Journal Dynamic sainT
Vol. 12 No. 2, Oktober 2026
E-ISSN : 2722-5364

Reverse Engineering Komposisi Material Grinding Pulverizer untuk Meningkatkan Keandalan Penggilingan Batu bara di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Tanjung Awar-Awar

Tri Wahyudi[1], Moch. Zainal Arifin[2], Munirul Ichwan[3], Diah Ayu K.P.[4], Danu Wikasno[5], Mahadi[6], Charnia Iradat Rapa'[7,*], Andrea Stevens Karnyoto[8]

[1,2,3,4,5,6] *PT. PLN Nusantara Power Unit Tanjung Awar-Awar Power Plant, Indonesia*
[7] *Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar, Indonesia*
[8] *Program Magister Teknik Informatika, Universitas Bina Nusantara, Jakarta, Indonesia*
[1] sekum.ujta@gmail.com ; [2] lingkungan.ujta@gmail.com ; [3] munirul.ichwan91@gmail.com; [4] 9314093TA@ptpjbs.com ; [5] danu.wika@gmail.com ; [6] 8816255TA@ptpjbs.com ; [7] charnia25rapa@gmail.com ;[8] andrea.karnyoto@binus.ac.id
*charnia25rapa@gmail.com

Kata Kunci:
Rekayasa balik
rol penggiling
penghancur
pelapisan permukaan keras
efisiensi energi
keandalan pembangkit

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi penerapan reverse engineering komposisi material grinding roller untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan pulverizer di PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar. Permasalahan utama adalah keausan grinding roller akibat variasi karakteristik batu bara berdasarkan Hardgrove Grindability Index (HGI), yang meningkatkan beban penggilingan dan konsumsi energi. Metode penelitian meliputi karakterisasi material melalui pengujian X-Ray Fluorescence (XRF), kekerasan, dan metalografi, dilanjutkan redesain komposisi material serta aplikasi lapisan hardfacing berbasis karbida krom. Evaluasi dilakukan pada enam unit pulverizer dengan membandingkan konsumsi daya sebelum implementasi (Juli 2024) dan sesudah implementasi (Mei–Juni 2025). Hasil menunjukkan perbaikan homogenitas struktur mikro dan penurunan konsumsi daya pada seluruh unit. Penghematan energi mencapai 1.261,83 GJ atau 350.512,45 kWh, dengan estimasi penghematan batu bara sebesar 217.317,72 kg dan biaya operasional Rp288,12 juta. Estimasi reduksi emisi meliputi CO_2 sebesar 559,46 ton, SO_2 1,27 ton, NO_2 0,04 ton, dan partikulat 0,06 ton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reverse engineering berpotensi meningkatkan efisiensi energi dan mendukung keandalan operasional serta keberlanjutan lingkungan pembangkit.

Keywords:
Reverse engineering
Grinding roller
Pulverizer
Hardfacing
Energy efficiency
Operational reliability

ABSTRACT

This study aims to evaluate the application of reverse engineering to grinding roller material composition to improve pulverizer efficiency and reliability at PT PLN Nusantara Power, Tanjung Awar-Awar Power Generation Unit. The primary issue is grinding roller wear caused by variations in coal characteristics, as indicated by the Hardgrove Grindability Index (HGI), resulting in increased grinding loads and energy consumption. The methodology involves material characterization using X-ray fluorescence (XRF), hardness testing, and metallographic analysis, followed by material composition redesign and the application of chromium carbide-based hardfacing layers. Performance was evaluated across six pulverizer units by comparing power consumption before implementation (July 2024) and after implementation (May–June 2025). The results indicate improved microstructural homogeneity and reduced power consumption across all units. Energy savings reached 1,261.83 GJ (350,512.45 kWh), with estimated coal savings of 217,317.72 kg and operational cost savings of IDR 288.12 million. Estimated emission reductions included 559.46 tons of CO_2, 1.27 tons of SO_2, 0.04 tons of NO_2, and 0.06 tons of particulate matter. These findings suggest that reverse engineering can enhance energy efficiency while supporting operational reliability and environmental sustainability in coal-fired power generation.

This is an open access article under the CC–BY-SA license.

https://doi.org/ 10.47178/nnten846

I. Pendahuluan (bold, 10 pt)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung Awar-Awar yang dikelola PT PLN Nusantara Power merupakan salah satu pembangkit yang mendukung pasokan listrik sistem Jawa–Bali. Salah satu tantangan operasionalnya adalah menjaga keandalan sistem penggilingan batu bara (*coal pulverization*). Peralatan utama dalam proses ini adalah pulverizer atau coal mill, yang berfungsi menghaluskan batu bara sebelum dialirkan ke ruang bakar boiler. Kinerja pulverizer berpengaruh terhadap efektivitas pembakaran, efisiensi energi, dan keandalan pembangkit [1], [2].

PLTU Tanjung Awar-Awar menghadapi permasalahan derating, yaitu penurunan kemampuan pembangkit menghasilkan daya akibat keterbatasan operasional, termasuk meningkatnya beban kerja *pulverizer*. Kondisi serupa dilaporkan oleh Surahman (2026a) pada Coal Mill Unit 4 PT PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu [3]. Penurunan kapasitas penggilingan dipengaruhi oleh kadar air batu bara, *Hardgrove Grindability Index* (HGI), rasio udara–batu bara, dan keausan mekanis.

Salah satu faktor penting yang memengaruhi kinerja pulverizer adalah variasi nilai HGI batu bara dari berbagai sumber tambang. HGI menunjukkan tingkat kemudahan batu bara untuk digiling. Nilai HGI tinggi menandakan batu bara lebih mudah digiling, sedangkan nilai rendah menunjukkan batu bara lebih sulit digiling [4]. Pada *vertical roller mill*, penggilingan berlangsung melalui gaya tekan dan geser antara *grinding roller* dan *grinding table* [5], [6].

Batu bara dengan HGI rendah membutuhkan energi penggilingan lebih besar dan berpotensi menghasilkan partikel yang kurang halus. Partikel kasar yang belum memenuhi ukuran standar akan dikembalikan ke ruang penggilingan sehingga meningkatkan beban sirkulasi dan konsumsi daya *pulverizer*. Selain itu, ketidaksesuaian kehalusan batu bara dapat menyebabkan pembakaran tidak sempurna, peningkatan karbon tidak terbakar (unburned carbon), serta risiko slagging dan fouling pada boiler [1], [7], [8]. Penelitian Ma (2006) menunjukkan bahwa perubahan karakteristik kehalusan batu bara dapat meningkatkan efisiensi boiler sebesar 0,31% dan menurunkan emisi NO_x sebesar 65 mg/m³ [9].

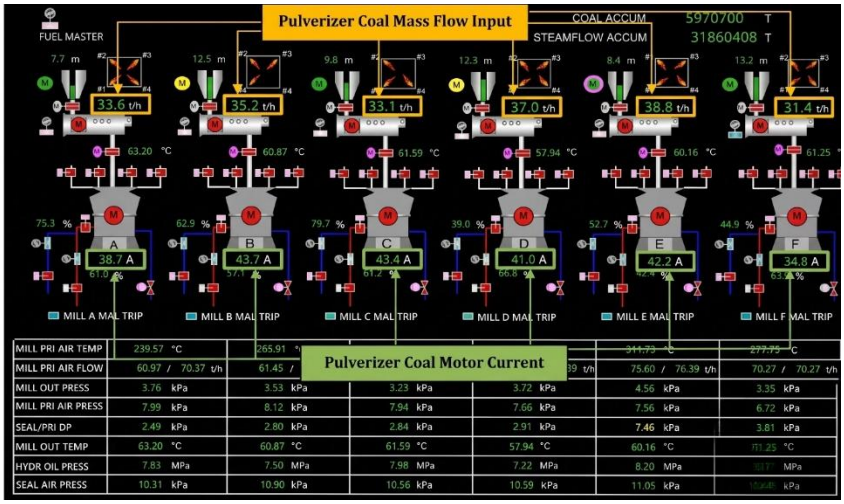
Permasalahan tersebut semakin kompleks akibat keausan grinding roller yang mengalami kontak langsung dengan partikel batu bara secara terus-menerus. Mekanisme kerusakan terutama berupa keausan abrasif (abrasive wear) dan keausan akibat pembebanan berulang (fatigue wear). Keausan menyebabkan perubahan profil permukaan, penurunan efektivitas penggilingan, serta meningkatnya risiko kerusakan komponen. Gu et al. (2013) menyatakan bahwa material besi cor berkromium tinggi memiliki ketahanan abrasi yang baik [10], sedangkan penelitian lain menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan material dapat memperpanjang umur pakai komponen . Penggunaan material tahan aus juga berpotensi mengurangi frekuensi pemeliharaan dan biaya operasional [11]. Kondisi keausan pada permukaan grinding roller PLTU Tanjung Awar-Awar ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi Keausan pada Permukaan Grinding Roller Pulverizer.

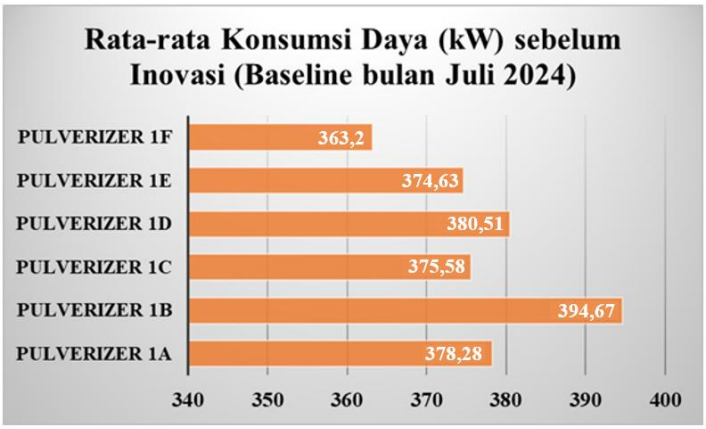
Kerusakan tersebut menjadi dasar perlunya pengembangan material dengan kekerasan, ketahanan aus, dan ketangguhan yang sesuai dengan karakteristik penggilingan batu bara.

Kinerja pulverizer dipantau melalui laju aliran massa batu bara (coal mass flow) dan arus motor penggerak (motor current). Kedua parameter tersebut digunakan untuk mengamati kondisi pembebanan dan kapasitas penggilingan. Sistem pemantauan enam unit pulverizer (1A–1F) pada Boiler Unit 1 PLTU Tanjung Awar-Awar ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemantauan Laju Aliran Massa Batu Bara dan Arus Motor pada Enam Unit Pulverizer.

Sebagai dasar evaluasi, dilakukan pengukuran rata-rata konsumsi daya listrik enam unit pulverizer pada Juli 2024, sebelum penerapan inovasi. Hasil pengukuran menunjukkan konsumsi daya berkisar antara 363,20 – 394,67 kW, dengan rata-rata keseluruhan sebesar 377,81 kW. Hasil evaluasi awal tersebut disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan Rata-Rata Konsumsi Daya Listrik Enam Unit Pulverizer Sebelum Penerapan Inovasi (Juli 2024).

Berdasarkan data tersebut, konsumsi daya tertinggi terjadi pada Pulverizer 1B sebesar 394,67 kW, sedangkan terendah pada Pulverizer 1F sebesar 363,20 kW. Perbedaan konsumsi daya sebesar 31,47 kW menunjukkan adanya variasi kebutuhan energi antar unit. Namun, perbedaan tersebut tidak dapat langsung dikaitkan dengan keausan grinding roller karena juga dipengaruhi oleh kapasitas penggilingan, karakteristik batu bara, dan kondisi pembebanan. Oleh karena itu, data Juli 2024 digunakan sebagai kondisi acuan (baseline) untuk mengevaluasi kinerja setelah penerapan inovasi.

Salah satu pendekatan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah reverse engineering, yaitu rekayasa ulang komponen melalui analisis karakteristik material eksisting dan pengembangan material pengganti dengan sifat mekanis yang lebih baik [12], [13]. Dalam penelitian ini, pendekatan tersebut diterapkan melalui pengujian komposisi kimia menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), pengujian kekerasan, analisis metalografi, serta pengembangan lapisan hardfacing berbasis karbida krom. Rekayasa material diarahkan untuk meningkatkan ketahanan aus dan mempertahankan efektivitas penggilingan batu bara.

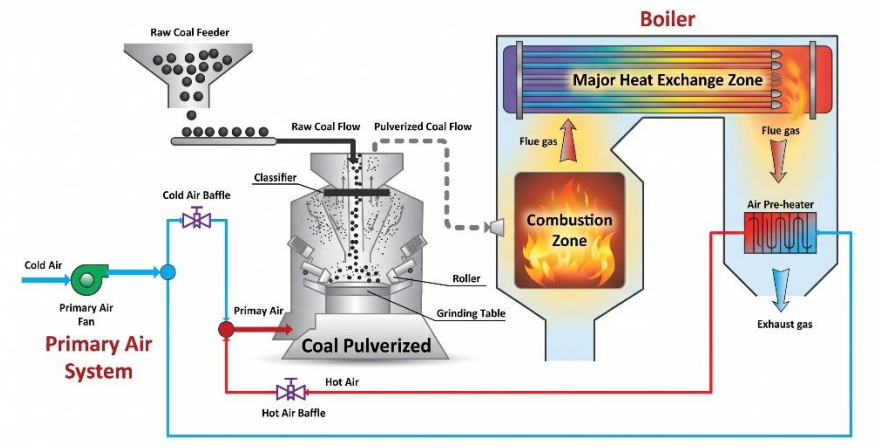
Meskipun berbagai penelitian telah membahas karakteristik penggilingan batu bara dan pengembangan material tahan aus, evaluasi terpadu antara rekayasa komposisi grinding roller, perubahan konsumsi energi, penghematan bahan bakar, biaya operasional, dan dampak lingkungan pada kondisi operasi PLTU masih menjadi aspek penting untuk dikaji. Penelitian ini mengintegrasikan karakterisasi material, penerapan hardfacing, dan evaluasi kinerja enam unit pulverizer berdasarkan data sebelum dan sesudah implementasi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi mekanisme keausan grinding roller, mengembangkan komposisi material melalui pendekatan reverse engineering, serta mengevaluasi pengaruh penerapannya terhadap konsumsi energi listrik, penghematan batu bara, biaya operasional, dan penurunan emisi pembangkit. Hasil penelitian diharapkan memberikan solusi teknis untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan pulverizer, sekaligus mendukung pengelolaan energi dan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

II. Tinjauan Pustaka

A. Prinsip Kerja Pulverizer Batu bara

Penggilingan batu bara menggunakan *pulverizer* merupakan tahap penting dalam penyediaan bahan bakar PLTU untuk menghasilkan partikel halus yang mendukung efisiensi pembakaran *boiler* [1], [2]. Proses ini terintegrasi dengan sistem udara primer, pemisahan partikel, dan pembakaran, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Proses Penggilingan dan Penyaluran Batu Bara pada Sistem Pembakaran PLTU.

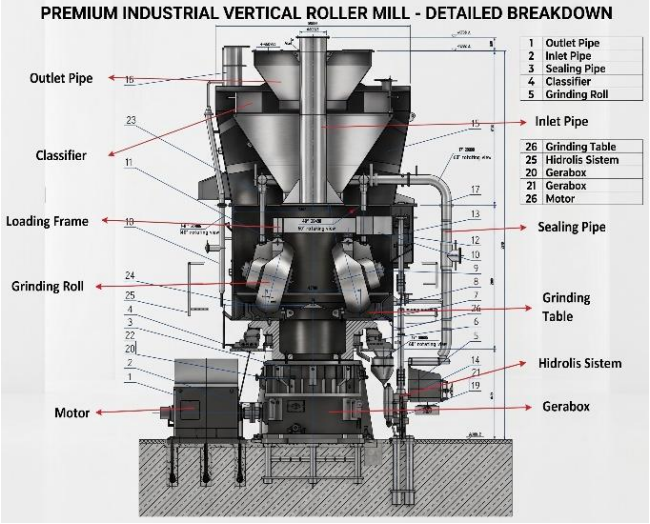
Gambar 4 menunjukkan integrasi proses penggilingan dan pembakaran batu bara, mulai dari *coal feeder* hingga *combustion zone*. *Pulverizer* berfungsi menghaluskan batu bara menjadi serbuk (*pulverized coal*) sebelum disalurkan ke *boiler* [14]. Kinerja peralatan ini berperan penting dalam efisiensi operasional PLTU [1], [2]. Pada tahun 2006, batu bara menyumbang lebih dari 41% pembangkitan listrik dunia, dengan konsumsi energi *pulverizer* sebesar 0,5 – 1% dari produksi listrik bruto. Meskipun relatif kecil, optimalisasi *pulverizer* berpotensi meningkatkan efisiensi energi, menekan biaya operasional, dan mengurangi emisi gas rumah kaca [15].

Perkembangan teknologi penggilingan batu bara ditandai dengan peralihan dari *ball mill* dan *tube mill* menuju *pulverizer* berkecepatan sedang [16]. Pemilihan teknologi mempertimbangkan keandalan, kinerja teknis, dan keekonomian. Pada pembangkit 1.000 MW, sistem *direct-fired double-inlet and double-outlet tube ball mill* (BBD) memiliki keandalan jangka panjang lebih baik, tetapi biaya operasional tahunannya sekitar 1,60 juta yuan lebih tinggi dibandingkan *medium-speed pulverizer* tipe HP (G. Q. Zhang & Thulen, 2006). Di Indonesia, teknologi *vertical roller mill* (VRM) tipe MPS dan ZGM telah diterapkan, antara lain pada PLTU Adipala yang menggunakan enam *pulverizer* ZGM123GII, masing-masing berkapasitas 20% dari *Maximum Continuous Rating* (MCR). Lima unit beroperasi pada beban penuh, sedangkan satu unit sebagai cadangan (*standby*) [14].

Vertical Roller Mill (VRM) bekerja melalui gaya kompresi dan geser antara *grinding roller* dan *grinding table*. Kinerjanya dipengaruhi karakteristik batu bara, tekanan *roller*, dan kondisi permukaan material. Oleh karena itu, ketahanan aus *grinding roller* menjadi faktor utama dalam menjaga efisiensi dan keandalan *pulverizer*. Konfigurasi serta komponen utama VRM ditunjukkan pada Gambar 5.

Vertical Roller Mill (VRM) bekerja berdasarkan prinsip kompresi dan gaya geser pada lapisan material (*material bed*) di antara *grinding roller* dan *grinding table*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 [6]. Proses penggilingan dipengaruhi oleh gaya gesek dan sudut jepit (*clamp angle*), dengan komponen utama meliputi *grinding roller*, *grinding table*, sistem penggerak, dan *classifier* [17], [18]. Dalam pengoperasiannya, batu bara diumpankan ke *grinding table*, kemudian dikeringkan dan diangkut oleh aliran udara primer menuju *classifier*. Partikel halus dialirkan ke *burner*, sedangkan partikel kasar dikembalikan untuk digiling ulang. Tingkat kehalusan produk dikendalikan melalui pengaturan *classifier* [19]. Pengujian pada *pulverizer* ZGM-113G menunjukkan bahwa bukaan *damper classifier* sebesar 45°–65° menghasilkan variasi kehalusan batu bara R90 sebesar 10–40%. Pengaturan *damper*, aliran udara, dan tekanan hidraulik *roller* memengaruhi kapasitas, kehalusan, serta konsumsi energi penggilingan [20]. Selain itu, beban sirkulasi internal dapat mencapai 600 –

1100% dari kapasitas sistem. Karakteristik batu bara yang heterogen memerlukan pendekatan klasifikasi multi komponen untuk membedakan perilaku partikel batu bara dan mineral [15].



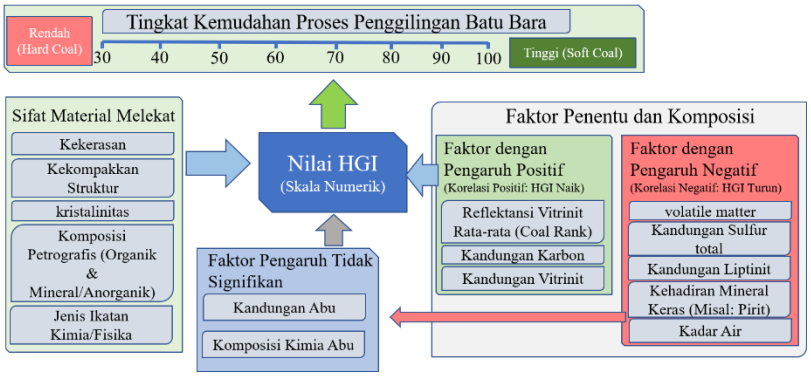
Gambar 5. Konfigurasi dan Komponen Utama Vertical Roller Mill (VRM)

B. Hardgrove Grindability Index (HGI)

Hardgrove Grindability Index (HGI) merupakan indeks standar untuk mengukur kemudahan penggilingan batu bara berdasarkan ASTM D409. Metode ini dikembangkan oleh R.M. Hardgrove pada 1932, ditetapkan sebagai standar ASTM pada 1945, dan diadopsi secara internasional melalui ISO 5074, DIN 51742, serta BS 1016-112:1995 [21], [22].

Pengujian HGI menggunakan 50 gram sampel batu bara kering udara berukuran 600 µm–1,18 mm yang digiling sebanyak 60 putaran. Nilai HGI ditentukan berdasarkan persentase sampel lolos ayakan 75 µm melalui kurva kalibrasi standar [23]. HGI tinggi menunjukkan batu bara lebih mudah digiling dengan kebutuhan energi spesifik lebih rendah dan potensi kapasitas *pulverizer* lebih besar. Sebaliknya, HGI rendah mengindikasikan kesulitan penggilingan dan peningkatan beban kerja *pulverizer* [22], [23].

Nilai HGI dipengaruhi sifat fisik, struktur, dan komposisi mineral batu bara. Kandungan karbon dan vitrinit cenderung berkorelasi positif dengan HGI, sedangkan kadar air, sulfur, mineral tertentu, sifat mekanis, dan komposisi abu turut memengaruhi tingkat ketergilingan. Hubungan faktor-faktor tersebut terhadap nilai HGI diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Nilai Hardgrove Grindability Index (HGI) dan Tingkat Ketergilingan Batu Bara.

Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI) dipengaruhi sifat fisik, struktur petrografis, dan komposisi mineral batu bara [21], [22]. Rejdak et al. (2021) menemukan korelasi positif HGI dengan reflektansi vitrinit, kandungan karbon, dan vitrinit, serta korelasi negatif dengan zat terbang, liptinit, dan sulfur total [24]. Kandungan dan komposisi abu tidak berpengaruh signifikan, sedangkan mineral keras seperti pirit berpotensi mempercepat keausan komponen penggiling [25], [26].

Variasi HGI memengaruhi kapasitas penggilingan, konsumsi energi, dan keausan *pulverizer*. HGI dan kadar air berkaitan dengan konsumsi daya spesifik *mill* [27]. Batu bara dengan HGI rendah lebih sulit digiling, sehingga berpotensi meningkatkan kebutuhan energi dan menurunkan kapasitas penggilingan [3]. Ketidaksesuaian kehalusan partikel juga meningkatkan risiko karbon tidak terbakar (*unburned carbon*), *slagging*, dan *fouling* [7].

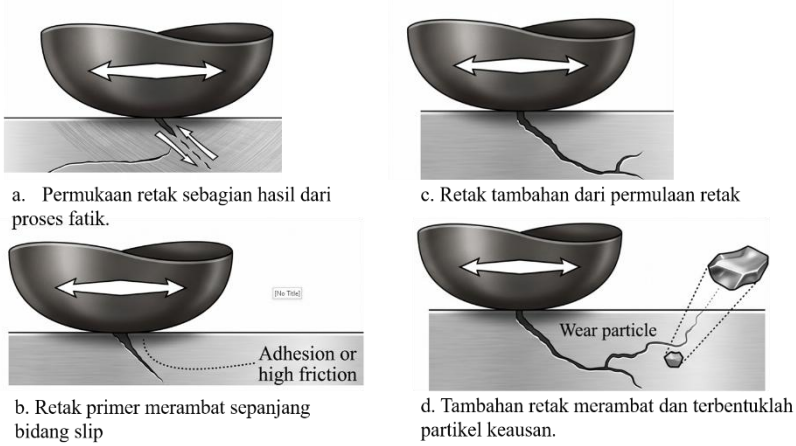
Dalam pencampuran batu bara (*coal blending*), nilai HGI campuran dapat bersifat nonaditif, khususnya pada batu bara dengan peringkat berbeda. Idris et al. (2022) mengembangkan model prediksi HGI menggunakan regresi multilinear dengan koefisien determinasi $R^2 = 0{,}9416$ [28]. Dengan demikian, pengendalian variasi HGI menjadi faktor penting dalam menjaga kapasitas penggilingan, efisiensi energi, dan ketahanan aus *grinding roller*.

C. Mekanisme Keausan pada Grinding Roller

Grinding roller merupakan komponen *pulverizer* yang rentan mengalami keausan akibat kontak langsung dengan batu bara selama penggilingan. Keausan didominasi mekanisme abrasif (*abrasive wear*), sehingga penggunaan besi cor berkromium tinggi (*high-chromium cast iron*) menjadi alternatif ekonomis untuk meningkatkan ketahanan aus, memperpanjang umur pakai, dan menekan biaya pemeliharaan [10], [29].

Keausan dipengaruhi kandungan mineral abrasif, terutama kuarsa (SiO_2) dan pirit (FeS_2), serta ukuran partikelnya. Kuarsa, khususnya berukuran kasar, menyebabkan keausan lebih besar dibandingkan pirit [30]. Kandungan abu dan karakteristik partikel juga memengaruhi abrasi komponen serta erosi sistem penyaluran batu bara [31]. Mekanisme *three-body abrasive wear* turut dipengaruhi karakteristik mineral, kadar air, dan nilai HGI batu bara [25], [26].

Kondisi operasional, terutama distribusi udara primer, dapat menyebabkan keausan tidak merata. Pada *pulverizer* ZGM123GII, keausan terkonsentrasi pada *liner* yang hampir berlawanan dengan posisi saluran masuk udara [14]. Selain abrasi, gesekan dan pembebanan berulang dapat memicu deformasi, adhesi, pembentukan serta perambatan retak, hingga pelepasan material yang memperpendek umur pakai *roller*. Oleh karena itu, optimalisasi komposisi dan perlindungan permukaan material diperlukan untuk meningkatkan keandalan *pulverizer*. Mekanisme kerusakan tersebut diilustrasikan pada Gambar 7.



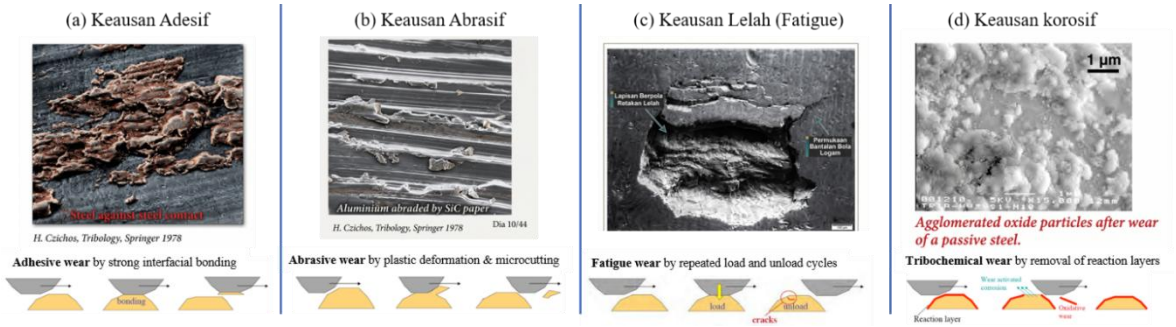
Gambar 7. Skema penggambaran proses retak dari awal retak dan merambatnya retak permukaan (Buckley, Donald H. Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication. Vol. 5. Elsevier, 1981.)

Keausan pada permukaan grinding roller terjadi akibat interaksi mekanis dan kimia selama proses penggilingan batu bara. Secara umum, mekanisme keausan meliputi adhesif, abrasif, lelah (fatigue), dan tribokimia, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan empat mekanisme keausan material, yaitu: (1) **keausan adhesif (*adhesive wear*)**, akibat perlekatan dan perpindahan material antar permukaan; (2) **keausan abrasif (*abrasive wear*)**, akibat gesekan partikel keras yang menyebabkan deformasi dan pemotongan mikro; (3) **keausan lelah (*fatigue wear*)**, akibat pembebanan berulang yang memicu retakan dan pengelupasan material; serta (4) **keausan tribokimia (*tribochemical wear*)**, akibat reaksi kimia yang dipicu gesekan dan menyebabkan pembentukan serta pengelupasan lapisan oksida.

Pada skala mikro, kuarsa menyebabkan pemotongan mikro (*microcutting*), retakan, dan lubang dangkal. Dalam campuran kuarsa–batu bara, sebagian partikel kuarsa tertanam pada permukaan, sedangkan batu bara murni menghasilkan jejak pemotongan tunggal [32]. Kandungan kuarsa, pirit, dan air meningkatkan potensi

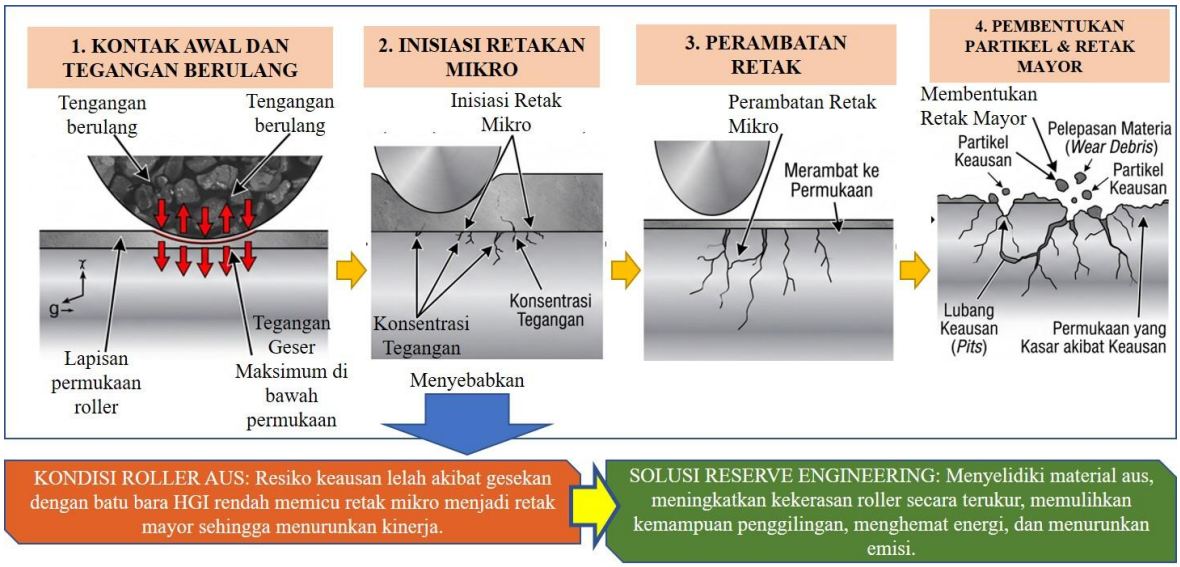
abrasi serta erosi [33]. Paparan abrasi, erosi, beban impak, dan temperatur tinggi pada komponen *mill* juga mempercepat kerusakan, retak atau patah material, serta memperpendek umur pakai [34].



Gambar 8. Mekanisme Keausan pada Permukaan Material Grinding Roller Pulverizer: (a) Keausan Adhesif (Adhesive Wear), (b) Keausan Abrasif (Abrasive Wear), (c) Keausan Akibat Kelelahan Material (Fatigue Wear), dan (d) Keausan Tribokimia (Tribochemical Wear).

D. Reverse Engineering dalam Rekayasa Material

Reverse engineering (RE) merupakan metode analisis konstruksi dan komposisi material untuk mereproduksi atau mengembangkan komponen dengan fungsi setara atau lebih baik [12], [13]. Metode ini mendukung pemeliharaan, perpanjangan umur pakai, dan rekayasa ulang komponen, terutama ketika dokumentasi teknis atau suku cadang terbatas. Pendekatan tersebut sejalan dengan prinsip 3R (*reduce, reuse, recycle*) [13].



Gambar 9. Mekanisme Keausan dan Perambatan Retak pada Permukaan Grinding Roller Pulverizer akibat Pembebanan Berulang.

Guryev et al. (2023) menerapkan *reengineering* pada komponen aus berbahan besi cor krom tinggi tipe ChKh28 dengan tambahan molibdenum, vanadium, dan nikel, yang memiliki padanan material DIN 1695-81: G-260Cr27 [35]. Pendekatan serupa diterapkan dalam penelitian ini melalui identifikasi komposisi dan struktur mikro *grinding roller* untuk merancang material pengganti yang lebih tahan aus.

Keausan *grinding roller* terjadi akibat tekanan dan gesekan berulang selama penggilingan batu bara, terutama pada batu bara dengan nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI) rendah. Kerusakan berlangsung melalui empat tahap, yaitu pembentukan tegangan, inisiasi retak mikro, perambatan retak, serta pelepasan partikel material (*wear debris*). Kondisi ini menyebabkan lubang keausan (*pitting*) dan penurunan kinerja penggilingan. Oleh karena itu, penerapan RE diarahkan untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan keandalan *pulverizer*. Tahapan kerusakan tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9, mekanisme keausan akibat pembebanan berulang (*fatigue wear*) menunjukkan pentingnya penerapan *reverse engineering* (RE) untuk meningkatkan ketahanan material *grinding*

roller. Pendekatan ini dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu: (1) rekayasa ulang komposisi material berdasarkan karakterisasi *roller* eksisting menggunakan pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), kekerasan, dan metalografi, dilanjutkan perancangan serta pengujian komposisi material baru; dan (2) perancangan ulang aplikasi lapisan *hardfacing*, meliputi penyusunan desain pelapisan dan fabrikasi *roller* hasil rekayasa. Pendekatan tersebut bertujuan mengatasi pembentukan dan perambatan retak akibat tegangan kontak berulang, terutama pada penggilingan batu bara dengan nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI) rendah. Optimalisasi kekerasan dan ketahanan aus material diharapkan mampu meningkatkan keandalan *pulverizer*, mempertahankan kinerja penggilingan dalam batas operasi yang aman, serta mendukung efisiensi energi dan penurunan emisi.

E. Hardfacing dan Material Karbida Krom

Hardfacing merupakan teknik pelapisan permukaan untuk meningkatkan ketahanan aus, memperpanjang umur komponen, dan menekan biaya pemeliharaan. Metodenya meliputi *electroplating*, *overlay welding*, *thermal spraying*, dan *laser cladding* [36]. Pemilihan material didasarkan pada mikrostruktur, kekerasan, dan sifat tribologi, menggunakan paduan berbasis nikel (NiCrBSi, NiCrBSiFe, NiCrBSi/WC) atau besi (FeCrCSiMo, FeCrCBSiTi, FeCrCBNiSi) [34]. Pendekatan ini mendukung penguatan permukaan dan ketahanan material terhadap abrasi, korosi, serta retakan [37].

Paduan Fe-Cr-C banyak digunakan karena karbida krom meningkatkan kekerasan dan ketahanan abrasi. Jin et al. (2020) menunjukkan bahwa peningkatan Cr dari 7,5% menjadi 32% berat melalui *Plasma Transferred Arc* (PTA) mengubah karbida primer M_3C menjadi M_7C_3 dan karbida eutektik M_7C_3 menjadi $M_{23}C_6$, sekaligus meningkatkan ketahanan aus [38]. Fa-hon (2015) melaporkan bahwa vibrasi mekanis menghasilkan kekerasan 57 HRC dan ketahanan aus dua kali metode konvensional [39]. Karbida M_7C_3 berukuran 15–25 µm efektif menghambat *microcutting* [40], sedangkan struktur hipereutektik memiliki kekerasan lebih tinggi [41]. Agrawal et al. (2024) juga mengkaji peran grafit dalam pembentukan karbida dan peningkatan ketahanan abrasi [42].

Berdasarkan kajian tersebut, *grinding roller* dikembangkan menggunakan substrat besi cor ulet (*ductile iron*) dengan lapisan *High Chromium Carbide* dan *Complex Carbide*. Kombinasi ini bertujuan menyeimbangkan ketangguhan dan ketahanan aus material [31]. Perbandingan komposisi dan kekerasan kedua lapisan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Komposisi Kimia dan Kekerasan Material Hardfacing pada Grinding Roller

Parameter	High Chromium Carbide	Complex Carbide
Material dasar	Ductile iron	Ductile iron
Kandungan kromium (Cr)	15–22%	22–30%
Kandungan karbon (C)	3,5–5,5%	3,5–5,5%
Kekerasan lapisan	58–62 HRC	63–67 HRC
Karakteristik utama	Lapisan karbida krom dengan ketahanan abrasi tinggi	Lapisan karbida kompleks dengan kekerasan lebih tinggi
Tujuan aplikasi	Meningkatkan ketahanan aus permukaan roller	Meningkatkan ketahanan terhadap abrasi berat

F. Life Cycle Assessment (LCA) dalam Industri Pembangkit Listrik

Life Cycle Assessment (LCA) merupakan metode evaluasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup produk atau proses berdasarkan penggunaan material, energi, dan emisi (*life cycle inventory*). Berbeda dengan *carbon footprint* yang berfokus pada gas rumah kaca, LCA mencakup berbagai polutan, termasuk NO_x dan SO_2, serta mencegah perpindahan beban lingkungan (*problem-shifting*) [43].

Pada PLTU, LCA mencakup pengadaan bahan baku, transportasi, konstruksi, operasi, pemeliharaan, dekomisioning, dan pengelolaan limbah [44].

Tabel 2. Estimasi Pengurangan Emisi dan Penghematan Biaya melalui Implementasi Reverse Engineering Grinding Roller Pulverizer.

Parameter	Nilai	Satuan
Carbon Monoksida (CO2)	559,46	ton
Sulfur dioksida (SO_2)	1,27	ton
Nitrogen dioksida (NO_2)	0,04	ton
Partikulat (PM)	0,06	ton
Penghematan biaya	288.121.233	Rp

Sumber: Data hasil perhitungan program, 2025.

Penelitian ini menggunakan kerangka LCA 2024 untuk mengevaluasi potensi manfaat lingkungan *reverse engineering* material *grinding roller pulverizer* pada Boiler Unit 1, khususnya dalam proses produksi listrik,

pemeliharaan, dan perbaikan. Optimalisasi material diharapkan meningkatkan efisiensi penggilingan dan umur pakai komponen serta menekan konsumsi batu bara, emisi, dan kebutuhan penggantian material.

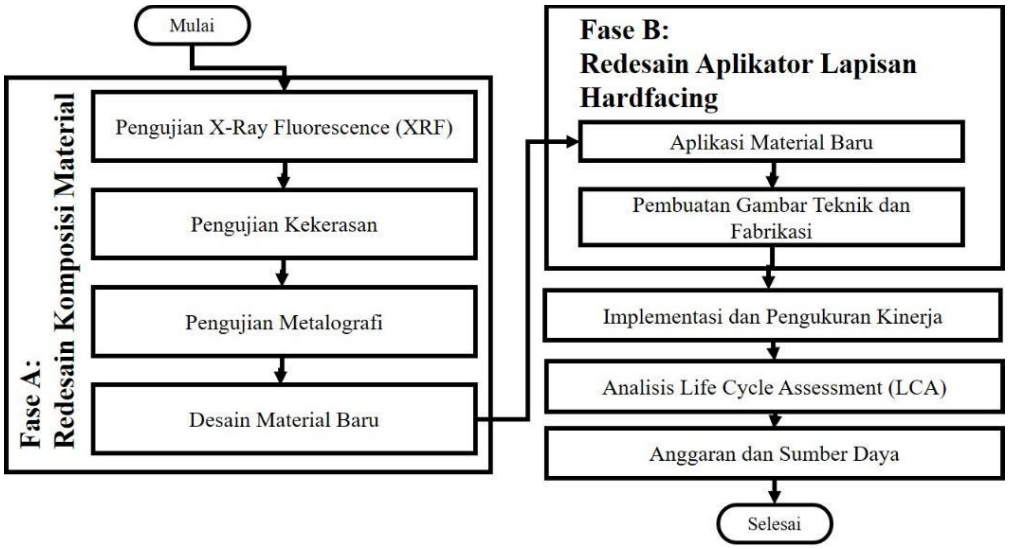
Estimasi pengurangan emisi dan penghematan biaya didasarkan pada penghematan energi periode Mei–Juni 2025 yang dikonversi ke kWh menggunakan faktor emisi tahun 2025. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2, implementasi *reverse engineering* material *grinding roller pulverizer* menghasilkan penghematan energi sebesar 350.512,45 kWh, yang menjadi dasar estimasi pengurangan emisi CO_2 sebesar 559,46 ton, SO_2 sebesar 1,27 ton, NO_2 sebesar 0,04 ton, dan partikulat (PM) sebesar 0,06 ton, serta penghematan biaya Rp288.121.233. Hasil ini mengindikasikan potensi manfaat lingkungan dan ekonomi melalui penurunan kebutuhan energi penggilingan batu bara. Dalam perspektif *Life Cycle Assessment* (LCA), program ini mendukung efisiensi sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan, dengan tetap memerlukan validasi faktor emisi serta kesetaraan kondisi operasi sebelum dan sesudah implementasi.

III. Metodologi Penelitian

A. Desain Implementasi

Implementasi program *reverse engineering* dilakukan melalui pendekatan redesain yang mencakup dua tahapan utama, yaitu optimalisasi komposisi material dan perancangan ulang metode aplikasi lapisan *hardfacing***.** Kedua tahapan tersebut dilaksanakan secara sistematis untuk mengevaluasi karakteristik material eksisting, mengidentifikasi kelemahan serta keterbatasan kinerjanya, dan merumuskan pengembangan material alternatif yang memiliki sifat mekanis serta ketahanan operasional yang lebih baik. Alur pelaksanaan dan tahapan redesain dalam program *reverse engineering* disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. Alur desain implementasi

B. Fase A: Redesain Komposisi Material

Tahap awal *reverse engineering* dilakukan melalui pengujian dan analisis karakteristik material *grinding roller* untuk mengidentifikasi kondisi keausan, faktor penyebab penurunan kinerja, serta menentukan komposisi material alternatif guna meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan keandalan operasional. Tahapan pengujian dan analisis meliputi:

1) Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengukur komposisi unsur kimia pada *grinding roller* yang mengalami keausan, meliputi logam dasar dan unsur paduan. Hasil pengujian menjadi acuan dalam mengevaluasi komposisi material eksisting dan merancang komposisi alternatif yang lebih optimal.

2) Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan skala Rockwell C (HRC) dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik material. Hasil pengujian diinterpretasikan berdasarkan klasifikasi tingkat kekerasan HRC sebagai pedoman awal penilaian, dapat dilihat pada Tabel 3 berikut :

Tabel 3. Klasifikasi Tingkat Kekerasan Rockwell C (HRC) dan Penilaian Awal Ketahanan Aus Material Grinding Roller

Nilai HRC	Kategori Interpretatif	Penilaian Awal
20 - 29	Relatif Rendah	Kurang ideal untuk permukaan dengan abrasi berat
30 - 39	Sedang	Perlu peningkatan ketahanan aus
40 - 49	Tinggi	Berpotensi digunakan pada kondisi abrasi sedang
50 – 57	Sangat Tinggi	Kandidat material tahan aus
58 - 62	Sangat Tinggi	Baik sebagai kandidat lapisan hardfacing
63 - 67	Ekstrem	Sangat baik dari aspek kekerasan penetrasi

3) Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi bertujuan untuk menganalisis struktur mikro material, meliputi morfologi butir, distribusi fasa, serta pengaruh perlakuan panas atau pengelasan terhadap sifat mekanik. Analisis ini juga digunakan untuk membandingkan karakteristik struktur mikro dan kehalusan butir antara material eksisting dan material hasil pengembangan.

4) Desain Material Baru

Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan perancangan komposisi material baru yang selanjutnya divalidasi menggunakan metode pengujian yang sama untuk membandingkan karakteristik material eksisting dan material hasil pengembangan. Material baru menggunakan bahan dasar besi cor nodular (ductile cast iron) dengan lapisan hardfacing berkinerja tinggi. Adapun komposisi kimia lapisan tersebut disajikan sebagai berikut:

- High Chromium Carbide (HCC): Kandungan Kromium (Cr) 15-22% dan Karbon (C) 3,5-5,5%
- Complex Carbide: Kandungan Kromium (Cr) 22-30% dan Karbon (C) 3,5-5,5%.

C. Fase B: Redesain Aplikator Lapisan Hardfacing

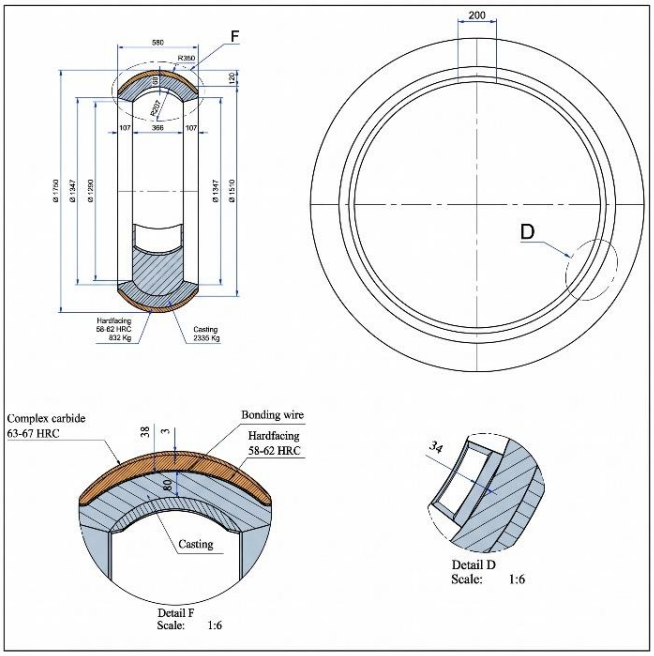
Fase kedua melibatkan aplikasi material baru yang telah diuji untuk manufaktur grinding roller baru :

1) Aplikasi Material Baru

Material yang telah diuji diterapkan untuk memproduksi grinding roller baru dengan spesifikasi yang ditingkatkan. Aplikator lapisan hardfacing dirancang ulang untuk mengaplikasikan material berkekerasan tinggi pada basis casting.

2) Pembuatan Gambar Teknik dan Fabrikasi

Redesain lapisan *hardfacing* dilakukan melalui perancangan konfigurasi dan komposisi material pelapis pada permukaan *grinding roller*. Perancangan ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aus dan keandalan komponen selama proses penggilingan batu bara. Detail geometri, susunan lapisan material, dan konfigurasi *hardfacing* ditunjukkan pada Gambar 11 berikut :



Gambar 11. Desain Ulang Konfigurasi dan Susunan Lapisan Material Hardfacing pada Grinding Roller

Spesifikasi teknis grinding roller baru meliputi:

- Casting Base: Besi ulet dengan berat 2.335 kg.
- Lapisan Hardfacing: Kombinasi lapisan High Chromium Carbide (HCC) dan Complex Carbide dengan berat total 932 kg.
- Spesifikasi Kekerasan:
- Lapisan HCC: 58-62 HRC
- Lapisan Complex Carbide: 63-67 HRC
- Bonding Wire: Digunakan untuk memfasilitasi aplikasi dan ikatan lapisan hardfacing pada casting.
- Dimensi Fisik: Diameter luar Ø 1750, diameter dalam Ø 1347, Ø 1290, dan Ø 1510; lebar 580; radius R350 dan R207; dan dimensi ketebalan 120, 107, dan 366.

3) Implementasi dan Pengukuran Kinerja

Implementasi *grinding roller* hasil redesain dilakukan pada enam unit *pulverizer* (1A–1F) di Unit 1 PLTU Tanjung Awar-Awar. Evaluasi kinerja dilakukan melalui analisis komparatif konsumsi daya sebelum implementasi (data acuan Juli 2024) dan setelah implementasi (Mei–Juni 2025). Parameter evaluasi yang digunakan meliputi:

- Konsumsi daya rata-rata pulverizer (kW)
- Konsumsi energi harian dan bulanan (GJ dan kWh)
- Penghematan batu bara (kg) berdasarkan Specific Coal Consumption (SFC) 0,62 kg/kWh
- Reduksi emisi (CO_2, SO_2, NO_2, dan PM)
- Penghematan biaya operasional (Rupiah)

Perhitungan Daya Aktif Listrik Tiga Fasa (P)

$$P = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot cos\varphi}{1000} \quad (1)$$

P = daya listrik aktif (kW), V=tegangan (V), I= arus listrik (A), $cos\varphi$=faktor daya.

Konversi Laju Energi per Jam ke Gigajoule (P_{GJ})

$$P_{GJ} = P \times k_1 \quad (2)$$

P_{GJ}=Nilai daya/energi per jam (GJ), k_1=Faktor konversi (0,0036 GJ/kWh)

Total Daya Seluruh Unit Pulverizer (P_{total})

$$P_{total} = \sum_{i=A}^{F} P_i \quad (3)$$

P_i=Nilai daya unit pulverizer ke$-i$(unit 1A hingga 1F)

Selisih Penurunan Daya (ΔP)

$$\Delta P = P_{before} - P_{after} \quad (4)$$

ΔP= Selisih/gap penurunan daya (GJ), P_{before}= Total daya sebelum inovasi (GJ), P_{after}= Total daya setelah inovasi (GJ)

Total Penghematan Energi Bulanan (E_m)

$$E_m = \Delta P \times t \times D_m \quad (5)$$

E_m= penghematan energi pada bulan m (GJ), t= Durasi operasi harian (24 jam sehari), D_m= Jumlah hari dalam bulan m.

Total penghematan Energi Komulatif Periode Tertentu (E_{total})

$$E_{total} = \sum_{m=1}^{n} E_m \quad (6)$$

n= Jumlah bulan dalam periode perhitungan

Konversi Total Penghematan Energi ke Kilowatt-hour (E_{kWh})

$$E_{kWh} = E_{total} \times k_2 \quad (7)$$

E_{kWh}= Total penghematan energi (kWh), k_2= Faktor konversi (277,78 kWh/GJ)

Formula Perhitungan Penghematan Biaya

$$S = T_e \times E_{kWh} \quad (8)$$

Pengurangan Emisi CO_2

$$\Delta E_{CO_2} = E_{kWh} \times EF_{CO_2} \quad (9)$$

Dengan EF_{CO_2}= 0,001596128717 ton / kWh

Pengurangan Emisi SO_2

$$\Delta E_{SO_2} = E_{kWh} \times EF_{SO_2} \quad (10)$$

Dengan EF_{SO_2}= 0,000003613728 ton/kWh

Pengurangan Emisi NO_x

$$\Delta E_{NO_x} = E_{kWh} \times EF_{NO_x} \quad (11)$$

Dengan EF_{NO_2}= 0,000000107990 ton/kWh

Pengurangan Emisi (PM)

$$\Delta E_{PM} = E_{kWh} \times EF_{PM} \quad (12)$$

Dengan EF_{PM}= 0, 000000169925 ton/kWh

4) Analisis Life Cycle Assessment (LCA)

Program ini merupakan bagian dari kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) tahun 2024 pada proses pembangkitan listrik di PT PLN Nusantara Power UP Tanjung Awar-Awar. Implementasi dilaksanakan di area Boiler Unit 1, yang termasuk dalam tahap produksi pada siklus hidup listrik. Program ini berkontribusi terhadap perbaikan pengelolaan limbah dalam siklus hidup (*Waste Life Cycle*), khususnya melalui optimalisasi kegiatan pemeliharaan dan perbaikan, yang berpotensi menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) serta emisi konvensional.

5) Anggaran dan Sumber Daya

PT PLN Nusantara Power mengalokasikan anggaran sebesar Rp2.008.203.120 untuk pelaksanaan program selama periode 2024–2025, dengan rincian Rp1.425.453.120 pada tahun 2024 dan Rp582.750.000 pada tahun 2025 [3]. Pengadaan komponen *grinding roller* dilaksanakan melalui kerja sama dengan PT PLN Pusharlis dan PT Prima Layanan Niaga Suku Cadang sebagai pihak pemasok.

IV. Hasil Penelitian

A. Pengujian terhadap material Reverse Engineering

1) Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)



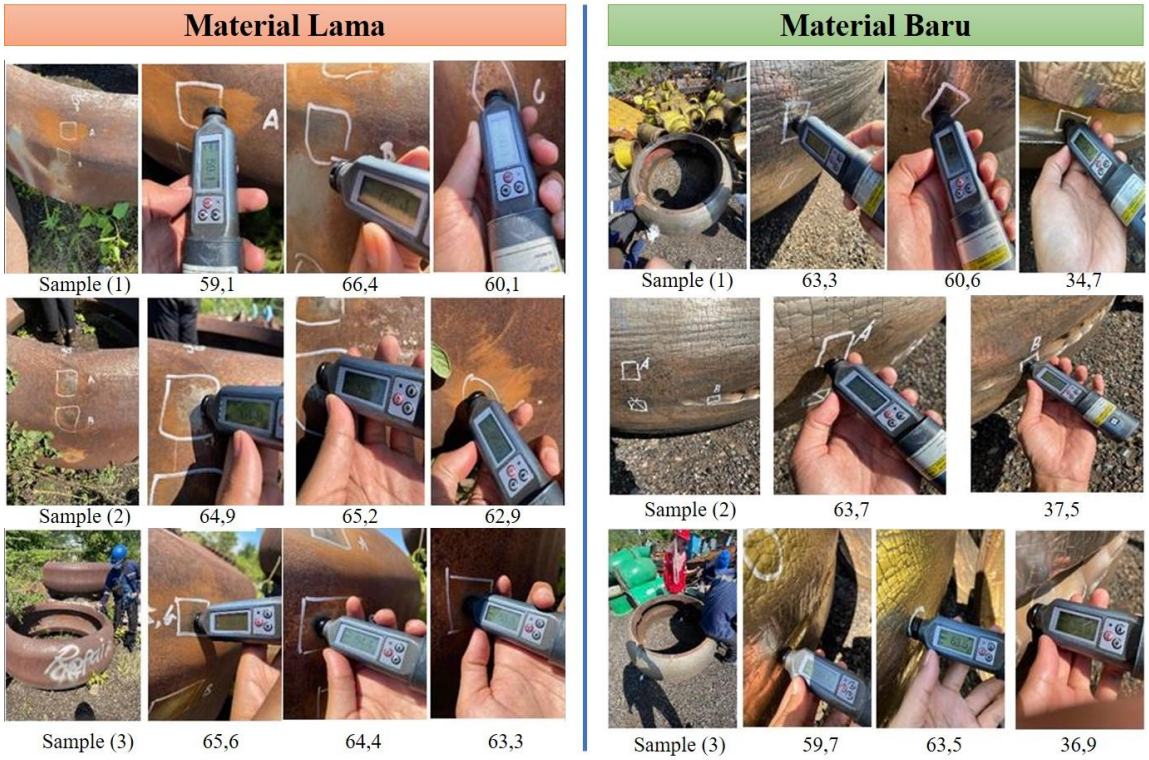
Gambar 12. Pengujian XRF (Kandungan Material)

Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan untuk mengidentifikasi dan membandingkan komposisi unsur material grinding roller pulverizer sebelum dan sesudah penerapan reverse engineering. Hasil pengujian kedua material ditunjukkan pada Gambar 12.

Hasil pengujian XRF pada Gambar 12 menunjukkan perubahan spesifikasi material grinding roller, dari base metal SS 446 dengan lapisan las luar dan tengah seri 1000 menjadi base metal SS 441 dengan lapisan las luar dan tengah SS 430/440. Modifikasi tersebut merupakan bagian dari penerapan reverse engineering yang bertujuan meningkatkan ketahanan terhadap keausan abrasif batu bara, memperpanjang umur pakai, serta mendukung keandalan operasional pulverizer.

2) Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan alat uji portabel pada beberapa titik dari tiga sampel material lama dan tiga sampel material baru *grinding roller*. Pengujian ini bertujuan membandingkan tingkat kekerasan, keseragaman sifat permukaan, serta kesesuaian material terhadap beban mekanis dan gesekan abrasif setelah penerapan *reverse engineering*. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan hasil pengujian kekerasan permukaan grinding roller pada material lama dan material baru.

Pengujian kekerasan menggunakan metode *Rockwell C* (HRC) mengacu pada ASTM E18 atau ISO 6508-1 untuk membandingkan karakteristik material sebelum dan sesudah *reverse engineering*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material baru berbasis *High Chromium Carbide* (HCC) memiliki kekerasan 58–62 HRC, sedangkan material lama berbasis *Complex Carbide* mencapai 63–67 HRC. Meskipun lebih rendah, kekerasan HCC berpotensi memberikan keseimbangan antara ketahanan aus, ketangguhan, dan risiko keretakan akibat beban berulang. Namun, efektivitasnya perlu divalidasi melalui pengujian keausan dan umur pakai untuk memastikan peningkatan keandalan *grinding roller pulverizer*. Hasil pengukuran yang disajikan pada Gambar 13 selanjutnya direkapitulasi secara sistematis dalam Tabel 5 untuk memudahkan analisis dan interpretasi data.

Tabel 4. Data hasil pengukuran HRC

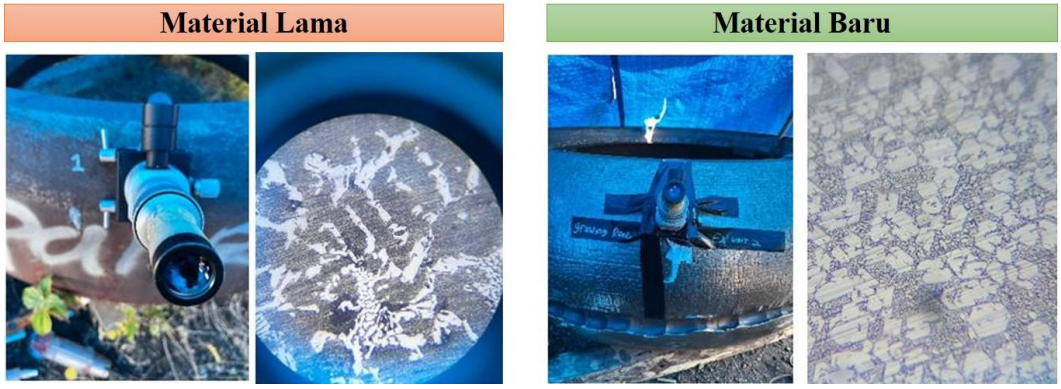
Material Lama	**Titik 1(HRC)**	**Titik 2(HRC)**	**Titik 3(HRC)**	**Rata-rata(HRC)**
Sample 1	59,1	66,4	60,1	61,87
Sample 2	64,9	65,2	62,9	64,33
Sample 3	65,6	64,4	63,3	64,43
Rata-rata				**63,5**
Material Baru	**Titik 1(HRC)**	**Titik 2(HRC)**	**Titik 3(HRC)**	**Rata-rata(HRC)**
Sample 1	63,3	60,6	34,7	52,87
Sample 2	63,7	37,5	-	50,60
Sample 3	59,7	63,5	36,9	53,37
Rata-rata				**52,5 HRC**

Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa:

Hasil pengujian pada Tabel 4 menunjukkan bahwa material lama memiliki kekerasan rata-rata 63,54 HRC, sedangkan material baru hasil *reverse engineering* sebesar 52,49 HRC, atau mengalami penurunan sekitar 17,4%. Material lama menunjukkan distribusi kekerasan yang lebih seragam, sementara material baru memiliki variasi nilai yang cukup besar. Meskipun demikian, kekerasan bukan satu-satunya indikator kualitas *grinding roller pulverizer*. Evaluasi material juga perlu mempertimbangkan ketangguhan, ketahanan aus abrasif, karakteristik struktur mikro, dan keandalan operasional. Oleh karena itu, keunggulan material baru belum dapat dipastikan berdasarkan pengujian kekerasan saja dan memerlukan validasi melalui pengujian keausan serta evaluasi kinerja operasional

3) 4.1.3. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk menganalisis struktur mikro material, meliputi morfologi dan ukuran butir, identifikasi fasa, serta pengaruh perlakuan panas atau pengelasan. Analisis ini bertujuan mengevaluasi hubungan struktur mikro dengan sifat mekanis sekaligus mengidentifikasi perbedaan struktur dan tingkat penghalusan butir antara material lama dan material baru hasil reverse engineering, dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 14. Perbandingan Hasil Pengujian Metalografi dan Struktur Mikro Material Grinding Roller Lama dan Baru.

Berdasarkan hasil pengujian metalografi pada Gambar 14, material baru menunjukkan perbedaan karakteristik struktur mikro dan morfologi butir dibandingkan material lama, yang berpotensi memengaruhi sifat mekanis, khususnya kekerasan dan ketangguhan. Perbandingan karakteristik kedua material berdasarkan sejumlah parameter evaluasi disajikan pada Tabel 6 untuk menilai keunggulan material baru sebagai hasil penerapan *reverse engineering*.

Tabel 5. Perbandingan dari uji metalography

Aspek	Material Lama	Material Baru
Ukuran Butir	Kasar dan tidak merata	Halus dan Seragam
Homogenitas	Tidak homogen (ada segregasi)	Homogen
Kondisi Internal	Ada retakan/porositas mikro	Bersih, tidak ada cacat
Kekuatan	Lebih rendah	Lebih tinggi

Berdasarkan hasil analisis metalografi pada Tabel 5, material baru menunjukkan struktur mikro yang lebih halus, homogen, dan tanpa indikasi cacat internal yang teramati dibandingkan material lama. Karakteristik tersebut berpotensi meningkatkan kekuatan mekanis, ketahanan terhadap keretakan, serta umur pakai *grinding roller*, sehingga mendukung peningkatan keandalan operasional *pulverizer*.

B. Karakteristik Material Baru

Hasil redesain komposisi material menghasilkan grinding roller dengan karakteristik yang ditingkatkan secara signifikan. Material baru menggunakan basis casting besi ulet seberat 2.335 kg dengan lapisan hardfacing seberat 932 kg yang terdiri dari dua jenis karbida krom:

- **High Chromium Carbide (HCC)** dengan kandungan Cr 15-22% dan C 3,5-5,5%, menghasilkan kekerasan 58-62 HRC.
- **Complex Carbide** dengan kandungan Cr 22-30% dan C 3,5-5,5%, menghasilkan kekerasan 63-67 HRC.

Peningkatan kadar kromium dan karbon mendorong pembentukan karbida keras dalam matriks logam yang berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap keausan abrasif dan beban impak. Analisis metalografi menunjukkan perbedaan struktur mikro dan kehalusan butir antara material lama dan material baru hasil reverse engineering.

Penerapan reverse engineering melalui pelapisan hardfacing pada permukaan grinding roller pulverizer bertujuan meningkatkan ketahanan aus, memperbaiki karakteristik permukaan, serta mendukung keandalan dan umur pakai komponen selama proses penggilingan batu bara. Proses pelapisan hardfacing pada permukaan grinding roller ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Redesain hardfacing layer applicaiton (*fabrikasi produksi grinding roller*)

Implementasi *reverse engineering* pada *grinding roller pulverizer* dilakukan melalui serangkaian tahapan penanganan komponen, persiapan permukaan, dan rekayasa pelapisan *hardfacing* untuk meningkatkan ketahanan terhadap keausan abrasif akibat proses penggilingan batu bara. Tahapan ini bertujuan memulihkan karakteristik permukaan kerja *grinding roller* serta mendukung peningkatan keandalan dan umur pakai peralatan. Dokumentasi kegiatan penanganan dan kondisi komponen selama proses rekayasa ulang ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Tahapan Penanganan dan Rekayasa Ulang Grinding Roller Pulverizer melalui Proses Hardfacing.

Gambar 15 dan 16 memperlihatkan tahapan redesain aplikator lapisan *hardfacing* (*hardfacing layer applicator*) dalam proses fabrikasi *grinding roller* melalui penerapan komposisi material hasil *reverse engineering*. Fabrikasi dilakukan menggunakan material dasar besi cor ulet (*ductile cast iron*) bermassa 2.335 kg dengan lapisan *hardfacing* bermassa 932 kg, yang terdiri atas *High Chromium Carbide* (HCC) dengan kekerasan 58–62 HRC dan *Complex Carbide* dengan kekerasan 63–67 HRC. Kombinasi material tersebut dirancang untuk membentuk fasa karbida keras yang terdistribusi dalam matriks logam, sehingga berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap keausan abrasif dan pembebanan impak selama pengoperasian *pulverizer*. Berdasarkan dokumen *Best Practice* Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan periode 2020–2024, inovasi ini diklaim sebagai implementasi pertama di sektor pembangkitan listrik Indonesia, dengan pengembangan yang juga diarahkan pada aspek pengurangan emisi.

C. Penurunan Konsumsi Daya Pulverizer

Evaluasi konsumsi daya pada enam unit *pulverizer* dilakukan dengan membandingkan data awal (*baseline*) Juli 2024 terhadap hasil pengukuran setelah implementasi *grinding roller* hasil *reverse engineering* pada Mei dan Juni 2025. Data perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan Konsumsi Daya Pulverizer (kW)

Peralatan	Baseline (Juli 2024)	Mei 2025	Juni 2025
Pulverizer 1A	378,25	342,08	348,50

Pulverizer 1B	394,67	342,26	342,77
Pulverizer 1C	375,58	329,49	333,76
Pulverizer 1D	380,51	342,72	338,27
Pulverizer 1E	374,63	341,76	341,32
Pulverizer 1F	363,20	325,15	328,11

Berdasarkan Tabel 6, implementasi *grinding roller* baru menunjukkan penurunan daya listrik pada seluruh *pulverizer* (1A–1F). Pada kondisi *baseline* Juli 2024, daya berkisar antara 363,20–394,67 kW, kemudian menurun menjadi 325,15–342,72 kW pada Mei 2025 dan 328,11–348,50 kW pada Juni 2025. Hasil ini mengindikasikan peningkatan efisiensi penggunaan daya setelah penerapan *reverse engineering*, dengan tetap mempertimbangkan kesetaraan kondisi operasional sebelum dan sesudah implementasi.

D. Penghematan Energi dan Bahan Bakar

Data operasional awal (*baseline*) dikumpulkan pada Juli 2024 sebelum penerapan *reverse engineering* material *grinding roller*. Pengukuran meliputi tegangan, arus, faktor daya (*cos φ*), dan daya listrik pada enam unit *pulverizer*. Hasilnya disajikan pada Tabel 7 sebagai acuan evaluasi perubahan konsumsi daya setelah implementasi inovasi.

Tabel 7. Data Sebelum dilakukan Reverse Engineering pada Pulverizer Grinding Material Composition (Juli 2024)

No	EQ	Tegangan (V)	Arus (I)	Cos Phi	Daya (kW)	Daya (GJ)
1	Pulverizer 1A	6.300,75	42,79	0,81	378,25	1,36
2	Pulverizer 1B	6.308,15	43,52	0,83	394,67	1,42
3	Pulverizer 1C	6.300,75	40,97	0,84	375,58	1,35
4	Pulverizer 1D	6.308,15	41,46	0,84	380,51	1,37
5	Pulverizer 1E	6.300,75	42,38	0,81	374,63	1,35
6	Pulverizer 1F	6.308,15	40,05	0,83	363,20	1,31
DAYA TOTAL (GJ)						**8,16**

Evaluasi kinerja operasional *pulverizer* setelah implementasi *reverse engineering* dilakukan berdasarkan data pengukuran pada Mei dan Juni 2025, dengan April 2025 sebagai periode implementasi program. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, faktor daya (*cos φ*), serta konsumsi daya dan energi pada enam unit *pulverizer*. Hasil pengukuran dan perhitungan penghematan energi dibandingkan dengan kondisi awal (*baseline*) disajikan pada Tabel 8 untuk mengevaluasi efektivitas penerapan material *grinding roller* baru.

Tabel 8. Data Setelah dilakukan Reverse Engineering of Pulverizer Grinding Material Composition

Equipment		Jan-25	Feb-25	Mar-25	Apr-25	May-25	Jun-25
Tegangan (V)							
1	Pulverizer 1A	**Program Belum Berjalan**			**Implementasi Program**	6.214,69	6.219,57
2	Pulverizer 1B					6.241,16	6.205,52
3	Pulverizer 1C					6.214,69	6.219,57
4	Pulverizer 1D					6.241,16	6.205,52
5	Pulverizer 1E					6.265,50	6.204,64
6	Pulverizer 1F					6.282,65	6.203,68
Cos Phi							
1	Pulverizer 1A	**Program Belum Berjalan**			**Implementasi Program**	0,88	0,88
2	Pulverizer 1B					0,88	0,88
3	Pulverizer 1C					0,81	0,81
4	Pulverizer 1D					0,80	0,80
5	Pulverizer 1E					0,81	0,81

6	Pulverizer 1F			0,80	0,80
Arus (I)					
1	Pulverizer 1A	**Program Belum Berjalan**	**Implementasi Program**	36,14	36,79
2	Pulverizer 1B			35,87	36,13
3	Pulverizer 1C			37,79	38,25
4	Pulverizer 1D			39,63	39,34
5	Pulverizer 1E			38,88	39,21
6	Pulverizer 1F			37,35	38,17
Daya (P) (kW)					
1	Pulverizer 1A	**Program Belum Berjalan**	**Implementasi Program**	342,33	348,77
2	Pulverizer 1B			341,22	341,73
3	Pulverizer 1C			329,49	333,76
4	Pulverizer 1D			342,72	338,27
5	Pulverizer 1E			341,77	341,32
6	Pulverizer 1F			325,15	328,11
Daya (P_{GJ}) (GJ)					
1	Pulverizer 1A	**Program Belum Berjalan**	**Implementasi Program**	1,23	1,25
2	Pulverizer 1B			1,23	1,23
3	Pulverizer 1C			1,19	1,20
4	Pulverizer 1D			1,23	1,22
5	Pulverizer 1E			1,23	1,23
6	Pulverizer 1F			1,17	1,18
Total Daya (P_{Total}) (GJ)				**7,28**	**7,32**
Selisih Penurunan Daya (ΔP) (GJ)				**0,88**	**0,84**
Jumlah Hari				**31**	**30**
Penghematan Daya / bulan (E_m) (GJ)				**653,48**	**608,35**
Total Penghematan Daya di Tahun 2025 (E_{total}) (GJ)				**1.261,83**	
Total Penghematan Daya di Tahun 2025 (E_{kWh}) (kWh)				**350.512,45**	

Berdasarkan Tabel 8, implementasi *reverse engineering* pada material *grinding roller* menunjukkan penurunan konsumsi energi enam unit *pulverizer* dari 8,16 GJ pada kondisi awal (Juli 2024) menjadi 7,28 GJ pada Mei 2025 dan 7,32 GJ pada Juni 2025, dengan selisih masing-masing sebesar 0,88 GJ dan 0,84 GJ. Berdasarkan perhitungan operasional, penghematan energi selama Mei dan Juni 2025 masing-masing mencapai 653,48 GJ dan 608,35 GJ, sehingga diperoleh total penghematan kumulatif sebesar 1.261,83 GJ atau sekitar 350.508 kWh. Dengan asumsi tarif listrik Rp 822/kWh, penghematan tersebut setara dengan efisiensi biaya energi sekitar Rp288,12 juta. Hasil ini mengindikasikan adanya perbaikan efisiensi penggunaan energi setelah penerapan material baru, yang berpotensi menurunkan biaya operasional dan mendukung peningkatan kinerja *pulverizer*.

E. Perhitungan penghematan biaya energi

Rumus yang digunakan:

$$S = T_e \times E_{kWh}$$

Dengan:

- S = total penghematan biaya energi (Rp).
- T_e = tarif listrik sebesar Rp822/kWh.

- E_{kWh} = total energi listrik yang dihemat (kWh).

Berdasarkan nilai penghematan energi yang tercantum dalam Tabel 4:

$$S = 350.512{,}45 \times 822 = \text{Rp } 288.121.233.90$$

Dengan demikian, estimasi penghematan biaya energi selama Mei–Juni 2025 mencapai Rp288.121.234.

F. Reduksi Emisi Lingkungan

Penurunan konsumsi energi listrik setelah implementasi *reverse engineering* pada *grinding roller pulverizer* berpotensi mengurangi kebutuhan bahan bakar dan emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran boiler. Dampak lingkungan tersebut dievaluasi melalui estimasi reduksi emisi CO_2, SO_2, NO_2, dan partikulat (PM) berdasarkan penghematan energi serta faktor emisi yang digunakan. Perhitungan mengacu pada Persamaan (9)–(12), dengan hasil estimasi reduksi emisi untuk tahun 2025 disajikan sebagai berikut.

Pengurangan Emisi CO_2

$$\Delta E_{CO_2(2025)} = 350.512{,}45 \times 0{,}001596128717\ ton\ /\ kWh$$

$\Delta E_{CO_2(2025)} = 559{,}46$ ton/tahun

Pengurangan Emisi SO_2

$$\Delta E_{SO_2(2025)} = 350.512{,}45 \times 0{,}000003613728\ ton/kWh$$

$\Delta E_{SO_2(2025)} = 1{,}27$ ton/tahun

Pengurangan Emisi NO_x

$$\Delta E_{NO_x(2025)} = 350.512{,}45 \times 0{,}000000107990\ ton/kWh$$

$\Delta E_{NO_x(2025)} = 0.04$ ton/tahun

Pengurangan Emisi (PM)

$$\Delta E_{PM(2025)} = 350.512{,}45 \times 0,000000169925\ ton/kWh$$

$\Delta E_{PM(2025)} = 0.06$ ton/tahun

Evaluasi dampak lingkungan dari implementasi *reverse engineering* pada *grinding roller pulverizer* dilakukan melalui estimasi penurunan emisi gas rumah kaca (CO_2) dan polutan konvensional, meliputi SO_2, NO_2, serta partikulat (PM). Perhitungan reduksi emisi didasarkan pada penghematan energi dan faktor emisi yang digunakan, dengan hasil estimasi untuk tahun 2025 disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca CO_2, dan emisi konvensional (SO_2, NO_2, dan PM)

	2023	2024	2025
CO_2	-	-	559,46 ton/tahun
SO_2	-	-	1,27 ton/tahun
NO_2	-	-	0.04 ton/tahun
PM	-	-	0.06 ton/tahun

Berdasarkan Tabel 9, implementasi *reverse engineering* pada *grinding roller pulverizer* menghasilkan estimasi reduksi emisi pada tahun 2025, meliputi CO_2 sebesar 559,46 ton/tahun, SO_2 sebesar 1,27 ton/tahun, NO_2 sebesar 0,04 ton/tahun, dan partikulat (PM) sebesar 0,06 ton/tahun. Penurunan terbesar secara kuantitatif terjadi pada emisi CO_2, yang menunjukkan potensi kontribusi penghematan energi terhadap mitigasi emisi gas rumah kaca. Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan efisiensi operasional *pulverizer* tidak hanya berpotensi mengurangi konsumsi energi dan biaya operasional, tetapi juga mendukung pengendalian pencemaran udara serta pencapaian target keberlanjutan lingkungan pada sektor pembangkitan listrik.

G. Penghematan Biaya Operasional

Evaluasi manfaat ekonomi implementasi *reverse engineering* pada *grinding roller pulverizer* dilakukan berdasarkan penghematan energi listrik sebesar 350.512,45 kWh dengan tarif Rp 822/kWh, sehingga diperoleh estimasi penghematan biaya operasional sebesar Rp288.121.233,90 hingga Juni 2025. Selain itu, berdasarkan nilai *Specific Coal Consumption* (SCC) sebesar 0,62 kg/kWh, program ini menghasilkan estimasi penghematan konsumsi batu bara sebesar 217.317,72 kg. Penghematan tersebut mencerminkan potensi peningkatan efisiensi operasional, pengurangan kebutuhan bahan bakar, serta penurunan emisi pembakaran. Rekapitulasi manfaat ekonomi dan penghematan energi hasil implementasi program disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Penghematan dari Reverse Engineering

	2023	2024	2025
Total Saving Daya (GJ)	-	-	1.261,83 GJ
Total Saving Daya (kWh)	-	-	350.512,45 kWh
Total Saving (Rp)	-	-	Rp.288.121.233,-

Berdasarkan Tabel 10, penerapan *reverse engineering* material *grinding roller pulverizer* pada tahun 2025 menghasilkan penghematan energi listrik sebesar 1.261,83 GJ (350.512,45 kWh), setara dengan penghematan biaya Rp288.121.233, serta berpotensi menurunkan kebutuhan batu bara. Hasil ini menunjukkan manfaat ekonomi melalui peningkatan efisiensi penggunaan energi. Selain itu, inovasi ini berpotensi meningkatkan keandalan peralatan, mengurangi risiko penghentian operasi (*downtime*), dan menekan biaya pemeliharaan, sehingga mendukung efisiensi serta keberlanjutan operasional pembangkit.

H. Peningkatan Keandalan Operasional

Penerapan *reverse engineering* material *grinding roller* menghasilkan perubahan karakteristik kekerasan dan struktur mikro yang berpotensi meningkatkan efektivitas penggilingan batu bara, khususnya pada nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI) rendah. Modifikasi ini diharapkan meningkatkan kehalusan batu bara, mengurangi sirkulasi partikel kasar dan penumpukan material, serta menekan beban kerja *pulverizer* dan risiko *derating*. Penurunan konsumsi daya pascai mplementasi mengindikasikan perbaikan efisiensi operasional yang berpotensi mengurangi gangguan mekanis dan *unplanned downtime*. Dalam jangka panjang, inovasi ini diharapkan meningkatkan *Equivalent Availability Factor* (EAF), menjaga kontinuitas pasokan listrik, serta mendukung keandalan sistem kelistrikan Jawa–Bali. Dengan demikian, *reverse engineering* menjadi pendekatan strategis dalam mengintegrasikan rekayasa material, efisiensi energi, keandalan, dan keberlanjutan operasional pembangkit.

V. Diskusi

A. Efektivitas Pendekatan Reverse Engineering

Penerapan *reverse engineering* melalui pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), kekerasan, dan metalografi menjadi dasar identifikasi kelemahan serta optimalisasi komposisi dan struktur mikro material *grinding roller*. Rekayasa lapisan *hardfacing* berbasis *High Chromium Carbide* (HCC) dengan kandungan Cr 15–22% dan C 3,5–5,5%, serta *Complex Carbide* dengan Cr 22–30% dan C 3,5–5,5%, bertujuan membentuk fasa karbida keras untuk meningkatkan ketahanan terhadap keausan abrasif (*abrasive wear*) dan kelelahan material (*fatigue wear*). Rentang kekerasan acuan HCC sebesar 58–62 HRC dan *Complex Carbide* sebesar 63–67 HRC menunjukkan potensi ketahanan terhadap penggilingan batu bara dengan *Hardgrove Grindability Index* (HGI) rendah, sehingga diharapkan dapat mengurangi keausan dan memperpanjang umur pakai komponen.

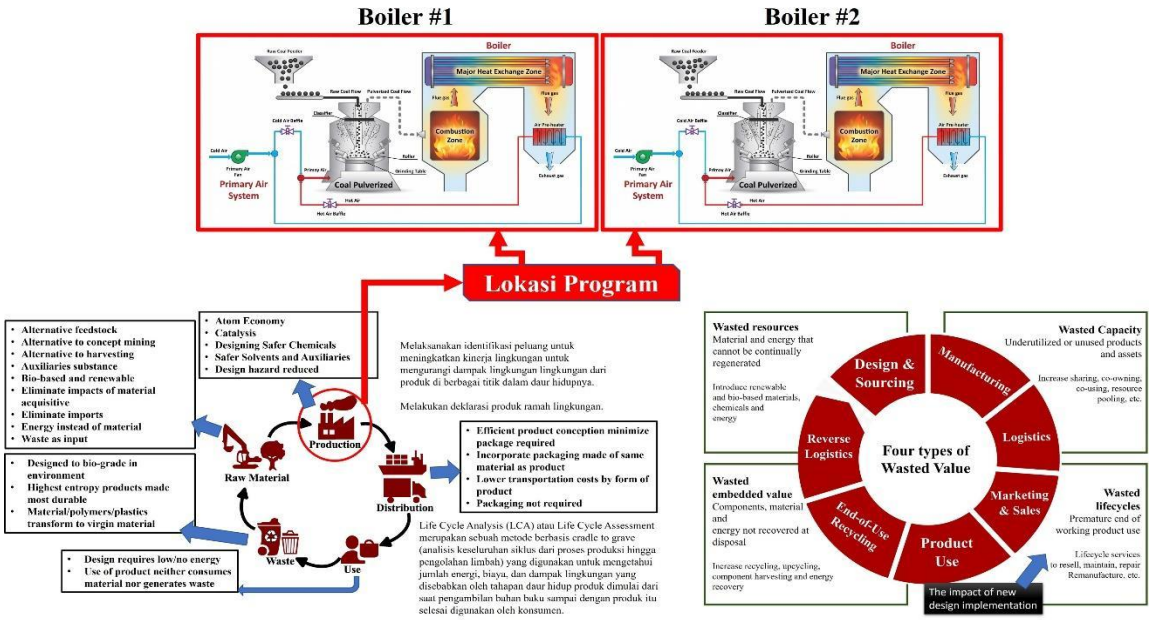
B. Dampak terhadap Efisiensi Energi dan Operasional

Penerapan *reverse engineering* material *grinding roller* menunjukkan perbaikan kinerja operasional *pulverizer*, ditandai dengan penurunan daya listrik dari 363,20–394,67 kW menjadi 325,15–342,72 kW. Optimalisasi material ini berpotensi meningkatkan kehalusan batu bara, mengurangi sirkulasi partikel kasar dan penumpukan material, serta menekan beban kerja *pulverizer*. Evaluasi tahun 2025 menunjukkan estimasi penghematan energi sebesar 1.261,83 GJ (sekitar 350.508 kWh), dengan potensi pengurangan konsumsi batu bara sebesar 217.317,72 kg. Hasil ini mengindikasikan manfaat *reverse engineering* terhadap efisiensi energi dan biaya operasional, sekaligus berpotensi mendukung konservasi sumber daya, pengurangan emisi, dan keberlanjutan operasional pembangkit..

C. Kontribusi terhadap Keberlanjutan Lingkungan

Implementasi *reverse engineering* material *grinding roller pulverizer* menghasilkan estimasi reduksi emisi tahunan sebesar 559,46 ton CO_2, 1,27 ton SO_2, 0,04 ton NO_2, dan 0,06 ton partikulat (PM). Penurunan ini menunjukkan potensi manfaat lingkungan melalui efisiensi energi dan pengurangan kebutuhan bahan bakar. Dalam perspektif *Life Cycle Assessment* (LCA), inovasi tersebut berpotensi menekan jejak karbon, pembentukan hujan asam, pencemaran udara, serta risiko kesehatan akibat paparan polutan. Dengan demikian, optimalisasi material *grinding roller* memberikan potensi manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan bagi keberlanjutan operasional pembangkit.

Penerapan inovasi ini difokuskan pada tahap operasional produksi listrik, khususnya sistem penggilingan batu bara yang terintegrasi dengan proses pembakaran pada Boiler #1 dan Boiler #2. Optimalisasi material bertujuan mengurangi konsumsi energi penunjang, kebutuhan bahan bakar, serta emisi gas rumah kaca dan polutan konvensional, sejalan dengan prinsip efisiensi sumber daya dalam LCA. Keterkaitan lokasi implementasi dengan sistem pembangkitan dan kerangka LCA ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Integrasi Program Reverse Engineering Grinding Roller Pulverizer dalam Kerangka Life Cycle Assessment (LCA).

D. Nilai Tambah Ekonomi dan Rantai Nilai

Implementasi *reverse engineering* material *grinding roller pulverizer* memberikan nilai tambah bagi pemangku kepentingan melalui optimalisasi rantai nilai (*value chain*). Alokasi anggaran Rp2.008.203.120 selama 2024–2025 mendukung kerja sama pengadaan, pemeliharaan, dan rekondisi komponen dengan PT PLN Pusharlis serta PT Prima Layanan Niaga Suku Cadang. Bagi PT PLN Nusantara Power, inovasi ini menghasilkan estimasi penghematan biaya energi sebesar Rp288.121.233 pada tahun 2025, sekaligus berpotensi meningkatkan keandalan peralatan, efisiensi bahan bakar, dan mengurangi risiko kehilangan produksi. Sementara itu, bagi PT PLN (Persero), peningkatan kinerja *pulverizer* diharapkan mendukung perbaikan *Equivalent Availability Factor* (EAF), kontinuitas pasokan listrik, serta keandalan sistem Jawa–Bali. Dengan demikian, program ini berpotensi memberikan manfaat ekonomi dan operasional yang berkelanjutan bagi seluruh pemangku kepentingan.

E. Implikasi untuk Industri Pembangkit Listrik

Implementasi *reverse engineering* pada material *grinding roller pulverizer* memberikan kontribusi teknis yang berpotensi diterapkan secara lebih luas dalam industri pembangkitan listrik. Pendekatan sistematis melalui integrasi karakterisasi material, rekayasa ulang berbasis data, dan evaluasi kinerja operasional dapat menjadi model pengembangan teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan komponen kritis pembangkit. Mengingat variasi karakteristik batu bara, khususnya nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI), merupakan tantangan operasional pada PLTU yang menggunakan bahan bakar dari berbagai sumber, penerapan teknologi *hardfacing* berbasis karbida krom menawarkan alternatif solusi untuk meningkatkan ketahanan aus dan kinerja *grinding roller*. Dengan mempertimbangkan kesesuaian spesifikasi material dan kondisi operasional, inovasi ini berpotensi direplikasi pada pembangkit lain yang menghadapi permasalahan serupa. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan manfaat bagi optimalisasi kinerja PLTU Tanjung Awar-Awar, tetapi juga menjadi referensi pengembangan strategi pemeliharaan berbasis rekayasa material yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan bagi industri ketenagalistrikan.

F. Keterbatasan dan Rekomendasi Penelitian Lanjutan

Meskipun menunjukkan hasil positif, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, evaluasi operasional hanya mencakup Mei–Juni 2025, sehingga diperlukan pemantauan jangka panjang terhadap keausan, kekerasan, umur pakai, dan keandalan *grinding roller*. Kedua, analisis biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost Analysis/LCCA*) belum dilakukan secara menyeluruh untuk menilai kelayakan investasi, penghematan energi, biaya pemeliharaan, dan umur ekonomis komponen. Ketiga, kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) belum mencakup seluruh tahapan siklus hidup material, mulai dari pengadaan bahan baku hingga akhir masa pakai. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu mengintegrasikan evaluasi teknis, ekonomi, dan lingkungan secara komprehensif guna memperkuat validitas hasil serta mendukung keberlanjutan dan replikasi inovasi pada industri pembangkitan listrik.

Rekomendasi penelitian lanjutan meliputi:

- **Evaluasi teknis jangka panjang** terhadap keausan, perubahan kekerasan, umur pakai, dan keandalan *grinding roller*.
- **Analisis biaya siklus hidup (LCCA)** untuk menilai kelayakan ekonomi dan efektivitas investasi.
- **Kajian LCA menyeluruh** untuk mengukur dampak lingkungan bersih sepanjang siklus hidup material.
- **Validasi kinerja operasional** berdasarkan kesetaraan beban, kapasitas penggilingan, dan karakteristik batu bara (HGI) guna memastikan efektivitas inovasi.

VI. Kesimpulan

Penerapan *reverse engineering* material *grinding roller pulverizer* di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Tanjung Awar-Awar menunjukkan potensi dalam mengatasi keausan komponen dan risiko *derating* akibat variasi nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI) batu bara. Pendekatan berbasis pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), kekerasan, dan metalografi menjadi dasar identifikasi kelemahan serta pengembangan material alternatif.

Material baru menggunakan *ductile iron casting* seberat 2.335 kg dengan lapisan *hardfacing* 932 kg, berbasis *High Chromium Carbide* (HCC) dengan Cr 15–22%, C 3,5–5,5%, dan kekerasan acuan 58–62 HRC, serta *Complex Carbide* dengan Cr 22–30%, C 3,5–5,5%, dan kekerasan acuan 63–67 HRC. Rekayasa ini bertujuan meningkatkan ketahanan aus dan keandalan operasional *grinding roller*.

Implementasi material baru menunjukkan penurunan daya *pulverizer* dari 363,20–394,67 kW menjadi 325,15–342,72 kW. Evaluasi tahun 2025 menghasilkan estimasi penghematan energi sebesar 1.261,83 GJ (350.512,45 kWh), pengurangan kebutuhan batu bara 217.317,72 kg, dan penghematan biaya energi Rp288.121.233. Selain itu, diperoleh estimasi reduksi emisi tahunan sebesar 559,46 ton CO_2, 1,27 ton SO_2, 0,04 ton NO_2, dan 0,06 ton partikulat (PM).

Dalam perspektif *Life Cycle Assessment* (LCA), hasil tersebut mengindikasikan potensi pengurangan dampak lingkungan pada tahap produksi listrik melalui efisiensi energi dan sumber daya. Dengan demikian, *reverse engineering* berpotensi menjadi pendekatan strategis untuk meningkatkan efisiensi operasional, memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan, serta mendukung pengembangan teknologi serupa pada komponen kritis industri pembangkitan listrik

Daftar Pustaka

[1] C. Bhattacharya, “Capacity Mapping for Optimum Utilization of Pulverizers for Coal Fired Boilers,” *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 130, no. 3, p. 032201, Sep. 2008, doi: 10.1115/1.2955563.

[2] M. Tontu, “An investigation of performance characteristics and energetic efficiency of vertical roller coal mill,” *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 41, no. 4, pp. 248–262, Apr. 2021, doi: 10.1080/19392699.2020.1799200.

[3] Moch Fikar Surahman, “Analisis Kinerja Coal Mill Unit 4 PT. PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu,” *JPC*, vol. 2, no. 1, pp. 350–358, Jan. 2026, doi: 10.71417/jpc.v2i1.134.

[4] A. G. P. Butarbutar, K. Anggayana, A. H. Widayat, and M. D. Rifaldi, “Relationship of maceral composition and coal rank to hardgrove grindability index (HGI) in coal samples from Batu Ayau formation, Indonesia,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1486, no. 1, p. 012030, Apr. 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1486/1/012030.

[5] Xiaohong Jiang and Ping Ye, “Analysis and study of the crushing mechanism of the MPS vertical roller mill,” in *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Inner Mongolia, China: IEEE, Jul. 2011, pp. 1029–1032. doi: 10.1109/MACE.2011.5987109.

[6] M. Klymenko and V. Marach, “Specific aspects of vertical roller mills design selection,” *ZNP*, vol. 1, no. 64, pp. 153–160, Jun. 2025, doi: 10.26906/znp.2025.64.4148.

[7] H. Purnomo and B. Sudarmanta, “Numerical simulation of coal particle size (fineness) effect to combustion characteristics of sub-critical pulverized coal boiler 600 MW capacity,” presented at the THE 4TH BIOMEDICAL ENGINEERING’S RECENT PROGRESS IN BIOMATERIALS, DRUGS DEVELOPMENT, HEALTH, AND MEDICAL DEVICES: Proceedings of the International Symposium of Biomedical Engineering (ISBE) 2019, Padang, Indonesia, 2019, p. 020033. doi: 10.1063/1.5138288.

[8] M. Zhu, C. Zhou, and A. Che, “Simulation-Optimization Approach for Integrated Scheduling at Wharf Apron in Container Terminals,” in *Proc. Winter Simul. Conf.*, Feng B., Pedrielli G., Peng Y., Shashaani S., Song E., Corlu C.G., Lee L.H., Chew E.P., Roeder T., and Lendermann P., Eds., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 1944–1955. doi: 10.1109/WSC57314.2022.10015248.

[9] X. Ma, "Optimization of Pulverized Coal Fineness on Coal-fired Power Unit. Boiler Technology." Boiler Technology, 2006. [Online]. Available: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-GLJS200605009.htm

[10] L. P. Gu, S. G. Liu, D. L. Gu, and Y. S. Xu, "Failure Analysis and Research Progress of Resurfacing Welding Material of Coal Mill Roller," *AMR*, vol. 873, pp. 514–518, Dec. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.873.514.

[11] S. Žic, J. Žic, and T. Meštrović, "Improvement of coal fired power plant's performance by use of wear resistant components," in *9th International conference on advanced manufacturing systems and technology (AMST'11): proceedings*, Rijeka: Faculty of Engineering, 2011, pp. 519–527. Accessed: Oct. 15, 2026. [Online]. Available: https://www.croris.hr/crosbi/publikacija/resolve/croris/573596

[12] M. A. Maleque, M. M. Rahman, and M. S. Hossain, "Reverse Engineering of Motorcycle Chain," *AMR*, vol. 264–265, pp. 1678–1683, Jun. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.264-265.1678.

[13] M. Aladag, M. Bernacka, M. Joka-Yildiz, W. Grodzki, P. Zamojski, and I. Zgłobicka, "Reverse Engineering of Parts with Asymmetrical Properties Using Replacement Materials," *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 16, no. 3, pp. 250–258, Sep. 2022, doi: 10.2478/ama-2022-0030.

[14] R. P. S. Wening Galih and B. A. Dwiyantoro, "Effect of Diffusers Installation in Inlet Primary Air Coal Pulve," *JMES*, vol. 6, no. 2, pp. 57–74, Jul. 2025, doi: 10.12962/j25807471.v6i2.12045.

[15] C. Özer, W. Whiten, F. Shi, and T. Dixon, "Investigation of the classification operation in a coal pulverising vertical spindle mill," 2010. Accessed: Oct. 15, 2026. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/Investigation-of-the-classification-operation-in-a-%C3%96zer-Whiten/879651d45336a79433de2ecd24711ecae31d1514

[16] W. Guo-shu, "The Operating Principle of Pulverizer on Fossil-Coal Fired Power Plant." Power System Engineering, 2005. doi: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-DZXT200504004.htm.

[17] Xiaohong Jiang and Ping Ye, "Analysis and study of the crushing mechanism of the MPS vertical roller mill," in *2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Inner Mongolia, China: IEEE, Jul. 2011, pp. 1029–1032. doi: 10.1109/MACE.2011.5987109.

[18] M. Klymenko, V. Marach, and M. Hubchyk, "COMPARISON OF THE DESIGNS OF WORKING ELEMENTS OF VERTICAL ROLLER MILLS," *ТБ*, no. 42, pp. 123–130, Jul. 2025, doi: 10.32347/tb.2025-42.0513.

[19] J. Kuronen, M. Hotti, and S. Tuuri, "Modelling and Dynamic Simulation of Cyclically Operated Pulverized Coal-Fired Power Plant," presented at the Proceedings of The 9th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM 2016, The 57th SIMS Conference on Simulation and Modelling SIMS 2016, Dec. 2018, pp. 122–128. doi: 10.3384/ecp17142122.

[20] X. Lai-hui, "TEST STUDY ON OPERATION CHARACTERS OF ZGM-113G MEDIUM SPEED COAL PULVERIZER." Thermal Power Generation, 2009. doi: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-RLFD200912015.htm.

[21] K. Kogut *et al.*, "A Study on the Hard Coal Grindability Dependence on Selected Parameters," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 8158, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14238158.

[22] G. Gaesenngwe, G. Danha, T. Mamvura, and P. Raghupatruni, "A study on the Interdependence of TGA evaluation parameters and the Hardgrove Grindability Coal Index," Aug. 16, 2024, *In Review*. doi: 10.21203/rs.3.rs-4739085/v1.

[23] T. G. Bridgeman, J. M. Jones, A. Williams, and D. J. Waldron, "An investigation of the grindability of two torrefied energy crops," *Fuel*, vol. 89, no. 12, pp. 3911–3918, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.fuel.2010.06.043.

[24] M. Rejdak, T. Micorek, and J. C. Hower, "Influence of selected factors of Polish coking coals on the Hardgrove Grindability Index (HGI)," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 41, no. 11, pp. 789–802, Nov. 2021, doi: 10.1080/19392699.2018.1526790.

[25] R. Matjie, J. Bunt, A. Goosen, K. Mphahlele, and R. Uwaoma, "Effect of chemical, mineralogical, and petrographic properties on the grindability of a South African Highveld coal," *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, vol. 123, no. 7, pp. 381–390, Oct. 2023, doi: 10.17159/2411-9717/2423/2023.

[26] M. Tlotleng, "Coal characteristics that lead to abrasion during grinding [University of the Witwatersrand]." In University of the Witwatersrand, Johannesburg Institutional Repository on DSpace (University of the Witwatersrand, Johannesburg), 2011. doi: http://hdl.handle.net/10539/10572.

[27] M. Obradovic, D. Radic, D. Todorovic, A. Jovovic, N. Karlicic, and M. Stanojevic, "Practical assessment of grinding capacity and power consumption based on Hardgrove grindability index and coal characteristics," *Therm sci*, vol. 23, no. Suppl. 5, pp. 1533–1542, 2019, doi: 10.2298/TSCI1806053760.

[28] A. Idris, Z. Man, A. Bustam, N. E. Rabat, F. Uddin, and H. Abdul Mannan, "Grindability and abrasive behavior of coal blends: analysis and prediction," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 42, no. 4, pp. 1143–1169, Apr. 2022, doi: 10.1080/19392699.2019.1694009.

[29] W. Dong, "Open Arc Surfacing Welding Process for the Milling Roller." Rejiagong Gongyi, 2009. doi: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-ZZJS200903062.htm.

[30] R. Donais, A. Tyler, K. Dufrane, W. Glaeser, T. Merriman, and I. Wright, "Evaluation of coal pulverizer materials: Effect of coal characteristics on wear performance and reliability: Final report," Aug. 1988. Accessed: Oct. 15, 2026. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluation-of-coal-pulverizer-materials%3A-Effect-of-Donais-Tyler/a5f53a9c087284cc949f563c03e36c21628fe7af

[31] S. M. Patwardtian, "Innovative Wearfacing/Reclamation Techniques," *IWJ*, vol. 27, no. 2, p. 31, Apr. 1994, doi: 10.22486/iwj.v27i2.148267.

[32] A. N. Wieczorek, I. Jonczy, P. Bała, K. Stankiewicz, and M. Staszuk, "Testing the Wear Mechanisms of the Components of Machines Used in Fossil Energy Resource Extraction," *Energies*, vol. 14, no. 8, p. 2125, Apr. 2021, doi: 10.3390/en14082125.

[33] M. Petrica, S. Peissl, and E. Badisch, "Influence of Coal on the Wear Behavior of Steels in 3-Body Conditions," *KEM*, vol. 604, pp. 75–78, Mar. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.604.75.

[34] Z. Milutinovic, M. Ristic, I. Vasovic Maksimović, M. Prokolab, and B. Gligorijevic, "Analyzing Properties of New Hard Coating Technologies for Increasing the Wear Resistance," *AMR*, vol. 1029, pp. 112–117, Sep. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1029.112.

[35] M. A. Guryev, S. G. Ivanov, E. V. Chernykh, V. V. Romanenko, and A. M. Guryev, "Reengineering of Technology for Producing Castings from High-Chromium Cast Iron ChKh28," *Phys. Solid State*, vol. 65, no. 1, pp. 17–20, Jan. 2023, doi: 10.1134/S1063783423700105.

[36] J. Xiong, J. Fan, and J. Yuan, "The Application and the Prospect of Remanufacturing Technologies in the Metallurgical Industry," *Front. Eng*, vol. 3, no. 2, p. 165, 2016, doi: 10.15302/J-FEM-2016023.

[37] W. Zhai *et al.*, "Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties, and Applications," *Advanced Science*, vol. 8, no. 11, p. 2003739, Jun. 2021, doi: 10.1002/advs.202003739.

[38] X. Jin, B. Chen, and K. Feng, "Effect of Chromium on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys," *MSF*, vol. 1001, pp. 41–46, Jul. 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1001.41.

[39] X. Fa-hon, "Effect of mechanical stirring on microstructure and wear behavior of Fe-Cr-C system open arc hardfacing alloys." Cailiao Rechuli Xuebao, 2015. doi: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-JSCL201507035.htm.

[40] Q. Zhang, "M_7C_3-type carbide and abrasion resistance of Fe-C-Cr-V high chromium hardfacing alloys." Transactions of the China Welding Institution, 2010. doi: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-HJXB201001008.htm.

[41] L. Zong and Z. J. Liu, "Microstructure Characteristics of Fe-xCr-C Hardfacing Alloys," *AMR*, vol. 472–475, pp. 165–168, Feb. 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.165.

[42] Y. Agrawal, A. S. Yadav, N. Tenguria, S. Katkade, and A. Sharma, "Investigating the Enhancement of Mechanical Properties through Hardfacing in Submerged Arc Welding: An Experimental Approach," *SSRG-IJME*, vol. 11, no. 6, pp. 19–26, Jun. 2024, doi: 10.14445/23488360/IJME-V11I6P103.

[43] R. Turconi, A. Boldrin, and T. Astrup, "Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 555–565, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013.

[44] L. Yin, Y. Liao, L. Zhou, Z. Wang, and X. Ma, "Life cycle assessment of coal-fired power plants and sensitivity analysis of CO_2 emissions from power generation side," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 199, p. 012055, May 2017, doi: 10.1088/1757-899X/199/1/012055.