

Desain Ulang Nozzle Burner Berbasis Coating Keramik dalam Upaya Reduksi Erosi

Noval Aagym rahmadani (Mahasiswa), Elisa Sulistyorini (Dosen Pembimbing)
Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
Jalan Semolowaru No. 45 Surabaya 60118, Tel. 031-5931800, Indonesia
email: rahmadaninoval74@gmail.com

ABSTRAK

Pelapisan keramik berbasis Zirconia (ZrO_2) pada nozzle burner telah terbukti mampu menurunkan laju erosi secara signifikan pada sistem pembakaran PLTU. Melalui simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics), penggunaan pelapis ini mampu menekan laju erosi dari $1,48 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ menjadi $4,15 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$, serta memperpanjang umur pakai komponen dari ± 6 bulan menjadi ± 18 bulan. Pelapis keramik tidak hanya meredam energi tumbukan partikel batu bara, tetapi juga membantu menstabilkan pola aliran, memperbaiki distribusi tekanan, dan meningkatkan efisiensi termal. Artikel ini berfokus penuh pada evaluasi hasil performa pelapisan tanpa membahas aspek desain atau modifikasi geometri secara mendalam. Hasil menunjukkan bahwa pelapisan keramik merupakan pendekatan teknis yang efektif dan aplikatif dalam meningkatkan keandalan komponen burner di PLTU.

Kata kunci: pelapis keramik, nozzle burner, erosi, Zirconia, CFD, PLTU.

ABSTRACT

The application of ceramic coating based on Zirconia (ZrO_2) on PLTU burner nozzles has proven to significantly reduce erosion rates in coal combustion systems. Through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations, this coating reduced erosion rates from $1.48 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ to $4.15 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ and extended the component's service life from approximately 6 months to 18 months. The ceramic layer not only absorbs the impact energy of coal particles but also stabilizes the flow pattern, improves pressure distribution, and enhances thermal efficiency. This study focuses entirely on the performance results of the coating, without discussing geometric modifications. The findings confirm that ceramic coating is an effective and applicable technical solution to improve component reliability in coal-fired power plant burners.

Keywords: ceramic coating, burner nozzle, erosion, Zirconia, CFD, coal-fired power plant.

PENDAHULUAN

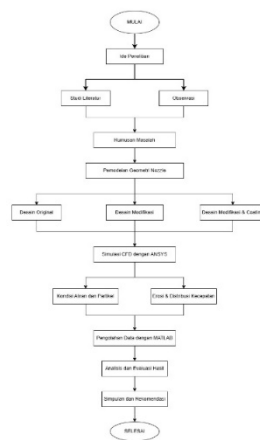
Salah satu tantangan utama dalam sistem pembakaran batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah erosi komponen akibat paparan partikel abrasif dan suhu tinggi. Nozzle burner merupakan salah satu komponen yang sangat rentan terhadap kerusakan ini karena posisinya yang langsung terpapar aliran campuran udara dan partikel batu bara. Erosi yang terjadi secara terus-menerus menyebabkan penurunan efisiensi pembakaran dan menurunkan umur pakai komponen, yang berdampak pada meningkatnya biaya operasional dan pemeliharaan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penerapan pelapis berbahan keramik menjadi alternatif solusi yang menjanjikan. Material keramik seperti Zirconia (ZrO_2) telah terbukti memiliki ketahanan tinggi terhadap abrasi dan suhu ekstrem. Karakteristik fisik seperti

kekerasan tinggi, ketahanan terhadap retak termal, serta kemampuan menahan deformasi akibat tumbukan partikel menjadikan Zirconia sebagai kandidat pelapis unggulan untuk melindungi komponen dalam lingkungan kerja ekstrem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja pelapis keramik berbasis Zirconia pada permukaan nozzle burner PLTU melalui simulasi berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD). Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi sejauh mana efektivitas pelapisan tersebut dalam mengurangi laju erosi, memperpanjang umur pakai komponen, serta dampaknya terhadap efisiensi termal sistem pembakaran secara keseluruhan.

PROSEDUR EKSPERIMEN

Penelitian ini merupakan jenis penelitian terapan (*applied research*) yang bertujuan memberikan solusi teknis terhadap permasalahan erosi pada nozzle burner di sistem pembakaran batu bara PLTU Paiton Unit 3, 7, dan 8. Pendekatan yang digunakan bersifat



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

kuantitatif eksperimental berbasis simulasi numerik dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pendekatan ini dipilih karena mampu memodelkan fenomena aliran dan interaksi partikel dalam sistem pembakaran secara presisi, tanpa perlu pengujian langsung di lapangan.

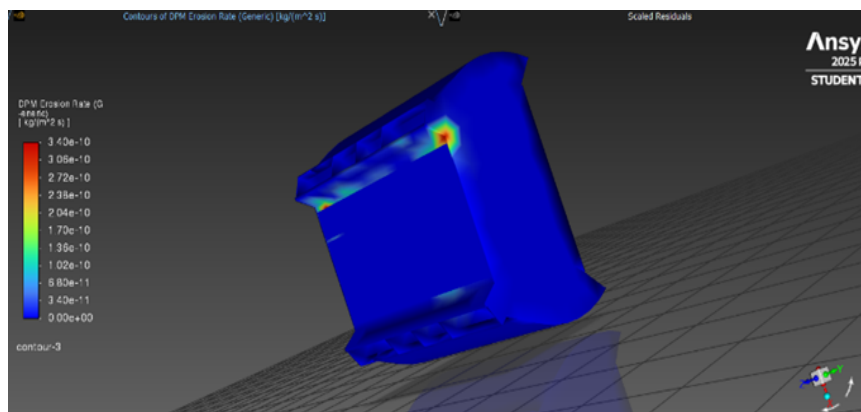
Simulasi dilakukan pada dua model desain nozzle: desain modifikasi tanpa pelapis, dan desain modifikasi dengan pelapis keramik berbahan dasar Zirconia (ZrO_2). Masing-masing model dianalisis berdasarkan distribusi aliran, tekanan, dan laju erosi yang ditimbulkan akibat tumbukan partikel batu bara terhadap dinding nozzle. Pemilihan pelapis berbahan keramik seperti Zirconia dan Alumina dilakukan karena sifatnya yang tahan panas dan ab. Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi geometri nozzle dan penggunaan material pelapis. Variabel terikat adalah laju erosi dan distribusi partikel batu bara, sedangkan variabel kendali mencakup suhu, tekanan, serta laju aliran udara dan batu bara. Keseluruhan tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah, pengumpulan data, pemodelan geometri dalam CAD, penyusunan domain simulasi, pelaksanaan simulasi CFD menggunakan ANSYS Fluent, hingga analisis hasil dan penarikan kesimpulan.

Alat bantu yang digunakan antara lain perangkat lunak Inventor untuk desain 3D serta ANSYS Fluent Student Version untuk pemodelan dan simulasi. Analisis dilakukan dengan meninjau kontur aliran, kecepatan partikel, grafik erosi, dan nilai maksimum erosi pada tiap desain nozzle. Hasil simulasi ini digunakan untuk memprediksi efektivitas perlindungan permukaan, sekaligus memperkirakan umur pakai masing-masing desain.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah erosi pada nozzle burner batubara halus yang digunakan dalam sistem pembakaran PLTU. Nozzle ini mengalami kerusakan karena terpapar temperatur tinggi dan aliran partikel abrasif, yang dalam jangka panjang menyebabkan penurunan efisiensi pembakaran. Tiga desain nozzle dianalisis dengan simulasi numerik CFD menggunakan ANSYS Fluent, yaitu desain modifikasi tanpa pelapis, dan desain modifikasi dengan pelapis keramik berbasis Zirconia (ZrO_2). Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi efektivitas masing-masing desain dalam menahan laju erosi dan mendistribusikan aliran secara optimal.

Simulasi Desain Tanpa Pelapis

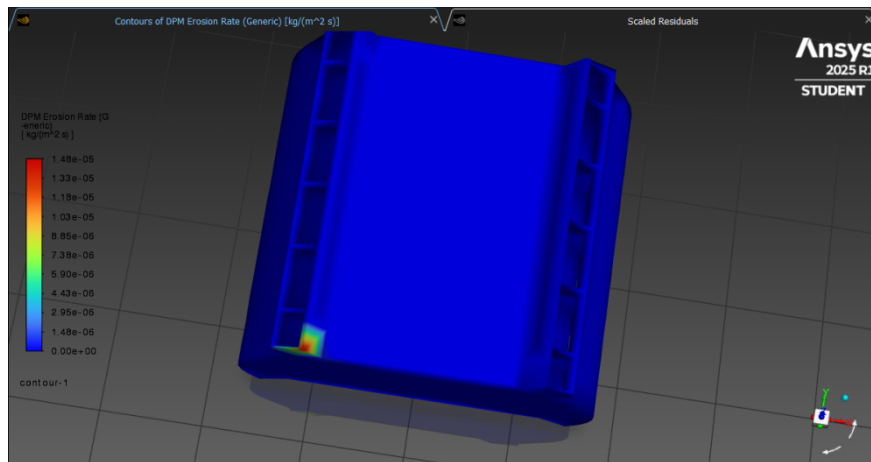


Gambar 2 Erosi desain tanpa pelapis

Desain modifikasi geometri tanpa pelapis memiliki pendekatan berbeda dengan merancang ulang sudut dan konfigurasi baffle nozzle. Tujuannya adalah menciptakan aliran fluida yang lebih terarah dan distribusi tekanan yang lebih merata. Gambar 2 memperlihatkan bahwa modifikasi ini memang berhasil mengubah pola erosi yang sebelumnya terkonsentrasi menjadi lebih menyebar. Warna dominan menunjukkan bahwa erosi terjadi secara luas di permukaan, tanpa titik ekstrem, namun dengan intensitas abrasi yang tetap tinggi, tidak adanya lapisan pelindung pada desain ini menjadi kelemahan utama. Partikel abrasif tetap mengenai permukaan logam secara langsung dengan kecepatan yang tinggi. Akibatnya, meskipun aliran sudah lebih stabil, keausan tetap terjadi secara merata dan mengurangi ketebalan material di seluruh bagian nozzle. Distribusi tekanan pada desain ini menunjukkan pola yang relatif simetris, namun tetap menciptakan zona turbulen pada beberapa titik, khususnya di sekitar outlet, yang mempercepat proses erosi.

Berdasarkan hasil simulasi, laju erosi pada desain ini mencapai $1,48 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi geometri saja tidak cukup untuk mengurangi abrasi jika tidak didukung dengan material pelindung. Umur pakai nozzle diperkirakan hanya bertahan sekitar 6 bulan dalam kondisi operasional aktual, sehingga diperlukan pendekatan tambahan untuk meningkatkan durabilitas.

Simulasi Desain Dengan Pelapis



Gambar 2 Erosi desain dengan pelapis

Pelapisan keramik berbasis Zirconia menunjukkan pengaruh signifikan dalam menekan laju erosi pada nozzle burner. Berdasarkan hasil simulasi, laju erosi maksimum pada nozzle tanpa pelapis tercatat sebesar $1,48 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Setelah ditambahkan pelapis keramik, angka ini menurun drastis menjadi $4,15 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Penurunan ini mengindikasikan efektivitas tinggi dari lapisan pelindung dalam menghadapi tumbukan partikel batu bara. Dari sisi distribusi erosi, nozzle tanpa pelapis mengalami abrasi merata pada seluruh dinding internal. Sebaliknya, nozzle dengan pelapis menunjukkan penyebaran abrasi yang lebih terkendali dan terkonsentrasi pada area tertentu, dengan intensitas yang jauh lebih rendah. Hal ini membuktikan bahwa pelapis tidak hanya mengurangi laju abrasi tetapi juga mengontrol lokasi kerusakan agar tidak menyebar luas.

Efek lain yang dicapai dari pelapisan adalah peningkatan stabilitas aliran. Simulasi menunjukkan bahwa aliran gas pada nozzle berpelapis lebih terarah dan minim turbulensi. Zona stagnan dan daerah tekanan rendah yang biasanya menjadi titik awal kerusakan berhasil diminimalkan. Peningkatan kestabilan aliran ini juga berdampak pada efisiensi termal karena panas lebih terdistribusi merata tanpa kehilangan signifikan. Estimasi umur pakai nozzle berdasarkan hasil simulasi menunjukkan peningkatan dari ± 6 bulan pada nozzle tanpa pelapis menjadi $\pm 15\text{--}18$ bulan pada nozzle dengan pelapis Zirconia. Peningkatan ini memberikan keuntungan signifikan dalam konteks operasional industri, termasuk pengurangan biaya perawatan, peningkatan ketersediaan sistem, serta efisiensi energi secara keseluruhan.

Perbandingan Kinerja Desain Nozzle

Tabel 1 Perbandingan Kinerja Desain Nozzle

Parameter	Tanpa Pelapis	Dengan Pelapis	Umur Pakai
Laju Erosi Maks ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	1.48e-05	4.15e-06	$\pm 15\text{--}18$ bulan
Distribusi Erosi	Menyebar	Tersebar merata	
Konvergensi Simulasi	Kurang stabil	Stabil	
Kompleksitas Desain	Sedang	Tinggi	

Perbandingan antara kedua desain menunjukkan bahwa modifikasi geometri dan penambahan pelapis memberikan hasil paling optimal dalam menghadapi erosi pada nozzle burner. Hasil desain tanpa pelapis justru menunjukkan laju erosi sangat tinggi (1.48×10^{-5} kg/m²·s), dengan pola erosi yang menyebar akibat tidak adanya proteksi permukaan, yang mempercepat kerusakan merata di seluruh permukaan nozzle. Sebaliknya, desain dengan pelapis berbahan dasar Zirconia mampu menurunkan laju erosi secara signifikan (4.15×10^{-6} kg/m²·s) dan mendistribusikannya secara merata serta stabil, sehingga memberikan perlindungan menyeluruh terhadap kerusakan abrasif. Dalam hal kompleksitas, desain tanpa pelapis berada pada tingkat sedang, dan desain dengan pelapis tergolong kompleks karena membutuhkan proses fabrikasi tambahan. Namun demikian, desain dengan pelapis menawarkan umur pakai paling panjang, yaitu sekitar ± 15 – 18 bulan, dan tanpa pelapis (± 6 bulan). Hal ini menjadikan desain dengan pelapis sebagai solusi teknis yang paling ideal dalam meningkatkan durabilitas, kestabilan aliran, serta efisiensi pemeliharaan jangka panjang di sistem pembakaran PLTU.

KESIMPULAN DAN SARAN

Pelapisan keramik Zirconia terbukti mampu memberikan perlindungan maksimal terhadap erosi pada nozzle burner PLTU. Hasil simulasi menunjukkan peningkatan umur pakai hingga tiga kali lipat dan peningkatan efisiensi sistem pembakaran. Teknologi pelapisan ini sangat layak untuk diimplementasikan dalam lingkungan industri dengan paparan abrasif dan termal tinggi.

Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada variasi material pelapis lainnya serta pengujian eksperimental untuk memverifikasi hasil simulasi. Metode pelapisan seperti plasma spray juga direkomendasikan untuk diteliti dari segi kekuatan adhesi dan ketebalan optimal.

REFERENSI

- Li, K., dkk. 2019. "Performance Analysis of Plasma Sprayed Alumina and Zirconia Coatings in High Temperature Erosion Environment," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 375, hlm. 897–904.
- Zhang, J., Li, X., & Wang, H. 2020. "Effect of Ceramic Coatings on Erosion Resistance of Boiler Components," *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 29, No. 3, hlm. 480–489.
- Pandey, G. 2025. Wear Resistant Ceramic Liner for Coal Nozzle and It's LCA Analysis. Tersedia pada: <https://example.com> (diakses 15 Juli 2025).
- Waldi, M., Basuki, E. A., Prawara, B., dkk. 2023. "Kajian Thermal Spray Coating dengan Teknologi High Velocity Oxy-Fuel (HVOF)," *Jurnal Penelitian Inovatif*, Vol. 3, No. 1, hlm. 41–60.
- ANSYS Inc. 2021. ANSYS Fluent User's Guide. Pennsylvania: ANSYS Inc
- Carlson, C. L., & Adriano, D. C. (2019). Environmental Impacts of Coal Combustion Residues. *Journal of Environmental Quality*, 22(2), 227–247. <https://doi.org/10.2134/jeq1993.00472425002200020002x>
- Deng, J., Yun, D., Zhou, H., & Tan, Y. (2019). Layered structures in ceramic nozzles for improved erosion wear resistance in industrial coal-water-slurry boilers. *Ceramics International*, 36(1), 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.09.003>
- Ding, Z., Deng, J., Li, J., Sun, G., & Ai, X. (2020). Wear behavior of ceramic nozzles in coal water slurry burning. *Ceramics International*, 30(4), 591–596. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.05.001>

- Łatka, L., Pawłowski, L., Winnicki, M., Sokołowski, P., Małachowska, A., & Kozerski, S. (2020). Review of functionally graded thermal sprayed coatings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(15). <https://doi.org/10.3390/app10155153>
- Sahab, A. R. M., Saad, N. H., & Teng, W. (2019). *the Performance of Plasma Sprayed Ceramic Coatings : With and. September 2015*.
- Waldi, M., Basuki, E. A., Prawara, B., Martides, E., & Juniarto, E. (2023). Kajian Thermal Spray Coating dengan Teknologi High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) serta Perlakuan Pasca Prosesnya sebagai Pelindung Boiler Tubes Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 3(1), 41–60. <https://doi.org/10.54082/jupin.124>