JURNAL LOCUS: Penelitian & Pengabdian
Volume 5 No. 11 November 2026, pp 9860-9872
E-ISSN 2829-7334
DOI: 10.58344/locus.v5i11.6347

Evaluasi Performa Instrumen CEMS Melalui Cylinder Gas Audit pada Sistem Pemantauan Emisi Kontinu di PLTU Batubara

Jesica Astriani*, Rukmini, Radjali Amin, Agus Suyanto, Indah Riadi Putri
Institut Teknologi Yogyakarta, Indonesia
Email: jesicaastriani@gmail.com*, rukminiwirianto@gmail.com, r.amin@ity.ac.id, agus.suyanto@ity.ac.id, indahriadiputri@ity.ac.id

Keywords:
CEMS; Cylinder Gas Audit; accuracy; emission monitoring; coal-fired power plant

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

Copyright © 2026 by Author. Published by Riviera Publishing

Abstract

Continuous Emission Monitoring System (CEMS) instruments are mandatory for coal-fired power plants, yet field performance can drift and vary between units, threatening the validity of emission data. This study evaluates the accuracy, linearity and zero-drift performance of extractive CEMS through the Cylinder Gas Audit (CGA) method at three coal-fired power plant units in Indonesia (two in Gunung Mas, Central Kalimantan, and one in Obi Island, North Maluku), following Kepmen LH/BPLH No. 1638/2026 and US EPA 40 CFR 60. NIST-traceable certified reference gases were delivered at zero, low, medium and high span points with three replications for SO_2, NO, O_2 and CO, and data were analysed using a single-factor Completely Randomised Design with one-way ANOVA ($\alpha = 0.05$). All parameters at every unit satisfied the acceptance criteria of accuracy deviation below 15%, response time under 240 seconds, zero drift of 0.00%, and linearity R^2 above 0.995. Nevertheless, ANOVA revealed statistically significant performance differences among units for all parameters, with the O_2 sensor of Unit 2 approaching the tolerance limit (14.71%). The findings confirm that the audited CEMS are compliant but not identical in performance, supporting the need for parameter-specific preventive maintenance and periodic internal drift checks to strengthen the reliability of emission data reported to the national SISPEK system.

Kata Kunci:
CEMS; Cylinder Gas Audit; akurasi; pemantauan emisi; PLTU batubara

Abstrak

Instrumen Continuous Emission Monitoring System (CEMS) diwajibkan bagi PLTU batubara, namun performanya di lapangan dapat mengalami penyimpangan dan bervariasi antarunit sehingga mengancam validitas data emisi. Penelitian ini mengevaluasi akurasi, linearitas, dan zero drift CEMS tipe ekstraktif melalui metode Cylinder Gas Audit (CGA) pada tiga unit PLTU batubara di Indonesia (dua unit di Gunung Mas, Kalimantan Tengah, dan satu unit di Pulau Obi, Maluku Utara), mengacu pada Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026 dan US EPA 40 CFR 60. Gas standar bersertifikat tertelusur NIST dialirkan pada titik nol, rendah, sedang, dan tinggi dengan tiga kali pengulangan untuk parameter SO_2, NO, O_2, dan CO, lalu dianalisis menggunakan Rancangan Acak Lengkap faktor tunggal dengan ANOVA satu arah ($\alpha = 0{,}05$). Seluruh parameter pada ketiga unit memenuhi kriteria keberterimaan, yaitu deviasi akurasi di bawah 15%, waktu tanggap kurang dari 240 detik, zero drift 0,00%, serta linearitas R^2 di atas 0,995. Meskipun demikian, ANOVA menunjukkan perbedaan performa yang signifikan antarunit pada seluruh parameter, dengan sensor O_2 Unit 2 mendekati ambang toleransi (14,71%). Temuan ini menegaskan bahwa CEMS yang diaudit patuh terhadap regulasi tetapi tidak identik performanya, sehingga diperlukan pemeliharaan preventif

spesifik dan pemeriksaan drift internal berkala untuk memperkuat keandalan data emisi yang dilaporkan ke sistem SISPEK nasional.

PENDAHULUAN

Pengendalian pencemaran udara dari kegiatan industri merupakan salah satu fokus utama pelestarian lingkungan hidup, sebagaimana diamanatkan dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup serta Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 (Pemerintah Republik Indonesia, 2009, 2021). Untuk memastikan emisi yang dilepaskan ke atmosfer tetap berada dalam batas yang ditetapkan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK], 2019), diperlukan sistem pemantauan emisi yang akurat dan berkelanjutan. Bagi industri dengan beban emisi tinggi seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batubara, sistem yang diwajibkan adalah Continuous Emission Monitoring System (CEMS). Sektor PLTU batubara merupakan salah satu kontributor utama emisi gas buang di Indonesia; konsumsi batubara domestik untuk PLTU meningkat pesat hingga mencapai sekitar 76% dari total konsumsi nasional (Kramawijaya, 2018; Triani et al., 2024).

Secara teknis, CEMS didefinisikan sebagai seperangkat alat untuk menentukan konsentrasi gas, partikulat, atau laju emisi menggunakan analyzer dan program konversi guna memberikan hasil dalam satuan baku mutu emisi yang berlaku (Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup [KLH/BPLH], 2026). Berdasarkan mekanismenya, terdapat dua jenis utama CEMS, yaitu tipe ekstraktif yang mengambil sampel gas dari aliran emisi untuk dianalisis di luar cerobong, dan tipe in-situ yang mengukur polutan langsung di dalam aliran gas. Meskipun sistem dirancang bekerja otomatis, akurasi dan keandalan data yang dihasilkan di lapangan sangat dipengaruhi oleh stabilitas komponen yang rentan mengalami degradasi akibat paparan gas buang secara terus-menerus (D'Elia et al., 2024; Fajar et al., 2026).

Sistem CEMS terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu sampling probe, gas analyzer, data logger, serta sistem kalibrasi internal (Lestari, 2026; Rizkya & Nugroho, 2025). Empat parameter yang dipantau dalam penelitian ini memiliki makna spesifik: SO_2 bersumber dari kandungan sulfur dalam batubara dan menjadi indikator utama pencemaran udara termal; NO terbentuk pada suhu pembakaran tinggi; CO merefleksikan efisiensi pembakaran (indikator pembakaran tidak sempurna); dan O_2 berperan sebagai parameter acuan yang digunakan untuk koreksi oksigen (dilution correction) terhadap perhitungan konsentrasi gas pencemar lainnya. Proses pembakaran batubara di PLTU umumnya dilengkapi peranti pengendali emisi seperti Electrostatic Precipitator (ESP) untuk menangkap partikulat (Raafi, 2022; Rofandi & Irwanto, 2022), sementara karakteristik batubara turut memengaruhi profil emisi gas buang (Bakri, 2017; Mukharomah et al., 2025; Sarwono et al., 2021).

Berdasarkan teknik pengambilan sampel, CEMS terbagi menjadi tipe ekstraktif (source-level kering/basah dan dilution in-stack/out-of-stack) serta tipe in-situ (point dan path). Penempatan probe mengikuti kaidah lokasi sampling, yaitu pada bidang yang bebas gangguan aliran, umumnya dua kali diameter dari gangguan aliran atas (upstream) dan delapan kali diameter dari gangguan aliran bawah (downstream), agar sampel gas representatif. Evaluasi performa CEMS mencakup empat parameter kunci, yaitu akurasi, linearitas, zero drift, dan waktu tanggap (response time) (United States Environmental Protection Agency [US EPA],

n.d.-a). Keaslian penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan statistik Rancangan Acak Lengkap dan ANOVA untuk membandingkan performa antarunit secara kuantitatif di bawah regulasi terbaru Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026 — pendekatan komparatif yang belum banyak diterapkan pada studi audit CEMS di Indonesia yang umumnya bersifat deskriptif pada satu fasilitas (Lestari dkk., 2025).

Untuk menjamin mutu data yang dilaporkan kepada instansi lingkungan hidup, dibutuhkan prosedur Jaminan Mutu dan Pengendalian Mutu (Quality Assurance/Quality Control). Salah satu kewajiban dalam prosedur tersebut adalah pelaksanaan Cylinder Gas Audit (CGA), yaitu pengujian validitas instrumen menggunakan gas standar bersertifikat (Certified Reference Material) untuk mengevaluasi tingkat penyimpangan alat terhadap nilai konsentrasi acuan yang telah diketahui secara pasti (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2017; International Organization for Standardization [ISO], 2016). Kewajiban ini diperkuat oleh Permen LHK No. 13 Tahun 2021 tentang Sistem Informasi Pemantauan Emisi Industri Secara Terus Menerus (SISPEK) yang mengintegrasikan data emisi sumber tidak bergerak secara real-time ke Kementerian Lingkungan Hidup (KLHK, 2021).

Meskipun CEMS telah diimplementasikan secara luas, fakta di lapangan menunjukkan masih terdapat variasi dan perbedaan performa yang signifikan antara satu unit sistem pemantauan dengan lainnya. Tingginya deviasi hasil pengukuran, ketidaksesuaian data aktual dengan nilai acuan regulasi, serta fluktuasi efektivitas pemeliharaan rutin berpotensi menurunkan keandalan data emisi yang direkam secara kolektif. Studi terdahulu mengenai integrasi CEMS ke SISPEK (Lestari dkk., 2025) menekankan pentingnya penjaminan mutu data, sementara standar internasional US EPA 40 CFR 60 Appendix F (US EPA, n.d.-b) menetapkan bahwa deviasi melebihi ambang batas terhadap gas standar bersertifikat menjadi indikator kuat perlunya perbaikan atau kalibrasi ulang instrumen. Standar Eropa EN 14181 dan EN 15267-3 (European Committee for Standardization [CEN], 2007, 2014) melengkapi aspek teknis berupa pemeriksaan fisik, uji linearitas, dan uji kebocoran sistem.

Berdasarkan celah permasalahan tersebut, penelitian ini penting dilakukan untuk mengevaluasi performa instrumen CEMS melalui metode CGA pada tiga unit PLTU batubara agar konsistensi validitas alat ukur dapat dipastikan patuh terhadap standar teknis dan regulasi terbaru. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui implementasi pelaksanaan CGA sesuai Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026; (2) menganalisis akurasi pembacaan instrumen terhadap nilai gas standar CRM; (3) mengidentifikasi deviasi pengukuran dan faktor yang memengaruhinya; serta (4) memberikan masukan berbasis data empiris mengenai konsistensi performa CEMS sebagai dasar pengawasan kualitas udara nasional. Manfaat teoretis penelitian ini adalah memperkaya literatur tentang evaluasi performa CEMS dengan pendekatan statistik komparatif, sedangkan manfaat praktisnya adalah memberikan rekomendasi bagi pengelola PLTU dan regulator dalam merancang program pemeliharaan preventif dan pengawasan mutu data emisi yang lebih efektif.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada fasilitas industri PLTU berbahan bakar batubara selama tiga bulan (April–Agustus 2026). Pemilihan lokasi dilakukan secara sengaja (purposive sampling) pada dua wilayah operasional untuk mengevaluasi variasi performa instrumen

CEMS pada kondisi geografis dan operasional yang beragam. Secara keseluruhan dianalisis tiga unit PLTU, yaitu dua unit di Kecamatan Gunung Mas, Kalimantan Tengah, dan satu unit di Kecamatan Pulau Obi, Maluku Utara. Spesifikasi cerobong ketiga unit disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Lokasi Sumber Emisi Tidak Bergerak dan Spesifikasi Cerobong PLTU

No.	Stack	Lokasi	Diameter Dalam Cerobong (m)	Tinggi Cerobong (m)
1	Unit 1	Gunung Mas, Kalimantan Tengah	2,80	150
2	Unit 2	Gunung Mas, Kalimantan Tengah	2,80	150
3	Unit 3	Pulau Obi, Maluku Utara	8,72	150

Objek penelitian adalah unit CEMS tipe ekstraktif, di mana sampel gas buang ditarik dari cerobong melalui sampling probe dan disalurkan ke sistem pengkondisian sampel (sampling conditioning system) sebelum dianalisis oleh gas analyzer di dalam shelter berkondisi khusus. Parameter yang diaudit meliputi Oksigen (O_2), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen Oksida (NO), dan Sulfur Dioksida (SO_2). Cylinder Gas Audit (CGA) menggunakan gas standar Certified Reference Material (CRM) yang tertelusur ke National Institute of Standards and Technology (NIST); konsentrasi pada tiap gas standar ditetapkan sebagai Nilai Benar (true value). Ringkasan gas standar dan titik audit disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Gas Standar CRM dan Titik Audit Cylinder Gas Audit (representatif Unit 3, Pulau Obi)

Parameter	Titik	Konsentrasi (mg/m³ atau %)	Cylinder Number	Toleransi Akurasi	Produsen
O_2	Zero	0,00 %	246012130	0,0005%	Air Liquide
	Low	5,09 %	R25207083	2%	SII
	Medium	10,02 %	226011184	1%	Air Liquide
	High	20,91 %	D120961	1%	Air Liquide
CO	Low	112,68	246013016	1,40%	Air Liquide
	Medium	276,34	246013059	1,40%	Air Liquide
	High	560,44	246012194	1,40%	Air Liquide
NO	Low	182,40	156241439147	2%	Air Liquide
	Medium	430,70	156241459030	2%	Air Liquide
	High	611,20	156241459082	2%	Air Liquide
SO_2	Low	133,36	156241459018	2%	Air Liquide
	Medium	257,76	156241459151	2%	Air Liquide
	High	645,08	156241459055	2%	Air Liquide

Keterangan: konsentrasi CO, NO, dan SO_2 dalam mg/m³; O_2 dalam %. Titik nol menggunakan Nitrogen (N_2) Ultra High Purity.

Penetapan Span Value untuk parameter NO dan SO_2 mengacu pada baku mutu emisi dalam Permen LHK No. P.15/2019 Lampiran I.A tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal (Tabel 3). Titik-titik audit ditetapkan agar mencerminkan kondisi operasional

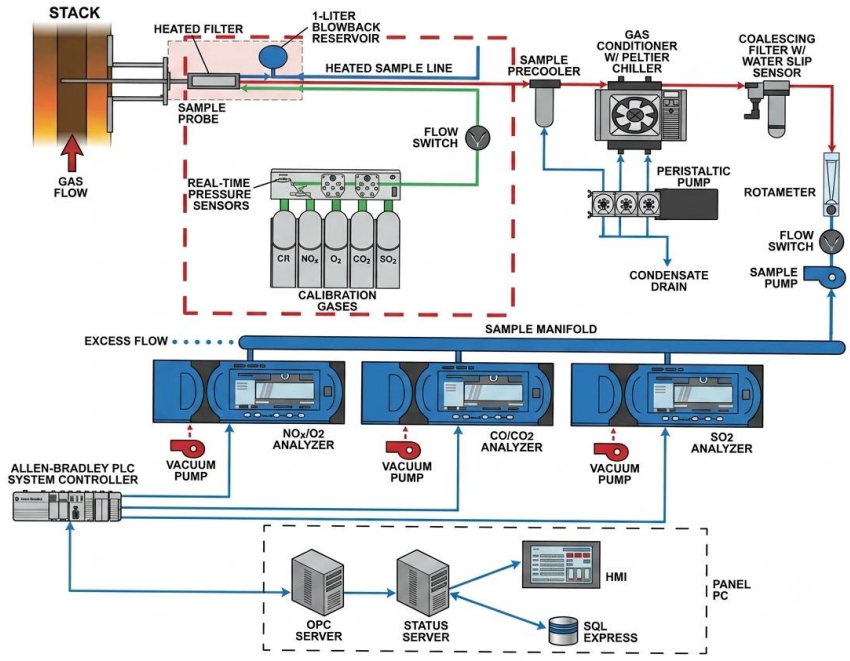
normal instrumen dan menghasilkan kurva linearitas yang mencakup atau mendekati nilai baku mutu emisi yang berlaku. Titik audit rendah ditetapkan pada 20–30% span value dan titik sedang pada 50–60% span value.

Tabel 3. Baku Mutu Emisi dan Dasar Penetapan Span Value

No.	Parameter	Dasar Regulasi	Baku Mutu (mg/Nm³)	Baku Mutu (ppm)
1	**NO**	**Permen LHK No. 15/2019 Lamp. I.A**	**550**	**384,21**
2	**NO_2**	**Permen LHK No. 15/2019 Lamp. I.A**	**550**	**292,27**
3	**SO_2**	**Permen LHK No. 15/2019 Lamp. I.A**	**550**	**209,92**
4	**O_2 / CO**	**Parameter acuan / efisiensi**	**–**	**–**

Prosedur Audit

Berdasarkan Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026, audit CEMS eksternal untuk parameter gas dibagi menjadi empat kegiatan utama. Pertama, pengecekan fisik (visual inspection) dan uji kebocoran (leak test) sebelum audit. Kedua, pelaksanaan CGA dengan mengalirkan gas standar melalui probe pada minimum dua titik audit dan tiga pengulangan; pada penelitian ini digunakan tiga titik audit (rendah 20–30% span, sedang 50–60% span, dan tinggi) serta tiga pengulangan pembacaan. Ketiga, uji linearitas yang dilaksanakan bersamaan dengan CGA pada tiga titik span dan satu titik nol, dengan syarat mutu koefisien determinasi $R^2 > 0{,}995$. Keempat, penilaian zero drift pada titik nol mengacu pada US EPA 40 CFR 60 Appendix B (Performance Specification 2, 3, dan 4). Skema sistem sampling dan audit CEMS ekstraktif ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema sistem sampling dan Cylinder Gas Audit pada CEMS ekstraktif

Pengecekan fisik dilakukan melalui inspeksi visual terhadap keutuhan sampling probe, sambungan pemipaan, kondisi shelter ber-AC, dan integritas analyzer, mengacu pada aspek teknis EN 14181 dan EN 15267-3. Uji kebocoran dilakukan dengan menutup saluran masuk dan mengamati kestabilan tekanan/aliran pada sistem sampling; kebocoran akan menyebabkan pengenceran sampel oleh udara ambien dan menghasilkan pembacaan yang bias rendah. Penilaian zero drift dilakukan dengan mengalirkan gas nol (Nitrogen UHP) dan mencatat pergeseran baseline sensor; nilai zero drift yang mendekati nol menandakan stabilitas titik nol yang baik. Keseluruhan rangkaian dilaksanakan tanpa penyesuaian (adjustment) manual pada analyzer selama audit berlangsung, sesuai amanat Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026 agar audit mencerminkan performa aktual instrumen.

Persentase akurasi (accuracy error) dihitung dengan persamaan $A = ((C_m - C_a) / C_a) \times 100\%$, dengan C_m adalah nilai rata-rata pembacaan CEMS dan C_a adalah konsentrasi gas standar CRM. Syarat keberterimaan adalah deviasi tidak melebihi 15% dari nilai benar dan waktu tanggap (response time) maksimal 240 detik. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktor tunggal dengan model $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$, di mana perlakuan adalah unit PLTU (tiga taraf) dan respon adalah persentase akurasi CEMS terhadap true value. Data diuji dengan Analisis Varian (ANOVA) satu arah pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$); apabila F-hitung > F-tabel, dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Jujur (Tukey's HSD) untuk mengidentifikasi unit dengan perbedaan performa paling menonjol.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengecekan Fisik dan Uji Kebocoran

Melalui asesmen fisik, instrumentasi yang terpasang pada Unit 1, Unit 2, dan Unit 3 tidak menunjukkan kerusakan yang teramati secara langsung. Uji kebocoran dilakukan langsung ke probe melalui jalur yang tersedia dari CEMS shelter, dan seluruh sistem dinyatakan dalam kondisi baik sehingga layak melanjutkan ke tahap CGA. Hasil ini memastikan bahwa penyimpangan yang teramati pada tahap berikutnya tidak disebabkan oleh kebocoran mekanis, melainkan mencerminkan karakteristik respons sensor.

Akurasi Cylinder Gas Audit (CGA)

Pengujian akurasi dilakukan pada tiga tingkat konsentrasi (rendah, sedang, tinggi) ditambah titik nol untuk parameter SO_2, NO, O_2, dan CO. Kriteria kelayakan mengacu pada batas toleransi deviasi maksimum 15% dari nilai acuan. Hasil pengujian untuk Unit 1, Unit 2, dan Unit 3 berturut-turut disajikan pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6.

Tabel 3. Hasil Uji Akurasi CGA – PLTU Unit 1, Gunung Mas, Kalimantan Tengah

Parameter	Titik	Nilai Benar	Pembacaan CEMS	Akurasi (%)	Deviasi (%)	Ket.	Resp. (dtk)
SO_2	Low	67,99	71,0	104,43	−4,43	Memenuhi	41
	Medium	131,68	143,0	108,60	−8,60	Memenuhi	133
	High	268,79	276,0	102,68	−2,68	Memenuhi	125
NO	Low	182,40	185,3	101,59	−1,59	Memenuhi	77
	Medium	430,70	475,3	110,36	−10,36	Memenuhi	156
	High	611,20	624,7	102,21	−2,21	Memenuhi	152
O_2	Low	4,00	4,10	102,50	−2,50	Memenuhi	190

Parameter	Titik	Nilai Benar	Pembacaan CEMS	Akurasi (%)	Deviasi (%)	Ket.	Resp. (dtk)
	Medium	10,67	10,80	101,22	−1,22	Memenuhi	134
	High	20,95	22,50	107,40	−7,40	Memenuhi	166
CO	Low	112,68	115,3	102,33	−2,33	Memenuhi	58
	Medium	276,34	292,3	105,78	−5,78	Memenuhi	82
	High	560,44	569,0	101,53	−1,53	Memenuhi	62
Zero	Nol	0,00	0,00	100,00	0,00	Memenuhi	190

Pengukuran SO_2 pada Unit 1 menunjukkan deviasi −2,68% hingga −8,60% (over-reading), dengan penyimpangan tertinggi masih jauh di bawah 15%. Parameter NO menghasilkan deviasi −1,59% hingga −10,36%; meskipun deviasi medium (−10,36%) merupakan yang tertinggi di antara seluruh parameter, nilai ini tetap memenuhi keberterimaan. Parameter O_2 stabil (−1,22% hingga −7,40%) dan CO menunjukkan akurasi terkuat (−1,53% hingga −5,78%). Uji zero span memberikan deviasi 0,00%, dan seluruh waktu tanggap berada di bawah 240 detik dengan rata-rata sekitar 120 detik.

Tabel 4. Hasil Uji Akurasi CGA – PLTU Unit 2, Gunung Mas, Kalimantan Tengah

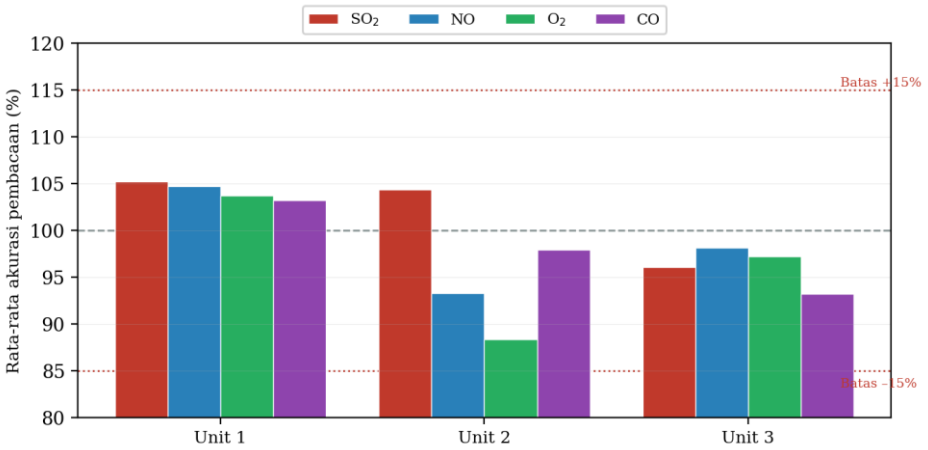
Parameter	Titik	Nilai Benar	Pembacaan CEMS	Akurasi (%)	Deviasi (%)	Ket.	Resp. (dtk)
SO_2	Low	67,99	68,7	101,04	−1,04	Memenuhi	116
	Medium	131,68	144,0	109,36	−9,36	Memenuhi	131
	High	268,79	276,0	102,68	−2,68	Memenuhi	121
NO	Low	182,40	170,7	93,59	6,41	Memenuhi	173
	Medium	430,70	397,3	92,25	7,75	Memenuhi	135
	High	611,20	574,3	93,96	6,04	Memenuhi	152
O_2	Low	4,00	3,60	90,00	10,00	Memenuhi	178
	Medium	10,67	9,10	85,29	14,71	Memenuhi	124
	High	20,95	18,80	89,74	10,26	Memenuhi	136
CO	Low	112,68	108,3	96,11	3,89	Memenuhi	107
	Medium	276,34	271,7	98,32	1,68	Memenuhi	132
	High	560,44	556,3	99,26	0,74	Memenuhi	134
Zero	Nol	0,00	0,00	100,00	0,00	Memenuhi	126

Pada Unit 2, SO_2 memiliki deviasi −1,04% hingga −9,36% (over-reading), sedangkan NO cenderung under-reading (6,04% hingga 7,75%). Perbedaan arah penyimpangan ini mengindikasikan karakteristik respons sensor yang berbeda antarunit. Parameter O_2 menjadi perhatian utama: deviasinya berkisar 10,00% hingga 14,71%, dengan nilai medium (14,71%) mendekati ambang batas 15%. Karena konsentrasi O_2 digunakan sebagai faktor koreksi (dilution correction) bagi kalkulasi gas pencemar lainnya, sensor O_2 Unit 2 memerlukan pemeliharaan preventif agar tidak menimbulkan pembacaan yang tidak sesuai. Parameter CO tetap paling stabil (0,74% hingga 3,89%).

Tabel 5. Hasil Uji Akurasi CGA – PLTU Unit 3, Pulau Obi, Maluku Utara

Parameter	Titik	Nilai Benar	Pembacaan CEMS	Akurasi (%)	Deviasi (%)	Ket.	Resp. (dtk)
SO_2	Low	133,36	126,6	94,93	5,07	Memenuhi	133
	Medium	257,76	249,8	96,91	3,09	Memenuhi	125
	High	645,08	621,0	96,27	3,73	Memenuhi	153
NO	Low	121,58	121,7	100,10	−0,10	Memenuhi	77
	Medium	296,99	300,8	101,28	−1,28	Memenuhi	156
	High	609,23	566,5	92,99	7,01	Memenuhi	152
O_2	Low	5,09	4,84	95,09	4,91	Memenuhi	134
	Medium	10,02	9,85	98,30	1,70	Memenuhi	166
	High	20,91	20,54	98,23	1,77	Memenuhi	134
CO	Low	62,90	59,0	93,80	6,20	Memenuhi	82
	Medium	111,54	101,97	91,42	8,58	Memenuhi	62
	High	591,13	557,97	94,39	5,61	Memenuhi	93
Zero	Nol	0,00	0,00	100,00	0,00	Memenuhi	93

Pada Unit 3, SO_2 sedikit under-reading (3,09% hingga 5,07%), NO bervariasi dari −1,28% (over-reading) hingga 7,01% (under-reading), O_2 sangat stabil (1,70% hingga 4,91%), dan CO memiliki penyimpangan terbesar pada titik medium (8,58%) namun tetap memenuhi keberterimaan. Secara keseluruhan, seluruh parameter pada ketiga unit memenuhi kriteria deviasi <15%, zero drift 0,00%, dan response time <240 detik. Perbandingan rata-rata akurasi pembacaan tiap parameter antarunit divisualisasikan pada Gambar 2, yang memperlihatkan bahwa seluruh nilai berada dalam koridor toleransi ±15% meskipun polanya berbeda antarunit.

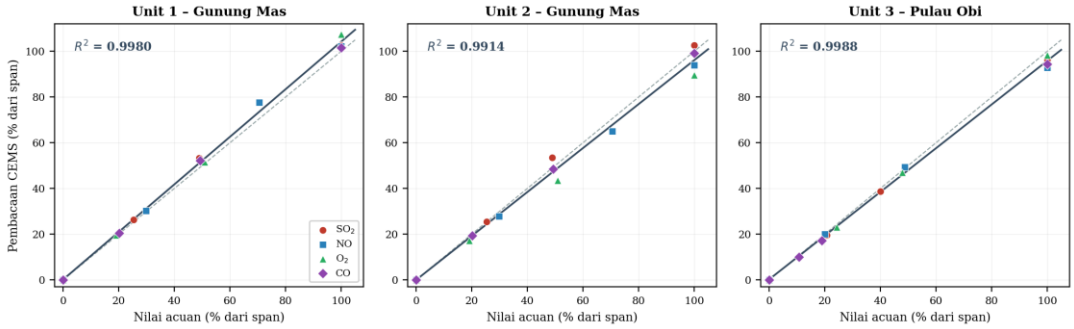


Gambar 2. Perbandingan rata-rata akurasi pembacaan CEMS tiap parameter pada tiga unit PLTU

Uji Linearitas

Uji linearitas dilakukan pada satu titik nol dan tiga titik span untuk setiap parameter. Kurva linearitas yang diperoleh menunjukkan korelasi linear yang kuat antara nilai acuan dan pembacaan instrumen (Gambar 3). Koefisien determinasi (R^2) tiap parameter pada ketiga unit

disajikan pada Tabel 7, dan seluruhnya memenuhi syarat mutu $R^2 > 0{,}995$ sesuai Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026.



Gambar 3. Kurva linearitas CEMS ketiga unit (pembacaan vs. nilai acuan, dinormalisasi terhadap span)

Tabel 6. Koefisien Determinasi (R^2) Uji Linearitas per Parameter

Unit	SO_2	NO	O_2	CO	Syarat
Unit 1	**0,9990**	**0,9964**	**0,9990**	**0,9995**	**> 0,995**
Unit 2	**0,9985**	**0,9998**	**0,9992**	**0,9999**	**> 0,995**
Unit 3	**1,0000**	**0,9978**	**0,9999**	**1,0000**	**> 0,995**

Analisis Ragam (ANOVA) Antarunit

Untuk menguji apakah perbedaan performa antarunit bersifat signifikan, persentase akurasi tiap parameter dianalisis dengan ANOVA satu arah pada $\alpha = 0{,}05$. Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 8. Untuk keempat parameter, nilai F-hitung melebihi F-kritis (5,143) dan p-value < 0,05, sehingga H_0 ditolak; artinya terdapat perbedaan performa yang signifikan (berbeda nyata) antarunit CEMS. Perbedaan paling menonjol terjadi pada parameter O_2 ($F = 25{,}46$; $p = 0{,}001$) dan CO ($F = 22{,}15$; $p = 0{,}002$).

Tabel 7. Ringkasan Hasil Uji ANOVA Satu Arah Antarunit ($\alpha = 0{,}05$)

Parameter	F-hitung	F-kritis	P-value	Keputusan
SO_2	**7,828**	**5,143**	**0,021**	**Berbeda nyata**
NO	**6,627**	**5,143**	**0,030**	**Berbeda nyata**
O_2	**25,462**	**5,143**	**0,001**	**Berbeda nyata**
CO	**22,154**	**5,143**	**0,002**	**Berbeda nyata**

Waktu Tanggap (Response Time)

Waktu tanggap mengukur kecepatan instrumen merespons perubahan konsentrasi gas dari cerobong hingga terbaca oleh sistem deteksi. Pada Unit 1, waktu tercepat dicapai parameter SO_2 pada titik rendah (41 detik) dan terlama pada O_2 (190 detik); pada Unit 2, tercepat CO (107 detik) dan terlama O_2 (178 detik); serta pada Unit 3, tercepat CO (62 detik) dan terlama O_2 (166 detik). Secara konsisten, parameter O_2 menghasilkan waktu tanggap terlama pada ketiga unit. Variasi ini dipengaruhi oleh sifat fisik-kimia molekul gas, jenis sensor, dan laju alir pada sampling line. Meskipun demikian, seluruh nilai berada di bawah ambang keberterimaan 240 detik, sehingga ketiga unit memenuhi persyaratan Kepmen

LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026. Waktu tanggap O_2 yang relatif panjang menyarankan pemeriksaan jalur sampling khusus O_2 untuk memastikan tidak ada pengotor yang menurunkan kinerja analyzer.

Uji lanjut Beda Nyata Jujur (Tukey's HSD) mengonfirmasi bahwa perbedaan performa terutama dikontribusikan oleh Unit 2, yang memiliki rata-rata akurasi paling rendah pada parameter O_2 (88,34%) dan menyimpang paling jauh dari nilai ideal 100%. Sebaliknya, Unit 1 cenderung over-reading (rata-rata di atas 100%) sedangkan Unit 3 relatif seimbang dan paling mendekati nilai acuan pada sebagian besar parameter. Pola ini konsisten dengan perbedaan merek analyzer (Unit 3 menggunakan merek berbeda dari Unit 1 dan Unit 2) dan menegaskan bahwa faktor instrumen — bukan sekadar kondisi lokasi — berkontribusi pada variasi performa.

Temuan ini memberikan implikasi penting: kepatuhan terhadap ambang <15% tidak berarti performa antarunit identik. Meskipun ketiga unit lolos audit, terdapat perbedaan sistematis yang secara statistik nyata, terutama pada sensor O_2 dan CO. Perbedaan ini dapat bersumber dari usia dan merek analyzer (Unit 1 dan Unit 2 bermerek berbeda dengan Unit 3), kondisi sistem pengkondisian sampel, karakteristik fisik-kimia molekul gas, serta laju alir pada sampling line yang memengaruhi waktu tanggap. Konsistensi antarunit yang belum seragam ini menegaskan bahwa audit CGA tahunan perlu dilengkapi pemeriksaan drift internal berkala agar akumulasi penyimpangan dapat diantisipasi sebelum melewati ambang toleransi. Hasil ini sejalan dengan penekanan Lestari dkk. (2025) mengenai pentingnya penjaminan mutu data sebelum integrasi ke SISPEK.

Jika dibandingkan dengan acuan internasional, standar US EPA 40 CFR 60 Appendix F umumnya menetapkan indikator perlunya audit CGA pada deviasi melebihi sekitar 10% terhadap gas standar bersertifikat, sedangkan regulasi nasional Kepmen LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026 menetapkan ambang keberterimaan 15%. Seluruh parameter pada ketiga unit dalam penelitian ini berada di bawah 15%, namun beberapa titik — khususnya O_2 Unit 2 (14,71%) dan NO Unit 1 (10,36%) — telah melampaui koridor 10% ala US EPA. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun patuh secara nasional, sebagian sensor sudah menunjukkan gejala awal degradasi yang, dalam kerangka penjaminan mutu EN 14181 (QAL2/QAL3), sudah selayaknya memicu tindakan pemeliharaan dini. Temuan ini memperkuat argumen bahwa ambang toleransi tunggal 15% sebaiknya dilengkapi pemantauan tren agar penurunan performa dapat terdeteksi sebelum mendekati batas.

Implikasi praktis dari temuan ini adalah perlunya alur kerja penjaminan mutu yang berjenjang. Audit CGA tahunan sebaiknya diposisikan sebagai lapisan verifikasi eksternal, sementara pemeriksaan zero dan span drift internal secara bulanan atau triwulanan menjadi lapisan deteksi dini. Dengan skema ini, unit yang menunjukkan kecenderungan deviasi meningkat — seperti sensor O_2 Unit 2 — dapat ditangani melalui pembersihan jalur sampling, penggantian filter, atau rekalibrasi terjadwal sebelum melewati ambang toleransi. Pendekatan berbasis tren ini lebih protektif dibandingkan penilaian tunggal tahunan dan sejalan dengan semangat pemantauan berkelanjutan yang menjadi dasar sistem CEMS.

Konsekuensi kuantitatif dari deviasi O_2 patut ditekankan karena O_2 digunakan sebagai faktor koreksi oksigen bagi seluruh gas pencemar. Kesalahan pembacaan O_2 akan terpropagasi ke nilai konsentrasi SO_2, NO, dan CO yang dinormalisasi, sehingga deviasi O_2 yang mendekati

15% pada Unit 2 berpotensi memperbesar ketidakpastian gabungan pada data emisi yang dilaporkan. Oleh sebab itu, prioritas pemeliharaan pada sensor O_2 memberikan manfaat berganda, yaitu memperbaiki akurasi O_2 itu sendiri sekaligus menstabilkan hasil koreksi seluruh parameter lainnya.

Penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menafsirkan hasil. Data yang diperoleh bersifat snapshot pada saat pelaksanaan CGA, bukan pemantauan jangka panjang, sehingga belum menggambarkan drift harian atau mingguan. Cakupan parameter dibatasi pada gas SO_2, NO, O_2, dan CO, tanpa mengevaluasi partikulat, laju alir, maupun perangkat lunak CEMS. Selain itu, aspek pendukung seperti pengaruh kelembaban dan suhu tidak diukur secara terpisah. Keterbatasan ini membuka peluang penelitian lanjutan yang lebih komprehensif sebagaimana direkomendasikan pada bagian penutup.

Secara sintesis, ketiga unit memperlihatkan pola respons yang khas: Unit 1 cenderung over-reading pada hampir seluruh parameter, Unit 2 cenderung under-reading dengan sensitivitas O_2 yang paling lemah, dan Unit 3 relatif berimbang. Perbedaan pola ini menunjukkan bahwa validitas data emisi tidak cukup dijamin hanya oleh status "lolos audit", melainkan perlu ditinjau dari besar dan arah deviasi tiap sensor. Dari perspektif kebijakan berbasis bukti (evidence-based policy), hasil ini mendukung penguatan verifikasi data real-time yang masuk ke SISPEK: tren penyimpangan hasil CGA tahunan dapat dijadikan basis untuk menilai kelayakan re-integrasi CEMS yang saat ini dilakukan setiap lima tahun. Dengan demikian, audit CGA tidak hanya berfungsi sebagai pemenuhan kewajiban administratif, tetapi juga sebagai instrumen pengawasan mutu data yang berkontribusi langsung pada keandalan sistem pemantauan emisi nasional.

KESIMPULAN

Pelaksanaan Cylinder Gas Audit pada ketiga unit PLTU batubara telah memenuhi standar teknis dan regulasi nasional (KLH/BPLH, 2026; KLHK, 2021) serta standar internasional US EPA 40 CFR 60 Appendix F, mencakup pengecekan fisik, uji kebocoran, pengaliran gas standar CRM tertelusur NIST pada tiga level konsentrasi, dan pengujian zero span tanpa penyesuaian manual selama audit. Berdasarkan hasil, dapat disimpulkan beberapa hal berikut. Pertama, seluruh parameter (SO_2, NO, O_2, dan CO) pada ketiga unit menghasilkan deviasi akurasi kurang dari 15%, zero drift 0,00%, dan waktu tanggap kurang dari 240 detik, sehingga seluruh instrumen CEMS dinyatakan memenuhi syarat keberterimaan regulasi. Kedua, uji linearitas seluruh parameter memenuhi syarat $R^2 > 0{,}995$. Ketiga, meskipun seluruh unit patuh, uji ANOVA menunjukkan perbedaan performa yang signifikan antarunit pada semua parameter, dengan sensor O_2 Unit 2 mendekati ambang batas (14,71%). Dengan demikian, CEMS yang diaudit dinilai patuh terhadap regulasi namun belum seragam performanya, sehingga diperlukan pemeliharaan preventif spesifik-parameter dan pemeriksaan drift internal berkala untuk memperkuat keandalan data emisi nasional.

Berdasarkan temuan tersebut, direkomendasikan beberapa tindak lanjut. Secara teknis-operasional, pengelola PLTU perlu melakukan pemeliharaan preventif pada sensor O_2 Unit 2 mengingat deviasinya mendekati ambang batas, serta melakukan pemeriksaan zero dan span drift internal secara rutin (bulanan atau triwulanan) menggunakan gas standar internal untuk mengantisipasi akumulasi pergeseran sebelum audit CGA tahunan. Bagi regulator, disarankan

memastikan ketertelusuran metrologi gas standar hingga ke NIST sesuai ISO/IEC 17025:2017 dan ISO 17034:2016, serta memanfaatkan tren penyimpangan (drift trends) hasil CGA tahunan sebagai syarat re-integrasi CEMS ke SISPEK. Penelitian selanjutnya disarankan mengambil data secara long-term (6–12 bulan) untuk mengevaluasi drift harian/mingguan, menambahkan evaluasi partikulat melalui Response Correlation Audit (RCA) dan laju alir melalui Relative Accuracy Test Audit (RATA), serta membandingkan performa CEMS tipe ekstraktif dengan tipe in-situ pada kondisi cerobong yang bervariasi.

PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa tidak ada dukungan finansial yang diterima untuk pelaksanaan penelitian ini dan/atau penerbitan artikel ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya hubungan komersial atau finansial yang dapat ditafsirkan sebagai potensi konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis berkontribusi penuh dalam perumusan ide gagasan utama, melakukan pengumpulan data kepustakaan (library research), melakukan analisis dan interpretasi teks primer tokoh, serta penyusunan manuskrip. Seluruh penulis telah menyetujui versi akhir manuskript.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN ARTIFISIAL GENERATIF

Penulis menyatakan bahwa kecerdasan artifisial (AI) generatif digunakan dalam penyusunan manuskrip ini. Penulis mengakui penggunaan AI generatif untuk membantu meningkatkan kejelasan bahasa dan memperbaiki struktur tata bahasa manuskrip. Penggunaan tersebut dilakukan dengan mematuhi pedoman etika yang berlaku mengenai penggunaan dan pengungkapan AI generatif dalam penelitian ilmiah. Setiap penulis telah memberikan kontribusi intelektual yang substansial terhadap karya ini. Seluruh isi manuskrip telah ditelaah secara cermat untuk memastikan keakuratannya, dan penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas integritas serta isi akhir manuskript.

REFERENSI

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI ISO/IEC 17025:2017 Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan kalibrasi*.

Bakri, M. (2017). Penerapan data mining untuk clustering kualitas batu bara dalam proses pembakaran di PLTU Sebalang menggunakan metode K-Means. *Jurnal TEKNOINFO, 11*(1), 1–4.

D'Elia, G., Ferro, M., Sommella, P., Ferlito, S., De Vito, S., & Di Francia, G. (2024). Concept drift mitigation in low-cost air quality monitoring networks. *Sensors, 24*(9), Article 2786. https://doi.org/10.3390/s24092786

European Committee for Standardization. (2007). *EN 15267-3: Air quality – Certification of automated measuring systems*. CEN.

European Committee for Standardization. (2014). *EN 14181: Stationary source emissions – Quality assurance of automated measuring systems*. CEN.

Fajar, Monoarfa, W., Sultan, A. Z., Yunus, M. S., Nugroho, A., & Demmallino, E. B. (2026). Development and preliminary validation of a 69% domestic content (TKDN) continuous emission monitoring system for industrial flue gas monitoring. *Engineering, Technology & Applied Science Research, 16*(3), 37119–37124. https://doi.org/10.48084/etasr.18689

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 17034:2016 General requirements for the competence of reference material producers*.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2019). *Peraturan Menteri LHK No. P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal*.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). *Peraturan Menteri LHK No. 13 Tahun 2021 tentang Sistem Informasi Pemantauan Emisi Industri Secara Terus Menerus (SISPEK)*.

Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup. (2026). *Keputusan Menteri LH/BPLH No. 1638 Tahun 2026 tentang Standar Sistem Pemantauan Emisi Secara Terus Menerus (CEMS)*.

Kramawijaya, A. G. (2018). Estimasi beban emisi partikulat dan gas dari PLTU batu bara di Indonesia dengan menggunakan hasil pemantauan. In *Prosiding Seminar Nasional ITENAS ke-4* (pp. H-1–H-7). Institut Teknologi Nasional Bandung.

Lestari, D. F. (2026). Analisis Hasil Proses Integrasi Continuous Emission Monitoring System (CEMS) dengan Sistem Pemantauan Emisi Industri Kontinyu (SISPEK) Studi Kasus PT Donggi-Senoro LNG. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, *3*(3).

Lestari, D. F., Triwiyatno, A., & Widayat, W. (2025). Analisis hasil proses integrasi Continuous Emission Monitoring System (CEMS) dengan Sistem Pemantauan Emisi Industri Kontinyu (SISPEK): Studi kasus PT Donggi-Senoro LNG. *JPII (Jurnal Profesi Insinyur Indonesia), 3*(3), 149–160.

Mukharomah, N. L. A., Ningrum, D. M., & Claudya, A. L. (2025). Pengaruh kegiatan pembangkit listrik tenaga gas dan uap PT X terhadap emisi gas SO_2 dan NOx. *Envirous, 5*(2), 21–26. https://doi.org/10.33005/envirous.v5i2.346

Pemerintah Republik Indonesia. (2009). *Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.

Pemerintah Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup*.

Raafi, W. M. (2022). *Analisis kerusakan spiral wires pada electrostatic precipitator di pembangkit listrik tenaga uap* [Tugas akhir, Politeknik Negeri Sriwijaya]. Repositori POLSRI. https://eprints.polsri.ac.id/13692/

Rofandi, M. N., & Irwanto. (2022). Sistem kerja Electrostatic Precipitator (ESP) untuk menangkap abu hasil proses pembakaran di PLTU PT. Dian Swastatika Sentosa Serang Power Plant. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, 6*(2), 376–386.

Rizkya, A., & Nugroho, D. (2025). Perancangan dan Simulasi Sistem Purging Otomatis pada Sample Probe CEMS di PLTGU PT Jawa Satu Power. *Elkom: Jurnal Elektronika Dan Komputer*, *18*(1), 425–435.

Sarwono, E., Adnan, F., & Rafi, M. M. (2021). Pemodelan dispersi emisi udara SO_2 dan NO_2 dengan menggunakan persamaan Gaussian pada cerobong PLTU Muara Jawa, Kabupaten Kutai Kartanegara. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL, 5*(2), 17–34.

Triani, M., Dewi, K., Sitanggang, R., Cahyo, N., Rasgianti, R., Supriyanto, E., Bakti, D., & Vincēviča-Gaile, Z. (2024). Development of emission factors from Indonesian coal-fired power plant using continuous emission monitoring data. *BIO Web of Conferences, 104*, Article 00025. https://doi.org/10.1051/bioconf/202410400025

United States Environmental Protection Agency. (n.d.-a). *40 CFR Part 60 Appendix B – Performance Specifications 2, 3, and 4*.