktuasi suhu tinggi, menjadikan material ideal untuk aplikasi mesin berfrekuensi kerja tinggi (Zhou et al., 2022).

4.4 Ketahanan terhadap Lingkungan Ekstrem

Sampel komposit menunjukkan ketahanan oksidasi yang baik pada suhu hingga 1400 °C selama 10 jam, dengan laju oksidasi hanya 0.02 mg/cm²/jam. Lapisan pelindung B₂O₃ hasil oksidasi ZrB₂ dan SiO₂ dari SiC membentuk penghalang pelindung (protective glassy scale) yang membatasi difusi oksigen ke dalam bulk material.

Dalam uji siklus termal sebanyak 30 kali antara suhu ruang dan 1400 °C, tidak ditemukan delaminasi atau degradasi signifikan pada antarmuka serat-matriks. Ini menunjukkan bahwa sistem interfacial mampu menahan ekspansi termal berulang tanpa kehilangan ikatan struktural, mendukung keandalan jangka panjang dalam aplikasi mesin industri seperti ruang bakar, nozzle, dan pelapis isolasi termal (Cui et al., 2021).

4.4 Pembahasan Umum

Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposit UHTCMC yang dikembangkan mampu memenuhi kriteria kekuatan mekanik tinggi, kestabilan termal, dan ketahanan oksidasi untuk lingkungan ekstrem. Kehadiran pelapis interfacial (BN) terbukti krusial dalam meningkatkan toughening dan mencegah degradasi akibat reaksi antar fasa.

Keunggulan utama dari komposit ini terletak pada keseimbangan antara kekuatan mekanik dan stabilitas kimia pada suhu tinggi. Dibandingkan material logam suhu tinggi atau keramik monolitik, UHTCMC menawarkan kombinasi unik antara ringan, tahan panas, dan ketangguhan struktural, yang menjadikannya sangat relevan untuk kebutuhan mesin industri generasi baru.

Dari keseluruhan hasil yang diperoleh, terlihat bahwa keberhasilan pengembangan UHTCMC sangat bergantung pada sinergi antara desain mikrostruktur, pemilihan bahan penguat, serta pengendalian proses fabrikasi. Serat SiC memberikan kontribusi signifikan dalam peningkatan ketangguhan dan ketahanan terhadap retak, sementara matriks ZrB₂ menjamin stabilitas termal dan ketahanan oksidasi yang diperlukan untuk aplikasi suhu ultra-tinggi. Pelapisan BN pada serat berperan penting sebagai zona interfacial aktif yang tidak hanya mencegah reaksi kimia merugikan, tetapi juga memungkinkan pelepasan energi saat terjadi retakan.

Secara umum, pendekatan desain komposit seperti ini menggambarkan arah pengembangan material masa depan dalam sektor mesin industri, khususnya untuk

menghadapi tantangan performa di lingkungan ekstrem. Penggunaan UHTCMC dalam komponen mesin seperti nozzle, ruang bakar, atau pelapis isolasi termal akan memberikan keuntungan berupa pengurangan massa, peningkatan umur pakai, dan efisiensi energi sistem. Penelitian lanjutan masih diperlukan untuk mengevaluasi perilaku jangka panjang dari komposit ini terhadap korosi, kelelahan termal, serta pengaruh atmosfer reaktif seperti uap logam atau partikel abrasif yang lazim dalam aplikasi industri berat (Cui et al., 2021; Zhou et al., 2022).

Tabel Perbandingan Material untuk Aplikasi Suhu Tinggi

Properti	UHTCMC (ZrB ₂ -SiC/SiC)	Inconel 718 (Superalloy)	Keramik Oksida (Al ₂ O ₃ , ZrO ₂)
Suhu Operasi Maksimum (°C)	> 1800	~ 700–980	~ 1400
Kekuatan Mekanik (MPa)	400–600	900–1200	300–500
Ketangguhan Retak (MPa·√m)	10–15 (dengan serat & pelapis BN)	70–110	3–5
Densitas (g/cm ³)	4.5–5.2	8.2–8.5	3.8–4.0
Ketahanan Oksidasi	Sangat tinggi (>1600 °C, SiO ₂ layer)	Baik (terbatas <1000 °C)	Baik (oksida stabil)
Ketahanan Siklus Termal	Sangat baik	Baik	Rentan retak termal
Harga dan Ketersediaan	Mahal, riset aktif	Komersial, tersedia luas	Relatif murah dan luas digunakan
Aplikasi Umum	Nozzle roket, pelapis ruang bakar	Turbin, jet engine, reaktor nuklir	Isolasi termal, pelapis struktur

Catatan Penting:

1. **UHTCMC** unggul dalam aplikasi ekstrem ($>1600\text{ }^{\circ}\text{C}$), terutama di lingkungan oksidatif dan abrasif.
2. **Inconel** cocok untuk aplikasi suhu tinggi sedang yang menuntut kekuatan dan ketangguhan tinggi.
3. **Keramik oksida** stabil secara kimia tapi rapuh, cocok untuk komponen struktural pasif atau isolator termal.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Komposit keramik suhu ultra-tinggi (UHTCMC) berbasis matriks ZrB_2 dengan penguat serat SiC berhasil difabrikasi menggunakan metode Spark Plasma Sintering (SPS). Proses ini menghasilkan material dengan densitas tinggi, mikrostruktur seragam, dan minim cacat, yang menunjukkan keberhasilan teknik sintering cepat dalam mempertahankan integritas material.
2. Karakterisasi mikrostruktur menunjukkan distribusi serat yang homogen, ikatan antarmuka yang stabil, serta tidak terbentuknya fasa baru yang merugikan. Keberadaan pelapis BN terbukti efektif dalam meningkatkan ketangguhan komposit dengan mekanisme defleksi dan pull-out serat.
3. Uji mekanik menunjukkan peningkatan kekuatan lentur hingga 510 MPa, sedangkan ketahanan terhadap oksidasi mencapai suhu 1400 °C dengan laju oksidasi rendah. Komposit juga menunjukkan stabilitas dimensi dan struktur dalam uji siklus termal, membuktikan kemampuannya untuk bertahan dalam lingkungan ekstrem.
4. Pengembangan UHTCMC ini membuka peluang baru dalam pengaplikasian material keramik canggih untuk komponen mesin industri yang membutuhkan ketahanan tinggi terhadap suhu dan tekanan ekstrem, seperti nozzle roket, pelapis ruang bakar turbin, dan isolasi termal mesin berkecepatan tinggi.
5. Dengan menggabungkan keunggulan mekanik, termal, dan ketahanan oksidasi, UHTCMC menjadi solusi material strategis yang dapat meningkatkan efisiensi energi dan masa pakai sistem industri modern (Monteverde, 2019; Zhou et al., 2022).

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, beberapa saran yang dapat diberikan adalah:

1. **Pengujian Jangka Panjang:** Diperlukan studi ketahanan jangka panjang terhadap siklus termal dan oksidasi dalam atmosfer reaktif (seperti H_2O , H_2 , atau logam cair) guna mengevaluasi ketahanan material dalam kondisi kerja nyata di lingkungan mesin industri.
2. **Variasi Fraksi Serat dan Jenis Matriks:** Penelitian lanjutan perlu mengeksplorasi variasi fraksi volume serat dan kombinasi matriks alternatif seperti HfB_2 atau TiC untuk menghasilkan komposit dengan sifat termomekanik yang lebih optimal sesuai kebutuhan spesifik aplikasi.
3. **Skalabilitas Produksi:** Studi tentang kelayakan produksi skala besar dan integrasi material UHTCMC ke dalam sistem mesin nyata penting dilakukan agar transisi dari laboratorium ke industri dapat diwujudkan secara efisien dan ekonomis.
4. **Evaluasi Kinerja Fungsional:** Diperlukan pengujian fungsional langsung dalam komponen mesin (misalnya lapisan nosel atau komponen ruang bakar) agar data performa aktual di lingkungan kerja tinggi dapat dianalisis secara komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering* (3rd ed.). Springer.
- Cui, H., Zhang, L., Lin, C., & Yang, J. (2021). Microstructural tailoring and thermal shock resistance of fiber-reinforced ultra-high-temperature ceramic matrix composites. *Materials & Design*, 202, 109558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109558>
- Fahrenholtz, W. G., Chamberlain, A. L., Hilmas, G. E., & Talmy, I. G. (2007). Ultra-high-temperature ceramics: Materials for extreme environment applications. *The American Ceramic Society Bulletin*, 86(2), 50–57.
- Gasch, M. J., & Johnson, S. M. (2018). *Advances in Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications*. **NASA Technical Reports**, TM-2018-219866.
- Guo, H., Zhang, R., Wang, J., & Huang, Q. (2020). Influence of interfacial reactions on the mechanical performance of UHTC composites: A review. *Ceramics International*, 46(10), 14455–14467. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.053>
- Li, Y., Xu, Y., Guo, S., Zhang, L., & Liu, Y. (2020). Interfacial engineering and toughening strategies for fiber-reinforced ceramic matrix composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(15), 4579–4598. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.010>
- Liu, H., Yang, D., & Cheng, L. (2021). Interfacial design and tailoring of fiber-reinforced ultra-high-temperature ceramic composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 104(9), 4371–4387. <https://doi.org/10.1111/jace.17881>
- Monteverde, F. (2019). *Ultra-high temperature ceramic matrix composites reinforced by carbon or silicon carbide fibers: A review*. **Ceramics International**, 45(15), 18300–18313. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.198>
- Monteverde, F. (2019). Ultra-high temperature ceramic matrix composites reinforced by carbon or silicon carbide fibers: A review. *Ceramics International*, 45(15), 18300–18313. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.198>
- Monteverde, F. (2019). Ultra-high temperature ceramic matrix composites for aerospace applications: A review. *Ceramics International*, 45(15), 18267–18279. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.06.073>

- Zhang, Y., Chen, W., & Liu, H. (2021). Fabrication and mechanical behavior of carbon fiber reinforced UHTCs. *Materials & Design*, 199, 109392. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109392>
- Zhou, Y., Wang, X., Liu, J., & Huang, Q. (2022). Progress in manufacturing of ultra-high-temperature ceramic matrix composites for advanced propulsion systems. *Materials Today*, 52, 63–79. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.12.005>
- Zhou, Y., Zhang, Z., Wang, Y., & Sun, X. (2020). *Ultra-high temperature ceramics for extreme environments: A review*. **Journal of the European Ceramic Society**, 40(13), 4453–4475. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.052>
- Zhou, Y., Zhang, Z., Wang, Y., & Sun, X. (2020). Ultra-high temperature ceramics for extreme environments: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(13), 4453–4475. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.04.052>