

Kajian Kritis Pemanfaatan Thermal Barrier Coating Keramik Terhadap Efisiensi Termal Dan Keandalan Mesin Suhu Tinggi

Moh. Syaiful Anwar¹, Didit Darmawan², M. Andrean Maulana³, Dimas Tri Radityo⁴, M. Firnanda Fahrul Ulum⁵

Universitas Sunan Giri

Published: February, 2026

ABSTRACT

This study critically reviews the use of Thermal Barrier Coating (TBC) on engine components by examining microstructure stability, long-term heat resistance, and the effect of coating quality and material composition on thermal efficiency and resistance in aggressive working environments. Advances in manufacturing technology have opened up new opportunities for the use of Thermal Barrier Coatings (TBC) to protect engine components operating at extreme temperatures, such as internal combustion engines and gas turbines. This study examines the microstructural stability and long-term heat resistance of Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ)-based TBC against repeated thermal cycles and high-temperature oxidation, as well as the influence of coating quality, deposition method, and material composition on thermal efficiency and coating resistance. A qualitative method with literature studies was chosen to synthesize empirical findings from various reliable studies. The results show that TBC maintains a stable columnar structure up to a temperature of 1200°C, but undergoes phase degradation at higher temperatures or repeated thermal cycles, which can reduce mechanical and thermal performance. The growth of Thermally Grown Oxide (TGO) at the bond coat-top coat interface is a critical factor in layer durability, with proper composition and process control capable of maintaining durability. In addition, coating quality and material composition play an important role in heat insulation efficiency and resistance to corrosion and erosion. This study recommends optimizing ceramic materials, microstructure engineering, and deposition techniques to improve the service life and thermal efficiency of modern engine systems. This research provides essential knowledge for the development of reliable and efficient thermal coating technology.

Keywords: Thermal barrier coating, microstructure stability, ceramic coating, thermal efficiency, coating techniques, aggressive working environment, high-temperature machinery.

ABSTRAK

Kajian ini mengulas secara kritis pemanfaatan lapisan Thermal Barrier Coating (TBC) pada komponen mesin dengan menelaah stabilitas mikrostruktur, ketahanan panas jangka panjang, serta pengaruh kualitas pelapisan dan komposisi material terhadap efisiensi termal dan ketahanan di lingkungan kerja agresif. Perkembangan teknologi manufaktur membuka peluang baru dalam pemanfaatan Thermal Barrier Coating (TBC) untuk melindungi komponen mesin yang bekerja pada suhu ekstrem, seperti mesin pembakaran dalam dan turbin gas. Studi ini mengkaji stabilitas mikrostruktur dan daya tahan panas jangka panjang TBC berbasis Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) terhadap siklus termal berulang dan oksidasi suhu tinggi, serta pengaruh kualitas pelapisan, metode deposisi, dan komposisi material terhadap efisiensi termal dan ketahanan lapisan. Metode kualitatif dengan studi literatur dipilih untuk mensintesis temuan empiris dari berbagai penelitian terpercaya. Hasil menunjukkan bahwa TBC mempertahankan struktur kolom stabil hingga suhu 1200°C, namun mengalami degradasi fasa pada suhu lebih tinggi atau siklus termal berulang, yang dapat menurunkan performa mekanik dan termal. Pertumbuhan Thermally Grown Oxide (TGO) di antarmuka bond coat-top coat menjadi faktor kritis dalam ketahanan lapisan, dengan pengendalian komposisi dan proses yang tepat mampu mempertahankan daya tahan. Selain itu, kualitas pelapisan dan komposisi material berperan penting dalam efisiensi isolasi panas dan ketahanan terhadap korosi dan erosi. Studi ini merekomendasikan pengoptimalan material keramik, rekayasa mikrostruktur, dan teknik deposisi untuk meningkatkan umur pakai dan efisiensi termal sistem mesin modern. Penelitian ini memberikan kontribusi pengetahuan yang esensial untuk pengembangan teknologi pelapisan termal yang andal dan efisien.

Kata kunci: Thermal barrier coating, stabilitas mikrostruktur, lapisan keramik, efisiensi termal, teknik pelapisan, lingkungan kerja agresif, mesin suhu tinggi

PENDAHULUAN

Pada era kemajuan teknologi manufaktur, pemanfaatan pelapis keramik thermal barrier coating (TBC) pada komponen mesin semakin menunjukkan relevansi tinggi. Lapisan keramik ini diperkenalkan untuk menghadirkan solusi perlindungan termal terhadap komponen mesin yang bekerja dalam suhu ekstrem, seperti pada mesin pembakaran dalam dan turbin gas. Dalam evolusi industri modern, peningkatan beban kerja mesin dan tuntutan efisiensi energi telah mendorong penelitian untuk menemukan material pelapis yang mampu mengisolasi panas secara efektif, sehingga umur operasional komponen meningkat. Transformasi ini didorong oleh kebutuhan akan performa yang lebih tinggi, pengurangan konsumsi bahan bakar, serta tuntutan pengendalian emisi yang lebih ketat sejalan dengan kebijakan energi global.

Dalam praktiknya, aplikasi TBC didasarkan pada prinsip isolasi panas antara zona reaksi pembakaran dan struktur inti logam. Keramik, khususnya berbasis zirkonia, berperan sebagai penghalang panas sehingga suhu pada substrat berkurang secara signifikan dibandingkan dengan mesin tanpa pelapis. Efektivitas sistem ini telah dibahas oleh banyak peneliti, menyoroti kemampuan lapisan keramik untuk menahan dan menghamburkan energi termal pada suhu melebihi 1200°C (Padture et al., 2002). Uji laboratorium dan aplikasi lapangan memperlihatkan bahwa TBC dapat menekan risiko deformasi termal, pengelupasan serta menunda proses kelelahan logam, menciptakan paradigma baru dalam perlindungan komponen mesin berkecepatan tinggi.

Peningkatan efisiensi termal menjadi tujuan utama dari adopsi TBC pada piston dan ruang bakar mesin. Kombinasi sifat isolasi panas dengan kestabilan mikrostruktur lapisan pelindung menawarkan peluang besar bagi pelaku industri otomotif dan pembangkit energi untuk meraih efisiensi lebih baik (Prabha et al., 2025). Namun, kandungan lapisan, teknik deposisi, dan interaksi mikrostruktur masih menjadi fokus penelitian, mengingat pengaruhnya yang sangat nyata terhadap kinerja lapangan. Eksplorasi metode deposisi seperti air plasma spray (APS) dan electron beam physical vapor deposition (EBPVD) telah membawa kemajuan signifikan, meski tantangan ekonomi dan kompleksitas proses masih menyisakan pertanyaan tentang implementasi massal dalam skala manufaktur nasional (Xie et al., 2004).

Meskipun manfaat TBC telah diakui luas, sejumlah besar studi terus mengkaji lebih lanjut keberlanjutan performa thermal barrier coatings ketika dipaparkan pada lingkungan kerja yang dinamis dan agresif. Fokus perhatian pada aspek perlindungan panas dan mencakup juga ketahanan lapisan terhadap oksidasi, erosi, serta kompatibilitas kimia pada batas antar lapisan (Chicet et al., 2025). Faktor-faktor seperti pengelolaan porositas, kawalan difusi, serta desain lapisan bond coat dan thermal grown oxide (TGO) menjadi esensial untuk menentukan keandalan lapisan pelindung sepanjang masa kerja komponen mesin.

Permasalahan utama dalam penerapan TBC sangat erat kaitannya dengan terjadinya degradasi mikrostruktur akibat siklus termal tinggi dan fenomena oksidasi yang progresif. Studi telah menunjukkan bahwa perubahan mikrostruktur pada lapisan thermal grown oxide yang tumbuh antara bond coat dan lapisan keramik rawan memicu terjadinya delaminasi dan retakan mikro, menurunkan daya tahan komponen pada rentang siklus termal berulang (Sudiro et al., 2007). Permasalahan ini semakin diperparah akibat fluktuasi suhu operasi, yang menyebabkan ekspansi termal tak merata, menghasilkan tegangan internal pada lapisan yang berbeda. Sherwin dan Raju (2025) menyatakan bahwa akumulasi tegangan ini dapat mempercepat terjadinya kegagalan prematur pada TBC jika pemilihan material dan desain mikrostruktur tidak diperhitungkan matang-matang sejak awal.

Persoalan lain yang tidak kalah penting yakni ketidakseragaman kualitas pelapisan akibat teknologi deposisi yang masih mengalami variabilitas secara signifikan pada tingkat industri (Xie et al., 2004). Faktor-faktor seperti porositas, ketebalan lapisan, dan ikatan antara substrat dengan keramik sangat menentukan efektifitas TBC untuk mengisolasi panas dan menahan agresi lingkungan. Perbedaan sifat fisik substrat dengan lapisan pelapis juga menimbulkan tantangan untuk menjaga kohesi lapisan selama masa pakai mesin. Hal ini disoroti oleh Stiger et al. (2000) yang menyatakan bahwa sistem pelapisan canggih sekalipun tetap berisiko mengalami cacat struktural jika desain dan implementasi tidak optimal.

Selain faktor termal, korosi dan erosi juga menjadi ancaman serius bagi keandalan komponen mesin yang dilindungi TBC. Lapisan keramik memang menawarkan proteksi primer terhadap serangan panas, namun erosi akibat partikel abrasif dan efek kimia pada lingkungan kerja mesin dapat mempercepat kerusakan lapisan pelindung, sehingga memperbesar peluang kegagalan (Chicet et al., 2025). Permukaan pelapis yang tidak didukung dengan material penguat batas butir atau desain mikrostruktur yang adaptif, rentan mengalami cacat dan penurunan fungsi secara progresif. Modifikasi komposisi dan struktur lapisan untuk menghadapi interaksi multistres menjadi topik penting untuk meningkatkan reliabilitas sistem TBC (Barmavatu, 2025).

Kritikalitas masalah-masalah di atas mendorong peneliti dan insinyur untuk mengembangkan metode pelapisan dengan tata kelola biaya serta keefektifan teknologi yang seimbang. Pencapaian efisiensi termal melalui TBC tidak dapat dilepaskan dari konvergensi antara kualitas material, teknik pelapisan, serta kemampuan untuk menjaga stabilitas lapisan pada kondisi operasi ekstrem (Padture et al., 2002). Pengembangan teknologi tersebut menuntut pendekatan kolaboratif antara disiplin ilmu material, teknik termal, dan teknologi manufaktur.

Dalam ranah rekayasa termal dan material, penggunaan lapisan keramik atau Thermal Barrier Coating (TBC) telah diakui sebagai pendekatan strategis guna mengatasi tantangan suhu ekstrem di sistem pembakaran dan turbin gas. TBC dirancang untuk menjaga permukaan logam dari eksposur panas tinggi, memperpanjang usia komponen, serta mengoptimalkan efisiensi kerja mesin. Di balik keunggulannya, lapisan ini masih menyisakan persoalan fundamental berupa ketahanan panas jangka panjang dan konsistensi performa dalam tekanan operasi yang dinamis. Terutama, perubahan mikrostruktur akibat siklus panas dan pertumbuhan lapisan TGO yang tak terkendali seringkali mengantarkan pada kegagalan sistem pelapis dan menurunkan efektivitas pelindung termal (Sudiro et al., 2007).

Permasalahan mendalam terletak pada degradasi lapisan akibat kombinasi siklus panas dan oksidasi, dengan TGO yang membesar secara progresif dapat menyebabkan terlepasnya pelapis serta munculnya retakan mikro. Tantangan ini terbukti sangat krusial pada mesin pembangkit dan turbin gas yang beroperasi di atas 1100°C, terutama bila kestabilan bond coat serta mikrostruktur lapisan tidak terjaga (Padture et al., 2002). Penelitian menampilkan bahwa keandalan sistem tergantung pada desain bond coat serta pengendalian pertumbuhan TGO selama operasi. Kegagalan sistem biasanya bermula dari retakan mikro pada antarmuka, yang mana secara akumulatif mempercepat laju delaminasi dan penurunan perlindungan.

Efektivitas TBC untuk memberi perlindungan termal masih diimbangi oleh tantangan pada variabel pelapisan, pemilihan material, dan kecocokan teknik deposisi yang digunakan. Proses pelapisan seperti APS atau EBPVD memang menawarkan pengaruh positif terhadap performa termal, namun eksekusi proses ini secara luas di industri nasional masih terbentur persoalan biaya dan efisiensi proses. Tuntutan efektivitas pelapisan, serta ketersediaan teknologi yang dapat diaplikasikan secara ekonomis, menjadi penentu utama agar TBC dapat diadopsi secara meluas di sisi manufaktur domestik (Xie et al., 2004).

Ancaman korosi dan erosi dalam lingkungan operasi agresif juga menambah tingkat kompleksitas permasalahan yang dihadapi. Ketahanan pelapis terhadap uap kimia serta tekanan mekanis kerap tidak tercapai secara optimal jika desain pelapis kurang adaptif terhadap lingkungan eksternal. Upaya untuk meningkatkan kekuatan sistem pelapis melalui modifikasi mikrostruktur dan penambahan elemen penguat batas butir tetap memerlukan penelitian lanjutan agar kinerja termal dan ketahanan lapisan tetap terjaga (Barmavatu, 2025).

Hal tersebut menjadi penting untuk diamati mengingat performa TBC tidak saja berdampak pada ketahanan dan keandalan komponen strategis, melainkan juga pada efisiensi energi dan keberlanjutan sistem produksi. Peningkatan suhu operasi yang aman, jika dicapai melalui pelapisan efektif, berpotensi menekan konsumsi bahan bakar, mengurangi emisi, dan memperpanjang interval perawatan. Pada tingkat industri, efisiensi termal yang stabil akan memberikan kontribusi nyata pada penurunan biaya operasional dan kompetitifnya manufaktur mesin di pasar global (Padture et al., 2002). Selain itu, dinamika keterbatasan teknologi deposisi dan tantangan material lokal menegaskan

kebutuhan akan eksplorasi teknologi baru yang mampu mengedepankan kestabilan fisik dan kimia lapisan TBC. Observasi terhadap perilaku interaksi antar lapisan serta dampak lingkungan operasi akan memperkaya pengetahuan mengenai strategi terbaik untuk meningkatkan performa pelapisan di masa mendatang (Muthusamy et al., 2025).

Rumusan masalah dapat dinyatakan sebagai berikut:

1. Bagaimana stabilitas mikrostruktur dan daya tahan panas jangka panjang pada Thermal Barrier Coating terhadap siklus termal berulang dan oksidasi suhu tinggi?
2. Sejauh mana kualitas pelapisan, metode deposisi, dan komposisi material mempengaruhi efisiensi termal aktual sekaligus ketahanan terhadap korosi dan erosi dalam lingkungan kerja agresif?

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menginvestigasi secara kritis tentang stabilitas mikrostruktur dan daya tahan panas jangka panjang pada thermal barrier coating berbasis keramik terhadap siklus termal berulang dan oksidasi suhu tinggi, serta menelaah pengaruh kualitas pelapisan, metode deposisi, dan komposisi material terhadap efisiensi termal aktual serta ketahanan lapisan terhadap korosi dan erosi dalam lingkungan kerja yang agresif. Hasil kajian diharapkan mampu memberikan kontribusi berupa basis pengetahuan terkini yang relevan bagi pengembangan material pelapis, perancangan teknik deposisi, serta inovasi teknologi manufaktur TBC yang berorientasi pada peningkatan efisiensi dan keandalan sistem mesin modern.

METODE PENELITIAN

Pendekatan penelitian yang digunakan dalam kajian ini bersifat kualitatif dengan metode studi literatur, yang dirancang untuk mengumpulkan, mengidentifikasi, dan mensintesis pengetahuan empiris terpilih dari beragam sumber ilmiah terkait Thermal Barrier Coating pada komponen mesin. Studi literatur dianggap sangat efektif untuk mengkaji persoalan yang memerlukan eksplorasi mendalam terhadap penelitian terdahulu, tanpa intervensi eksperimen langsung. Metode ini memungkinkan peneliti untuk menganalisis tren, membandingkan temuan lintas waktu, serta memahami evolusi teknologi dari berbagai perspektif. Proses identifikasi dan seleksi sumber literatur dilakukan secara sistematis dengan mempertimbangkan kredibilitas sumber, relevansi, dan kualitas publikasi sebagaimana disarankan oleh Creswell (2014) dalam "Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches".

Dalam pelaksanaannya, metode sintesis tematik diterapkan untuk menyusun dan mengelompokkan data literatur menurut tema tertentu yang relevan dengan pertanyaan penelitian. Miles, Huberman, dan Saldana (2014) menyatakan bahwa sintesis tematik memungkinkan peneliti untuk menelaah keterhubungan antar temuan secara terstruktur, sehingga potret konseptual dan empirik dapat digambarkan secara terperinci. Analisis dilakukan dengan cara membaca secara berulang, melakukan interpretasi kritis, dan membandingkan setiap temuan dengan kerangka teori yang relevan. Setiap tema utama yang berhasil diidentifikasi lalu dipetakan untuk membangun narasi yang utuh mengenai tantangan sistem pelapisan TBC pada mesin suhu tinggi.

Selanjutnya, validitas dan reliabilitas hasil kajian diperkuat dengan menerapkan strategi triangulasi sumber dan konfirmasi kesesuaian kutipan dengan publikasi aslinya. Strategi ini penting untuk menjamin bahwa seluruh argumen yang diangkat memiliki dasar fakta yang kuat dan dapat dipertanggungjawabkan. Sejalan dengan panduan yang dikemukakan oleh Merriam dan Tisdell (2015), kualitas studi literatur sangat dipengaruhi oleh ketelitian analisis dan konsistensi antara bukti empiris dan simpulan yang dihasilkan. Seluruh literatur yang digunakan berasal dari jurnal peer-reviewed, buku metodologi tertulis, serta buku standar dalam ilmu material teknik mesin.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Stabilitas Mikrostruktur Dan Daya Tahan Panas Thermal Barrier Coating

Hasil pengujian menunjukkan bahwa stabilitas mikrostruktur Thermal Barrier Coating (TBC) sangat dipengaruhi oleh jenis material keramik, ketebalan lapisan, serta kondisi termal selama operasi. Pada umumnya, lapisan TBC berbasis Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) mempertahankan struktur kolumnar yang baik hingga suhu sekitar 1200°C. Namun, ketika temperatur melebihi batas tersebut atau terjadi siklus termal berulang, struktur kolumnar

mulai mengalami degradasi, ditandai dengan pertumbuhan butir, retakan mikro, dan perubahan fasa dari tetragonal menjadi monoklinik (Santosa, 2007). Perubahan fasa ini menyebabkan penurunan sifat mekanik dan termal, yang berpengaruh langsung terhadap performa lapisan pelindung.

Dari hasil analisis mikroskopis, terlihat bahwa lapisan antarmuka antara bond coat dan top coat merupakan area paling rentan terhadap degradasi termal. Oksidasi pada bond coat (biasanya berbasis NiCrAlY) membentuk lapisan oksida pelindung tipis (Thermally Grown Oxide, TGO). Dalam jangka panjang, penebalan TGO dapat menimbulkan tegangan termal dan memicu delaminasi pada lapisan TBC. Meskipun demikian, jika pertumbuhan TGO berlangsung secara terkendali dan merata, stabilitas mikrostruktur dapat tetap terjaga (Rakiman et al, 2021). Oleh karena itu, pengendalian komposisi bond coat dan proses deposisi menjadi faktor penting dalam mempertahankan daya tahan lapisan.

Dalam pengujian daya tahan panas (thermal cycling test), lapisan TBC menunjukkan kemampuan isolasi termal yang efektif dengan menurunkan suhu substrat logam hingga 100–200°C dibandingkan tanpa pelapis. Namun, setelah sejumlah siklus pemanasan dan pendinginan, sebagian sampel mengalami retak dan spallation (pengelupasan) akibat ekspansi termal yang berulang. Fenomena ini mengindikasikan bahwa selain stabilitas fasa keramik, kecocokan koefisien ekspansi termal (CTE) antara lapisan-lapisan juga berperan besar terhadap ketahanan TBC. Ketidaksesuaian CTE dapat menyebabkan akumulasi tegangan yang akhirnya mempercepat kerusakan lapisan (James, 2017).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa stabilitas mikrostruktur dan daya tahan panas TBC dapat dioptimalkan melalui pemilihan material keramik yang tepat, rekayasa mikrostruktur kolumnar, serta pengendalian pertumbuhan TGO pada antarmuka. Material alternatif seperti rare-earth zirconates (misalnya $Gd_2Zr_2O_7$) menunjukkan ketahanan lebih baik pada suhu tinggi dibanding YSZ, meskipun memiliki konduktivitas termal yang sedikit lebih tinggi. Dengan kombinasi material dan desain lapisan yang sesuai, TBC dapat memberikan perlindungan jangka panjang terhadap komponen mesin turbin atau ruang bakar, sehingga meningkatkan efisiensi termal dan umur pakai sistem secara keseluruhan.

Pengaruh Kualitas Pelapisan dan Komposisi Material Terhadap Efisiensi Termal dan Ketahanan

Pengaruh kualitas pelapisan dan komposisi material terhadap efisiensi termal dan ketahanan sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter proses seperti suhu, waktu, arus listrik, dan bahan yang digunakan. Berdasarkan hasil pencarian, beberapa studi menunjukkan bahwa proses pelapisan dengan parameter yang tepat dapat meningkatkan efisiensi termal serta ketahanan permukaan material. Kualitas pelapisan sangat dipengaruhi oleh parameter proses seperti suhu dan waktu pelapisan. Contohnya, penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu dan waktu pelapisan dapat meningkatkan ketebalan dan kekerasan lapisan, yang berkontribusi terhadap ketahanan terhadap aus dan korosi. Selain itu, proses pelapisan yang tidak optimal dapat menyebabkan ketebalan lapisan yang tidak merata dan kualitas yang menurun, sehingga mengurangi efisiensi isolasi termal.

Komposisi bahan pelapis, seperti penambahan aditif dan bahan isolator, dapat memperbaiki sifat termal dan ketahanan bahan. Bahan dengan konduktivitas termal rendah, seperti bahan berbasis keramik maupun isolator, mampu meningkatkan efisiensi dalam menghambat transfer panas. Konsentrasi larutan dan rapat arus juga berperan penting dalam proses elektroplating dan hot dip galvanizing, yang mempengaruhi ketebalan lapisan dan kekuatan mekaniknya. Teknologi pelapisan modern seperti arc wire spray dan powder coating menunjukkan bahwa parameter proses seperti tekanan dan suhu juga berpengaruh besar terhadap kualitas pelapisan. Pelapisan yang dilakukan dengan parameter optimal mampu meningkatkan ketahanan terhadap suhu ekstrem dan korosi, sehingga memperpanjang usia material dan meningkatkan efisiensi termal.

Hasil penelitian menunjukkan kualitas pelapisan dan komposisi material secara signifikan mempengaruhi efisiensi termal serta ketahanan material. Parameter proses seperti suhu, waktu, arus listrik, dan bahan harus dikendalikan secara ketat agar mendapatkan lapisan yang optimal, kuat, dan tahan lama. Pengembangan bahan dan teknologi pelapisan yang tepat akan sangat membantu meningkatkan performa material dalam berbagai aplikasi industri dan energi.

PENUTUP

Pemanfaatan Thermal Barrier Coating (TBC) berbasis keramik pada komponen mesin menawarkan perlindungan termal signifikan dan potensi peningkatan efisiensi termal yang nyata. Stabilitas Thermal Barrier Coating (TBC) dipengaruhi oleh material, ketebalan, dan kondisi termal. TBC berbasis YSZ tahan hingga 1200°C, namun siklus panas berulang bisa merusak mikrostruktur dan menurunkan performa, terutama di antarmuka bond coat yang rentan oksidasi. Kualitas pelapisan dan komposisi material sangat penting untuk efisiensi termal dan ketahanan. Pengaturan proses pelapisan yang tepat dan penggunaan bahan isolator meningkatkan daya tahan serta umur pakai material dalam aplikasi suhu tinggi.

Hasil penelitian tentang stabilitas mikrostruktur dan daya tahan panas Thermal Barrier Coating (TBC) serta pengaruh kualitas pelapisan memiliki beberapa implikasi penting bagi pengembangan teknologi pelapisan dan aplikasi industri. Pertama, pemilihan material keramik yang tepat dan rekayasa mikrostruktur kolumnar menjadi kunci untuk meningkatkan ketahanan TBC pada suhu tinggi dan siklus termal berulang. Dengan demikian, produsen komponen turbin dan ruang bakar harus fokus pada material alternatif seperti rare-earth zirconates yang menawarkan performa lebih baik daripada YSZ pada kondisi ekstrem. Kedua, pengendalian ketat parameter proses pelapisan seperti suhu, waktu, arus listrik, dan tekanan serta komposisi material bond coat dan top coat sangat diperlukan agar lapisan pelindung optimal, homogen, dan tahan lama. Teknologi pelapisan modern yang dikombinasikan dengan bahan isolator berkonduktivitas rendah mampu memperpanjang umur pakai material sekaligus meningkatkan efisiensi termal sistem industri dan energi. Implikasi ini menunjukkan pentingnya integrasi antara riset material dan pengembangan proses produksi untuk menghasilkan pelapisan berkinerja tinggi dan biaya operasional yang lebih efisien.

Saran konkrit untuk masa depan adalah mengembangkan material keramik alternatif yang lebih tahan suhu tinggi, meningkatkan kontrol proses pelapisan dengan teknologi otomatisasi, mengoptimalkan komposisi bond coat untuk mengendalikan pertumbuhan oksida, serta memanfaatkan simulasi untuk menyesuaikan koefisien ekspansi termal antar lapisan. Selain itu, penelitian lanjut pada aditif dan teknologi pelapisan modern harus terus dilakukan guna meningkatkan efisiensi isolasi termal dan ketahanan korosi, sehingga memperpanjang umur pakai dan meningkatkan performa TBC dalam aplikasi industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Barmavatu, P. (2025). Finite element analysis of thermal barrier properties under relevance vector machine in coated pistons and blades. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 239(1), 288-305.
- Chicet, D. L., Juhasz, J., Cotruț, C. M., Istrate, B., & Munteanu, C. (2025). Assessment of the corrosion resistance of thermal barrier coatings on internal combustion engine components. *Materials*, 18(6), 1227.
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (4th Edition). SAGE Publications.
- Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2015). *Qualitative Research: A Guide to Design and Implementation* (4th Edition). Jossey-Bass.
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldana, J. (2014). *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook* (3rd Edition). SAGE Publications.
- Muthusamy, J., Panithasan, M. S., Venkadesan, G., & Mariappan, M. (2025). Computational and experimental analysis of yttria stabilized zirconia thermal barrier coated pistons: Impact on temperature distribution, microstructure, CRDI engine performance, emissions, and energy balance. *Applied Thermal Engineering*, 267, 125731.
- Padture, N. P., Gell, M., & Jordan, E. H. (2002). Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*, 296(5566), 280-284. <https://doi.org/10.1126/science.1068609>

- Prabha, K. A., Kumar, P. P., Balashowry, K., Swetha, S., & Morampudi, P. (2025, March). A Review on Thermal Barrier Coating on Piston of IC Engine. In International Conference on Advanced Materials, Manufacturing and Sustainable Development (ICAMMSD 2024) (pp. 923-933). Atlantis Press.
- Rakiman, R., Hanif, H., Menhendry, M., Maimuzar, M., & Yetri, Y. (2021). Analisa Kekerasan dan Ketebalan Permukaan Lapisan Hasil Elektroplating Kuningan Pada Baja. JST (Jurnal Sains Terapan), 7(1), 43-48.
- Seals, R. D., et al. (2000). Thermal barrier coating for alloy system. United States Patent No. 6,071,628.
- Sherwin, C., & Raju, K. (2025). Advancements in thermal barrier coatings for internal combustion (IC) engines. Zastita Materijala, 66(1), 196-205.
- Stiger, M. J., et al. (2000). Thermal barrier coatings for the 21st century. Department of Materials Science and Engineering, University of Pittsburgh.
- Sudiro, T., Tetuko, A. P., Kusnandar, H., & Thosin, K. A. Z. (2007). Pelapisan Thermal Barrier Coating (TBC) NiAl pada Paduan Logam Berbasis Co. Jurnal Fisika dan Aplikasinya, 3(2).
- Xie, L., et al. (2004). Surface and Coating Technology, Elsevier, 178, 103–107.