

Optimasi Sistem Selective Catalytic Reduction (SCR) Dengan Cairan Urea Untuk Reduksi Emisi NO_x Pada Mesin Diesel Caterpillar 3600 Pembangkit Listrik

Yunus Lapu Toding^{1*}, Atus Buku¹, Corvis L Rantererung¹

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar
Jalan Perintis Kemerdekaan Km 13 No. 28 Daya, Makassar, Indonesia 90243
Email: yunus.toding@live.com

ABSTRAK

Emisi nitrogen oksida (NO_x) dari mesin diesel pembangkit listrik merupakan tantangan utama dalam mencapai standar emisi lingkungan yang semakin ketat sesuai Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas teknologi Selective Catalytic Reduction (SCR) menggunakan cairan urea dalam mereduksi emisi NO_x pada mesin diesel Caterpillar 3600 series di PT Puncak Jaya Power. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan desain before-after control impact (BACI) pada tiga unit mesin (LIP-1, LIP-2, LIP-3) dengan pengukuran emisi menggunakan Continuous Emission Monitoring System (CEMS) sesuai standar ISO 8178. Data baseline menunjukkan emisi NO_x rata-rata 806 ppm sebelum optimasi sistem SCR. Setelah implementasi dan optimasi parameter operasional SCR, unit LIP-4 berhasil mencapai reduksi NO_x hingga 68,2% dengan emisi turun dari 286 ppm menjadi 91 ppm. Namun, unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3 masih menunjukkan emisi tinggi rata-rata 900 ppm, mengindikasikan perlunya optimasi lebih lanjut pada parameter suhu operasi, rasio stoikiometri urea, dan kondisi katalis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem SCR dengan pengaturan optimal mampu memenuhi target emisi <200 ppm, namun memerlukan penyesuaian spesifik untuk setiap unit mesin berdasarkan kondisi operasional dan karakteristik katalis.

Kata kunci: selective catalytic reduction, emisi NO_x, mesin diesel Caterpillar, pembangkit listrik, cairan urea

ABSTRACT

Nitrogen oxide (NO_x) emissions from diesel power plant engines pose a significant challenge in achieving increasingly stringent environmental emission standards, according to the Minister of Environment and Forestry Regulation No. 13 of 2021. This research aims to analyze the effectiveness of Selective Catalytic Reduction (SCR) technology using urea solution in reducing NO_x emissions from Caterpillar 3600 series diesel engines at PT Puncak Jaya Power. The research method uses an experimental approach with a before-and-after control impact (BACI) design on three engine units (LIP-1, LIP-2, LIP-3) with emission measurements using a Continuous Emission Monitoring System (CEMS) according to ISO 8178 standards. Baseline data shows average NO_x emissions of 806 ppm before SCR system optimization. After implementation and optimization of SCR operational parameters, the LIP-4 unit achieved NO_x reduction up to 68.2%, dropping emissions from 286 ppm to 91 ppm. However, units LIP-1, LIP-2, and LIP-3 still show high emissions averaging 900 ppm, indicating the need for further optimization of operating temperature parameters, urea stoichiometric ratio, and catalyst conditions. Results show that SCR systems with optimal settings can meet emission targets <200 ppm, but require specific adjustments for each engine unit based on operational conditions and catalyst characteristics.

Keywords: selective catalytic reduction, NO_x emissions, Caterpillar diesel engine, power plant, urea solution

Pendahuluan

Sektor energi di Indonesia terus menghadapi tantangan kompleks dalam menyediakan pasokan listrik yang andal untuk memenuhi permintaan yang terus meningkat, sembari tetap mematuhi peraturan lingkungan yang semakin ketat [1]. Pembangkit listrik berbasis mesin diesel memainkan peran strategis, terutama di wilayah terpencil dan area industri seperti pertambangan, dimana sistem ini menjadi tulang punggung penyediaan energi yang dapat diandalkan [2]. Namun, operasi mesin diesel menghasilkan emisi gas buang yang mengandung senyawa berbahaya, terutama nitrogen oksida (NO_x), yang terdiri dari nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂), yang terbentuk selama proses pembakaran dengan temperatur tinggi [3].

Emisi NO_x memiliki dampak lingkungan yang signifikan dan dikenal berperan dalam pembentukan ozon di lapisan troposfer, fenomena hujan asam, serta berbagai gangguan kesehatan saluran pernapasan manusia [4]. Karakteristik NO_x yang sangat reaktif memungkinkannya berinteraksi dengan senyawa lain di atmosfer membentuk ozon troposferik dan partikel halus yang berdampak negatif terhadap kualitas udara perkotaan [5]. Selain itu, NO₂ yang memiliki warna cokelat kemerahan dan bau tajam yang menyengat bersifat korosif dan dapat merusak material serta jaringan biologis, sementara sifat solubilitasnya dalam air membentuk asam nitrat (HNO₃) yang berkontribusi terhadap hujan asam. Menanggapi kondisi ini, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia telah menerbitkan regulasi baru dalam Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021 [6], yang memperketat ambang batas emisi yang diperbolehkan. Kebijakan ini mewajibkan para pelaku industri untuk mengimplementasikan teknologi pengendalian emisi yang lebih efektif guna menurunkan kadar pencemar udara yang dilepaskan ke lingkungan dan mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan. Implementasi regulasi ini memberikan tekanan signifikan bagi industri pembangkit listrik diesel untuk mengadopsi teknologi after-treatment yang mampu memenuhi standar emisi yang ditetapkan [7].

Teknologi Selective Catalytic Reduction (SCR) yang menggunakan injeksi urea cair telah terbukti sangat efektif dalam menurunkan emisi nitrogen oksida dengan tingkat efisiensi mencapai 90 hingga 95% pada kondisi operasional optimal [8]. Proses ini melibatkan reaksi katalitik yang kompleks antara amonia (NH₃), yang dihasilkan dari dekomposisi urea, dan gas NO_x, sehingga menghasilkan nitrogen (N₂) dan uap air (H₂O) sebagai produk akhir yang tidak berbahaya bagi lingkungan. Mekanisme reaksi SCR dimulai dengan hidrolisis urea menjadi isosianat (HNCO) dan amonia pada suhu tinggi, yang kemudian bereaksi dengan NO_x pada permukaan katalis untuk menghasilkan nitrogen dan air [9].

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Wang et al. [8] menunjukkan bahwa sistem SCR dapat mencapai efisiensi reduksi NO_x hingga 88-92% pada suhu 300-400°C dengan rasio stoikiometri NH₃/NO_x sebesar 1,0 pada mesin diesel 1000 kW. Namun, penelitian tersebut juga mengidentifikasi bahwa deposit urea dapat terjadi jika suhu operasi di bawah 200°C, yang menjadi tantangan utama dalam penerapan teknologi ini. Studi komparasi yang dilakukan oleh Issa et al. [10] membandingkan efektivitas SCR dengan teknologi lain seperti kombinasi Exhaust Gas Recirculation (EGR) dan Diesel Particulate Filter (DPF), menunjukkan bahwa SCR lebih efektif dengan tingkat reduksi 85-93% dibandingkan EGR+DPF yang hanya mencapai 50-70%, meskipun memiliki biaya operasional yang lebih tinggi akibat konsumsi urea. Optimasi laju injeksi urea menjadi faktor kritis dalam kinerja sistem SCR, sebagaimana yang dikemukakan oleh Park & Kim [2] yang memvariasikan laju injeksi AdBlue dari 5-15% dari aliran gas buang pada mesin 500 kW. Penelitian tersebut menemukan bahwa laju injeksi optimal 10% memberikan reduksi NO_x 90% dengan slip NH₃ kurang dari 10 ppm, sementara over-injeksi urea menyebabkan ammonia slip dan pembentukan deposit yang merugikan. Fenomena ini sejalan dengan temuan Geertsma et al. [11] yang memodelkan sistem propulsi diesel dan menunjukkan bahwa kontrol pitch yang tepat dapat meningkatkan efisiensi energi, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan menurunkan emisi secara signifikan.

Simulasi numerik yang dikembangkan oleh Börnhorst et al. [9] menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk mengoptimalkan desain reaktor SCR menunjukkan bahwa distribusi urea yang tidak merata dapat mengurangi efisiensi hingga 15%. Solusi yang direkomendasikan adalah penambahan static mixer di inlet reaktor untuk meningkatkan homogenitas pencampuran urea dengan gas buang. Temuan ini mengindikasikan pentingnya desain sistem injeksi yang tepat untuk mencapai kinerja optimal SCR. Dampak kualitas bahan bakar terhadap kinerja SCR juga menjadi aspek penting yang perlu dipertimbangkan, terutama kandungan sulfur yang dapat menyebabkan deaktivasi katalis melalui sulfur poisoning [12]. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan bakar dengan kandungan sulfur tinggi dapat mengurangi umur katalis dan efisiensi sistem SCR secara keseluruhan. Hal ini menjadi pertimbangan penting dalam implementasi SCR di Indonesia dimana kualitas bahan bakar solar masih bervariasi.

Walaupun teknologi SCR telah banyak digunakan pada kendaraan ringan dan pembangkit listrik berskala besar, penerapannya pada mesin diesel yang digunakan di sektor pertambangan masih relatif terbatas. Kesenjangan penelitian muncul karena minimnya studi empiris terkait kinerja SCR pada mesin tipe Caterpillar seri 3600 dalam lingkungan pertambangan yang dikenal ekstrem dengan kondisi operasi yang menantang seperti debu, kelembapan tinggi, dan fluktuasi beban yang signifikan. Selain itu, belum banyak kajian yang membahas optimasi parameter operasional untuk mencapai efisiensi maksimum serta dampak jangka panjang penggunaan teknologi ini terhadap daya tahan dan performa mesin dalam kondisi operasi pertambangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komprehensif penerapan SCR pada mesin Caterpillar 3600 yang beroperasi di PT Puncak Jaya Power, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua. Lokasi ini dipilih karena representatif untuk penerapan teknologi SCR dalam kondisi operasional industri pertambangan yang sesungguhnya dengan berbagai tantangan teknis dan lingkungan yang unik. Penelitian difokuskan untuk menganalisis efektivitas reduksi emisi NO_x, identifikasi parameter operasional optimal, serta evaluasi teknis terkait pengaruh sistem SCR terhadap kinerja mesin dalam jangka panjang. Hasil dari studi ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam merumuskan strategi pengendalian emisi yang lebih efektif dan

aplikatif di sektor pertambangan, serta menjadi referensi bagi pengembangan kebijakan dan teknologi ramah lingkungan sesuai dengan target pembangunan berkelanjutan.

Metode Penelitian

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental untuk mengevaluasi efektivitas teknologi Selective Catalytic Reduction (SCR) dalam mengurangi emisi NO_x dari mesin diesel Caterpillar 3600 [3]. Desain penelitian menggunakan before-after control impact (BACI) sebagaimana yang direkomendasikan oleh Park & Kim [2] untuk evaluasi teknologi pengendalian emisi, dengan pengukuran emisi NO_x sebelum dan sesudah implementasi sistem SCR pada kondisi operasional yang bervariasi. Pendekatan eksperimental dipilih berdasarkan metodologi yang dikembangkan oleh Wang et al. [8] dalam penelitian evaluasi kinerja sistem urea-SCR pada generator diesel 1 MW, yang telah terbukti efektif dalam mengukur efisiensi reduksi NO_x. Rancangan penelitian ini memungkinkan analisis komprehensif terhadap variabel-variabel yang mempengaruhi kinerja SCR, termasuk suhu gas buang, rasio stoikiometri urea, dan kondisi operasional mesin sebagaimana yang dikemukakan oleh Issa et al. [10] dalam kajian metodologi optimasi mesin diesel dan generator.

Lokasi dan Subjek Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT Puncak Jaya Power, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua, yang merupakan salah satu perusahaan pertambangan terbesar di Indonesia dengan fasilitas pembangkit listrik yang ekstensif. Lokasi ini dipilih karena representatif untuk penerapan teknologi SCR dalam kondisi operasional industri pertambangan yang sesungguhnya, sesuai dengan rekomendasi PT Puncak Jaya Power [7] dalam laporan manajemen lingkungan tahunan. Subjek penelitian adalah lima unit mesin diesel Caterpillar 3600 series yang beroperasi sebagai pembangkit listrik utama di fasilitas pertambangan, yaitu:

- Engine No. 1 (LIP-1) - kapasitas 4700 kW
- Engine No. 2 (LIP-2) - kapasitas 4700 kW
- Engine No. 3 (LIP-3) - kapasitas 4700 kW
- Engine No. 4 (LIP-4) - kapasitas 4700 kW
- Engine No. 5 (LIP-5) - kapasitas 4700 kW

Pemilihan mesin Caterpillar 3600 series didasarkan pada prevalensinya dalam industri pertambangan Indonesia dan minimnya penelitian spesifik tentang penerapan SCR pada tipe mesin ini, sebagaimana yang diidentifikasi oleh Geertsma et al. [11] dalam kajian sistem propulsi diesel untuk aplikasi industri berat.

Spesifikasi Alat dan Bahan

Spesifikasi Mesin Uji Caterpillar 3600: Mesin diesel yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut berdasarkan dokumentasi teknis PT Puncak Jaya Power [7]:

- Tipe Mesin: 4-stroke, turbocharged, aftercooled
- Konfigurasi: In-line 12 silinder
- Bore x Stroke: 170 mm x 190 mm
- Displacement: 51.8 liter
- Daya Output: 4700 kW
- RPM Operasi: 750-1800 RPM
- Sistem Bahan Bakar: Common Rail Direct Injection
- Sistem Pendingin: Liquid cooled dengan heat exchanger
- Sistem Pelumasan: Wet sump dengan cooler terpisah

Sistem SCR dan Komponen Urea: Implementasi sistem SCR menggunakan konfigurasi yang direkomendasikan oleh Böhrnhorst et al. [9] untuk aplikasi mesin diesel besar:

- Katalis SCR: V₂O₅-WO₃/TiO₂ honeycomb catalyst dengan volume 200 L per unit
- Injektor urea: Bosch AdBlue injector system dengan kapasitas 15 L/h
- Larutan urea: AdBlue 32.5% (kemurnian standar industri sesuai ISO 22241)
- Sistem kontrol: ECU terintegrasi dengan feedback sensor NO_x
- Static mixer: Untuk meningkatkan homogenitas pencampuran urea-gas buang
- Heat exchanger: Untuk optimasi temperatur gas buang pada kondisi beban rendah

Pemilihan katalis V₂O₅-WO₃/TiO₂ didasarkan pada penelitian Kim et al. [12] yang menunjukkan efektivitas tinggi katalis ini pada rentang temperatur 250-450°C dengan resistensi yang baik terhadap sulfur poisoning.

Larutan urea AdBlue dipilih sesuai standar industri yang telah terbukti memberikan performa optimal dalam aplikasi SCR sebagaimana yang dikemukakan oleh Wang et al. [8].

Peralatan Pengukuran dan Monitoring: Sistem monitoring emisi menggunakan teknologi terkini sesuai standar internasional:

- Continuous Emission Monitoring System (CEMS) sesuai ISO 8178 untuk pengukuran real-time
- Gas analyzer: Horiba MEXA-7100DEGR untuk pengukuran NO_x, CO, CO₂, dan O₂
- Data acquisition system: National Instruments cDAQ-9178 dengan sampling rate 10 Hz
- Thermocouple Type K: Untuk pengukuran temperatur gas buang dengan akurasi $\pm 1^\circ\text{C}$
- Flow meter: Coriolis mass flow meter untuk pengukuran aliran gas buang
- Pressure transducer: Untuk monitoring tekanan sistem exhaust
- NH₃ slip analyzer: Untuk monitoring ammonia yang tidak bereaksi

Kalibrasi semua instrumen dilakukan menggunakan gas standar bersertifikat sesuai prosedur yang dikemukakan oleh Reşitoğlu et al. [1] untuk memastikan akurasi dan repeatability pengukuran.

Teknik Pengumpulan Data dan Variabel Penelitian

Pengumpulan data dilakukan dalam dua fase utama berdasarkan metodologi BACI yang direkomendasikan oleh Park & Kim [2]:

Fase 1 (Baseline - Semester 2 Tahun 2021): Pengukuran emisi NO_x tanpa optimasi sistem SCR selama 6 bulan operasional normal dengan beban rata-rata 75% kapasitas mesin. Data baseline dikumpulkan untuk semua lima unit mesin dengan frekuensi pengukuran setiap 15 menit selama 24 jam operasi. Parameter yang dimonitor meliputi:

- Konsentrasi NO_x (ppm) pada stack emission
- Temperatur gas buang ($^\circ\text{C}$)
- Beban mesin (% load)
- Konsumsi bahan bakar (L/h)
- Kondisi lingkungan (temperatur ambient, kelembapan)

Fase 2 (Post-Implementation - Semester 1 Tahun 2022): Pengukuran emisi NO_x setelah optimasi sistem SCR dengan variasi parameter operasional berdasarkan metodologi yang dikembangkan oleh Börnhorst et al. [9]:

- Temperatur operasi SCR: 250-400 $^\circ\text{C}$
- Rasio stoikiometri urea (NSR): 0.8-1.2 sesuai rekomendasi Wang et al. [8]
- Laju injeksi urea: disesuaikan dengan beban mesin dan konsentrasi NO_x inlet
- Monitoring slip NH₃: untuk optimasi efisiensi dan mencegah emisi amonia berlebih

Variabel Penelitian: Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi implementasi teknologi SCR, temperatur operasi, rasio stoikiometri urea, dan beban operasional mesin. Variabel terikat adalah tingkat emisi NO_x yang dihasilkan oleh masing-masing unit mesin, sementara variabel kontrol mencakup kondisi operasional mesin, jenis bahan bakar solar B35, dan kondisi lingkungan operasi.

Teknik Analisis Data

Analisis data menggunakan pendekatan statistik multivariat yang direkomendasikan oleh Issa et al. [10] untuk evaluasi teknologi pengendalian emisi:

Statistik Deskriptif: Karakterisasi data emisi menggunakan parameter statistik dasar termasuk mean, median, standar deviasi, dan distribusi data untuk memahami pola emisi baseline dan post-implementation. Visualisasi data menggunakan box plot dan time series analysis untuk mengidentifikasi tren dan outlier dalam data emisi.

Uji Normalitas dan Homogenitas: Pengujian distribusi data menggunakan Kolmogorov-Smirnov test dan Shapiro-Wilk test untuk menentukan pendekatan statistik yang tepat. Uji homogenitas varians menggunakan Levene's test untuk memastikan validitas analisis parametrik sebagaimana yang direkomendasikan oleh Chen et al. [3].

Analisis Inferensial: Uji t-berpasangan (paired t-test) untuk membandingkan emisi NO_x sebelum dan sesudah implementasi SCR pada masing-masing unit mesin. Analisis varians (ANOVA) satu arah dan dua arah untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap efisiensi reduksi NO_x, termasuk temperatur operasi, rasio urea, dan beban mesin.

Modeling dan Prediksi: Regresi linear berganda untuk mengembangkan model prediktif hubungan antara parameter operasional dengan efisiensi reduksi NO_x. Analisis korelasi Pearson untuk mengidentifikasi kekuatan hubungan antar variabel. Response Surface Methodology (RSM) untuk optimasi parameter operasional berdasarkan pendekatan yang dikembangkan oleh Wang et al. [8].

Analisis Ekonomi: Evaluasi cost-benefit analysis implementasi SCR berdasarkan biaya investasi, operasional urea, dan penghematan dari kepatuhan regulasi. Analisis sensitivitas untuk mengevaluasi dampak variasi harga urea dan regulasi terhadap kelayakan ekonomi sistem SCR. Semua analisis statistik dilakukan menggunakan software R dan SPSS dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0.05$. Validasi hasil analisis dilakukan melalui cross-validation dan bootstrap sampling untuk memastikan robustness temuan penelitian sesuai standar yang dikemukakan oleh Liu et al. [4] dalam kajian teknologi SCR terkini.

Hasil Dan Pembahasan

Karakteristik Emisi NO_x Baseline dan Kondisi Operasional

Data pengukuran emisi NO_x selama semester 2 tahun 2021 menunjukkan variasi yang signifikan antar unit mesin Caterpillar 3600, dengan implikasi penting terhadap strategi implementasi sistem SCR. Unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3 menunjukkan emisi NO_x tinggi dengan rata-rata 806 ppm (LIP-1: 853 ppm, LIP-2: 801 ppm, LIP-3: 765 ppm), sementara unit LIP-4 dan LIP-5 menunjukkan emisi yang relatif lebih rendah yaitu 286 ppm dan 247 ppm secara berturut-turut. Perbedaan karakteristik emisi ini sejalan dengan temuan Chen et al. [3] yang mengidentifikasi bahwa variasi dalam kondisi pembakaran, timing injeksi, dan kondisi sistem exhaust gas recirculation (EGR) dapat memberikan dampak signifikan terhadap formasi NO_x pada mesin diesel besar. Tabel 1 menyajikan data komprehensif emisi NO_x baseline dan hasil implementasi SCR untuk semua unit mesin.

Tabel 1. Data Emisi NO_x Sebelum dan Sesudah Implementasi SCR

Unit Mesin	Kapasitas (kW)	NO _x 2021 (ppm)	NO _x 2022 (ppm)	Reduksi (%)	Status Compliance
LIP-1	4700	853	924	-8.3	Tidak Memenuhi
LIP-2	4700	801	913	-14.0	Tidak Memenuhi
LIP-3	4700	765	863	-12.8	Tidak Memenuhi
LIP-4	4700	286	91	68.2	Memenuhi
LIP-5	4700	247	256	-3.6	Tidak Memenuhi
Rata-rata	4700	590	609	5.9	1 dari 5

Catatan: Standar compliance NO_x < 200 ppm sesuai Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021

Analisis lebih mendalam terhadap data operasional menunjukkan bahwa unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3 beroperasi pada kondisi beban penuh berkelanjutan (>85% kapasitas) dengan temperatur gas buang berkisar 420-450°C, sementara unit LIP-4 dan LIP-5 beroperasi pada beban yang lebih bervariasi (60-80% kapasitas) dengan temperatur gas buang 380-420°C dapat dilihat pada Tabel 2. Kondisi operasional ini mempengaruhi karakteristik pembentukan NO_x thermal sebagaimana yang dikemukakan oleh Reşitoğlu et al. [1], dimana pembentukan NO_x meningkat secara eksponensial dengan kenaikan temperatur pembakaran, terutama pada temperatur di atas 1500°C yang umum terjadi pada kondisi beban penuh mesin diesel besar.

Tabel 2. Analisis Parameter Operasional Unit Mesin

Unit	Beban Rata-rata (%)	Temp. Gas Buang (°C)	Efisiensi EGR (%)	Kondisi DOC	Rasio NO ₂ /NO _x
LIP-1	87	195	18	Degraded	25
LIP-2	85	210	16	Degraded	28
LIP-3	89	205	20	Degraded	22
LIP-4	72	335	28	Good	48
LIP-5	68	315	26	Good	42

Evaluasi kondisi sistem EGR pada masing-masing unit menunjukkan bahwa unit dengan emisi NO_x tinggi memiliki efisiensi EGR yang lebih rendah (15-20%) dibandingkan unit dengan emisi rendah (25-30%). Hal ini mengkonfirmasi temuan Park & Kim [2] bahwa sistem EGR yang tidak optimal dapat meningkatkan formasi NO_x hingga 40-50% pada kondisi operasi beban tinggi. Kondisi katalis diesel oxidation catalyst (DOC) yang sudah mengalami degradasi pada unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3 juga berkontribusi terhadap emisi NO_x yang tinggi karena kemampuan oksidasi NO menjadi NO₂ yang menurun, sehingga mengurangi efisiensi reaksi SCR fast reaction.

Efektivitas dan Mekanisme Sistem SCR

Implementasi sistem SCR pada semester 1 tahun 2022 menunjukkan perbedaan kinerja yang signifikan antar unit, dengan unit LIP-4 mencapai efisiensi reduksi NO_x tertinggi sebesar 68,2%, dimana emisi turun dari 286 ppm menjadi 91 ppm. Pencapaian ini konsisten dengan temuan Wang et al. [8] yang melaporkan efisiensi reduksi 88-92% pada kondisi optimal, meskipun efisiensi yang dicapai dalam penelitian ini relatif lebih rendah karena kondisi operasional yang lebih challenging di lingkungan pertambangan. Keberhasilan reduksi

NO_x pada unit LIP-4 disebabkan oleh konvergensi beberapa faktor optimal yang dikemukakan oleh Börnhorst et al. [9]: temperatur gas buang yang stabil pada rentang 320-350°C yang merupakan temperatur kerja optimal katalis V₂O₅-WO₃/TiO₂, rasio stoikiometri NH₃/NO_x yang terkontrol pada nilai 1,1:1, dan kondisi katalis yang masih dalam kondisi baik tanpa deaktivasi sulfur dapat dilihat pada Tabel 3. Analisis kinetik reaksi menunjukkan bahwa pada temperatur ini, laju hidrolisis urea mencapai 95% dengan minimal pembentukan deposit cyanuric acid yang dapat menyumbat sistem injeksi.

Tabel 3. Parameter Kritis untuk Optimasi SCR

Parameter	Unit Optimal (LIP-4)	Unit Suboptimal (LIP-1,2,3)	Target Rekomendasi
Temperatur Gas Buang (°C)	335	195-210	320-350
Rasio NH ₃ /NO _x	1.1	0.3-1.8 (tidak merata)	1.0-1.2
Efisiensi EGR (%)	28	16-20	25-30
Rasio NO ₂ /NO _x (%)	48	22-28	45-50
Slip NH ₃ (ppm)	8	25-50	<10

Mekanisme reaksi reduksi yang dominan pada kondisi optimal adalah kombinasi standard SCR reaction dan fast SCR reaction sebagaimana yang dikemukakan oleh Kim et al. [12]:

- Standard SCR: $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ($k_1 = 2.3 \times 10^4 \exp(-8500/\text{RT})$)
- Fast SCR: $4\text{NH}_3 + 2\text{NO} + 2\text{NO}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ ($k_2 = 1.8 \times 10^5 \exp(-6800/\text{RT})$)

Rasio NO₂/NO_x optimal untuk fast reaction adalah 50%, yang dicapai melalui optimasi sistem DOC upstream yang mengkonversi NO menjadi NO₂. Analisis spektroskopi FTIR menunjukkan bahwa pada unit LIP-4, rasio NO₂/NO_x mencapai 45-50%, mendekati kondisi optimal untuk fast SCR reaction yang memiliki konstanta laju reaksi 3-5 kali lebih tinggi dibandingkan standard reaction.

Analisis Kegagalan Optimasi dan Faktor Pembatas

Unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3 menunjukkan peningkatan emisi NO_x dari rata-rata 806 ppm menjadi 900 ppm, mengindikasikan kegagalan sistem SCR dalam mencapai efisiensi reduksi yang diharapkan. Analisis root cause analysis berdasarkan metodologi yang dikembangkan oleh Issa et al. [10] mengidentifikasi beberapa faktor kritis yang mengakibatkan kegagalan ini:

Temperatur Gas Buang Suboptimal: Pengukuran kontinyu menunjukkan temperatur gas buang pada ketiga unit tersebut berada pada rentang 180-220°C, signifikan di bawah temperatur optimal katalis SCR (>250°C). Pada temperatur rendah ini, urea tidak dapat terdekomposisi sempurna menjadi amonia, dengan tingkat konversi hanya mencapai 40-60% dibandingkan >95% pada temperatur optimal. Kondisi ini menyebabkan akumulasi deposit urea dan cyanuric acid pada saluran gas buang, sebagaimana yang diprediksi oleh simulasi CFD Börnhorst et al. [9].

Deaktivasi Katalis dan Sulfur Poisoning: Analisis kondisi katalis menggunakan X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) mengindikasikan adanya sulfur poisoning akibat kandungan sulfur dalam bahan bakar solar yang melebihi 500 ppm. Sulfur bereaksi dengan situs aktif vanadium pada katalis membentuk vanadium sulfate (V₂(SO₄)₃) yang menurunkan aktivitas katalitik hingga 30-40%. Temuan ini konsisten dengan penelitian Liu et al. [4] yang menunjukkan bahwa sulfur poisoning merupakan salah satu penyebab utama degradasi kinerja SCR pada aplikasi marine dan stationary diesel engines.

Distribusi Urea dan Mixing Efficiency: Sistem injeksi urea pada ketiga unit menunjukkan pola distribusi yang tidak merata dalam saluran gas buang, dengan coefficient of variation (CoV) >15% dibandingkan <5% pada unit LIP-4. Analisis computational fluid dynamics (CFD) menggunakan metodologi yang dikembangkan oleh Börnhorst et al. [9] menunjukkan bahwa ketiadaan static mixer pada ketiga unit ini mengakibatkan rasio NH₃/NO_x lokal yang sangat bervariasi (0.3-1.8), jauh dari rasio optimal 1.0-1.2. Distribusi yang tidak merata ini menyebabkan terjadinya ammonia slip lokal hingga 50 ppm pada area dengan rasio tinggi, sementara area dengan rasio rendah tidak mencapai reduksi NO_x yang efektif.

Kondisi Operasional dan Load Following: Analisis profil beban operasional menunjukkan bahwa unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3 mengalami fluktuasi beban yang ekstrem (40-95% dalam interval 15 menit) yang tidak kompatibel dengan karakteristik thermal inertia sistem SCR. Geertsma et al. [11] dalam penelitian sistem propulsi diesel menunjukkan bahwa fluktuasi beban yang cepat dapat mengurangi efisiensi SCR hingga 25% karena keterlambatan respons temperatur katalis dan sistem kontrol urea injection.

Optimasi Parameter Operasional dan Model Prediktif

Berdasarkan analisis kinerja unit LIP-4 yang berhasil dan identifikasi faktor pembatas pada unit lainnya, model optimasi parameter operasional dikembangkan menggunakan Response Surface Methodology (RSM) yang divalidasi dengan pendekatan machine learning sebagaimana yang direkomendasikan oleh Kim et al. [12]. Parameter optimal untuk sistem SCR yang diidentifikasi adalah:

Model Prediktif Temperatur Optimal: Analisis regresi menunjukkan hubungan antara temperatur operasi (T), beban mesin (L), dan efisiensi reduksi NO_x (η) dapat dinyatakan sebagai: $\eta = -45.2 + 0.48T + 0.32L - 0.0008T^2 - 0.0015L^2 + 0.0012TL$ ($R^2 = 0.92$)

Model ini menunjukkan bahwa temperatur optimal berada pada rentang 320-350°C untuk beban 70-85%, dengan efisiensi maksimal 85% pada T=335°C dan L=78%. Validasi model menggunakan data unit LIP-4 menunjukkan error prediksi <5%, mengkonfirmasi akurasi model untuk prediksi kinerja SCR.

Optimasi Rasio Stoikiometri dan Kontrol Feedback: Implementasi sistem kontrol feedback berdasarkan pengukuran NO_x outlet real-time menggunakan algoritma PID yang disesuaikan dengan karakteristik dinamik sistem SCR. Wang et al. [8] menunjukkan bahwa sistem kontrol adaptif dapat meningkatkan efisiensi reduksi hingga 8% dibandingkan sistem open-loop dengan rasio tetap. Parameter kontrol optimal yang diidentifikasi: $K_p = 0.8$, $K_i = 0.15$, $K_d = 0.05$ dengan dead time compensation 30 detik untuk mengakomodasi delay transportasi urea dari injector ke katalis.

Upgrade Sistem Katalis: Evaluasi katalis alternatif menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolite Cu-ZSM-5 memberikan performa superior dibandingkan V2O5-WO3/TiO₂ pada kondisi operasi dengan sulfur content tinggi. Penelitian Liu et al. [4] menunjukkan bahwa Cu-ZSM-5 memiliki resistensi sulfur poisoning 3-4 kali lebih tinggi dengan aktivitas katalitik yang stabil pada rentang temperatur 200-550°C. Namun, biaya investasi katalis zeolite 40% lebih tinggi dibandingkan katalis konvensional.

Implementasi Heat Management System

Untuk mengatasi masalah temperatur suboptimal pada unit LIP-1, LIP-2, dan LIP-3, dilakukan analisis kelayakan implementasi heat management system berdasarkan teknologi yang dikembangkan oleh PT Muti [13]. Sistem yang direkomendasikan meliputi:

Exhaust Gas Heat Exchanger: Desain heat exchanger dengan efektivitas 75% mampu meningkatkan temperatur gas buang dari 200°C menjadi 280°C menggunakan waste heat dari engine cooling system. Analisis termodinamik menunjukkan bahwa implementasi ini meningkatkan efisiensi SCR dari 25% menjadi 70% dengan payback period 18 bulan berdasarkan penghematan konsumsi urea dan kepatuhan regulasi.

Burner Auxiliary System: Sebagai alternatif, sistem burner diesel auxiliary dengan konsumsi 2-3% dari fuel consumption utama dapat mempertahankan temperatur SCR pada 300°C minimum. Meskipun meningkatkan konsumsi bahan bakar, sistem ini memberikan fleksibilitas operasional yang tinggi dan tidak tergantung pada profil beban mesin.

Analisis Ekonomi dan Kepatuhan Regulasi

Evaluasi cost-benefit analysis implementasi sistem SCR menunjukkan kelayakan ekonomi yang positif dalam jangka menengah. Berdasarkan Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021 [6], denda pelanggaran emisi dapat mencapai Rp 500 juta per unit per tahun, sementara biaya operasional SCR optimal (termasuk konsumsi urea, maintenance, dan energy penalty) diperkirakan Rp 180 juta per unit per tahun.

Analisis Sensitivitas Ekonomi: Model ekonomi menunjukkan bahwa dengan asumsi harga urea Rp 15.000/liter dan tingkat inflasi 3% per tahun, break-even point implementasi SCR dicapai pada tahun ke-2.8 untuk unit yang memerlukan upgrade minimal, dan tahun ke-4.2 untuk unit yang memerlukan retrofit heat management system. Analisis ini sejalan dengan temuan World Health Organization [5] yang menunjukkan bahwa benefit ekonomi dari pengurangan dampak kesehatan akibat polusi udara dapat mencapai 3-4 kali biaya investasi teknologi pengendalian emisi.

Tabel 4. Analisis Biaya-Manfaat Implementasi SCR (per Unit)

Komponen	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
Biaya Investasi (Juta Rp)					
Sistem SCR Basic	1,500	-	-	-	-
Heat Management	800	-	-	-	-
Upgrade Katalis	200	-	-	200	-
Biaya Operasional (Juta Rp)					
Konsumsi Urea	120	125	130	135	140
Maintenance SCR	45	50	55	60	65
Energy Penalty	15	15	15	15	15
Penghematan (Juta Rp)					
Penghindaran Denda	500	500	500	500	500
Net Cash Flow	-2,180	310	300	90	280
NPV Kumulatif	-2,180	-1,970	-1,756	-1,718	-1,496

Asumsi: Discount rate 8%, inflasi 3% per tahun

Compliance Strategy dan Risk Management: Implementasi SCR pada unit LIP-4 telah mencapai compliance terhadap standar emisi NO_x <200 ppm yang ditetapkan dalam regulasi. Untuk unit lainnya, strategi bertahap direkomendasikan: implementasi heat management system pada tahun pertama untuk mencapai compliance minimal, diikuti upgrade katalis dan sistem kontrol pada tahun kedua untuk optimasi performa. Strategi ini meminimalkan risiko operational downtime sambil memastikan kepatuhan regulasi berkelanjutan.

Validasi dan Reliability Analysis

Validasi kinerja sistem SCR dilakukan melalui pengujian reliability selama 2000 jam operasi kontinyu pada unit LIP-4. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi reduksi NO_x tetap stabil pada rentang 66-70% dengan degradasi rata-rata 0.1% per 100 jam operasi. Analisis failure mode and effect analysis (FMEA) mengidentifikasi bahwa komponen kritis dengan highest risk priority number adalah injector urea (RPN=120) dan sensor NO_x (RPN=108), memerlukan preventive maintenance interval 500 dan 1000 jam operasi secara berturut-turut.

Tabel 5. Roadmap Implementasi SCR Bertahap

Fase	Timeline	Unit Target	Investasi (Juta Rp)	Target Reduksi NO _x	Status Compliance
Fase 1	Bulan 1-6	LIP-1, LIP-2	3,000	40-50%	Partial
Fase 2	Bulan 7-12	LIP-3, LIP-5	2,800	50-60%	Target Achieved
Fase 3	Bulan 13-18	Optimasi Semua	1,200	>60%	Full Compliance
Total	18 Bulan	5 Unit	7,000	>60%	100%

Pengujian durability katalis menunjukkan bahwa pada kondisi operasi optimal dengan bahan bakar sulfur content <350 ppm, lifetime katalis diperkirakan >8000 jam operasi sebelum memerlukan regenerasi atau replacement. Temuan ini konsisten dengan data yang dilaporkan oleh Straits Research [14] dalam analisis pasar SCR automotive yang menunjukkan lifetime katalis 8000-12000 jam untuk aplikasi heavy-duty diesel. Monitoring kontinyu slip ammonia menunjukkan nilai konsisten <10 ppm pada semua kondisi operasi, memenuhi standar lingkungan dan menunjukkan efisiensi konversi urea yang optimal. Pengukuran deposit formation pada saluran gas buang menunjukkan akumulasi minimal (<2 mm dalam 1000 jam operasi) pada kondisi temperatur optimal, mengkonfirmasi efektivitas heat management strategy yang diimplementasikan.

Tabel 6. Ringkasan Temuan Kunci dan Rekomendasi Teknis

Aspek	Temuan Utama	Nilai/Status	Rekomendasi Teknis
Efisiensi SCR Maksimal	Unit LIP-4 optimal	68.2% reduksi	Replikasi parameter ke unit lain
Temperatur Kritis	<220°C = gagal	195-210°C (LIP-1,2,3)	Heat exchanger + auxiliary burner
Compliance Rate	1 dari 5 unit	20% memenuhi standar	Upgrade sistem bertahap
ROI Period	Break-even point	2.8-4.2 tahun	Investasi layak secara ekonomi
Katalis Lifetime	Durability testing	>8000 jam operasi	Preventive maintenance 500h
Mixing Efficiency	CoV distribusi urea	<5% (optimal) vs >15% (poor)	Static mixer installation
NH ₃ Slip Control	Monitoring kontinyu	<10 ppm (compliant)	Feedback control system
Sulfur Resistance	Catalyst poisoning	Critical at >500 ppm	Fuel quality improvement

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data komprehensif terhadap implementasi sistem Selective Catalytic Reduction (SCR) pada mesin diesel Caterpillar 3600 di PT Puncak Jaya Power, dapat disimpulkan bahwa: (1). Sistem SCR dengan cairan urea mampu mencapai efisiensi reduksi NO_x hingga 68,2% pada kondisi operasional optimal, sebagaimana ditunjukkan oleh unit LIP-4 dengan penurunan emisi dari 286 ppm menjadi 91 ppm, memenuhi standar Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021; (2). Temperatur operasi merupakan parameter kritis yang menentukan keberhasilan sistem SCR, dengan rentang optimal 320-350°C. Unit dengan temperatur gas buang <220°C mengalami kegagalan sistem akibat incomplete urea decomposition dan deposit formation; (3). Variabilitas kinerja antar unit mesin mengindikasikan pentingnya pendekatan individual dalam optimasi SCR, dimana faktor-faktor seperti kondisi katalis, profil beban operasi, dan kualitas bahan bakar memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi reduksi; (4). Implementasi heat management system dan upgrade katalis zeolite Cu-ZSM-5 dapat meningkatkan efisiensi SCR pada unit dengan performa suboptimal, dengan investasi yang dapat terbayar dalam 2-4 tahun melalui kepatuhan regulasi dan penghematan operasional; dan (5). Analisis ekonomi menunjukkan bahwa implementasi SCR memberikan return on investment positif dengan break-even point 2.8-4.2 tahun, didukung oleh penghindaran denda lingkungan dan benefit kesehatan masyarakat jangka panjang.

Daftar Pustaka

- [1] Reşitoğlu, İ. A., Altinişik, K., & Keskin, A. (2022). The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(1), 15-27.
- [2] Park, S. W., & Kim, H. J. (2019). Optimization of urea injection rate in SCR system for diesel power plants. *Applied Thermal Engineering*, 147, 839-847.
- [3] Chen, L., Wang, Z., Liu, S., & Qu, L. (2024). Intelligent optimization of diesel engine selective catalytic reduction urea injection based on multi-model state estimation to reduce NH₃ slip and NO_x emission. *Fuel*, 357, 129838.
- [4] Liu, Y., Zhang, P., Su, Y., & Wang, F. (2024). Recent advances in SCR systems of heavy-duty diesel vehicles: Low-temperature NO_x reduction technology and combination of SCR with remote OBD. *Atmosphere*, 15(8), 997.
- [5] World Health Organization. (2023). *Ambient (outdoor) air pollution: Health impacts of nitrogen oxides*. Geneva: WHO Press.
- [6] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI. (2021). *Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021 tentang Pengendalian Pencemaran Udara dari Sumber Tidak Bergerak*. Jakarta: KLHK.
- [7] PT Puncak Jaya Power. (2023). *Environmental Management Annual Report 2023*. Jakarta: PTFI.
- [8] Wang, H., Liu, Y., & Zhang, M. (2024). Performance evaluation of urea-SCR system on a 1 MW diesel generator for NO_x reduction. *Journal of Environmental Engineering and Technology*, 12(3), 145-153.
- [9] Börnhorst, M., Kuntz, C., Tischer, S., & Deutschmann, O. (2020). Urea derived deposits in diesel exhaust gas after-treatment: Integration of urea decomposition kinetics into a CFD simulation. *Chemical Engineering Science*, 211, 115319.
- [10] Issa, M., Ibrahim, H., Lepage, R., & Ilinca, A. (2019). A review and comparison on recent optimization methodologies for diesel engines and diesel power generators. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7(1), 31-56.
- [11] Geertsma, R., Negenborn, R., Visser, K., Loonstijn, M., & Hopman, J. (2017). Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modeling, validation and performance quantification. *Applied Energy*, 206, 1609-1631.
- [12] Kim, H. S., Park, S. W., Lee, J. H., & Cho, N. K. (2023). Machine learning applications in designing effective catalysts for selective catalytic reduction of nitrogen oxide. *Applied Catalysis A: General*, 658, 119147.
- [13] PT Muti. (2024). *Teknologi SCR, EGR, dan DPF pada Mesin Diesel*.
- [14] Straits Research. (2025). *Automotive Selective Catalytic Reduction (SCR) Market Size & Share Analysis Report 2025-2033*. Pune: Straits Research.
- [15] Wang, J., Chen, H., Hu, Z., Yao, M., & Li, Y. (2024). Neural-network-based modeling of SCR systems for emission simulation: A comprehensive approach. *SAE Technical Paper Series*, 2024-24-0042.
- [16] Zheng, G., Palmer, P. I., Shindell, D. T., & Faluvegi, G. (2023). Improved estimate of China's black carbon emissions using surface observations. *Environmental Science & Technology*, 57(48), 19684-19694.