

Continuous Emission Monitoring System (CEMS) Sebagai Alat Evaluasi Efektivitas Sistem Flue Gas Desulfurization (FGD) Dalam Mengurangi Emisi SO₂ Di PLTU Cilacap 660 MW

Muhammad Isnain Wiyastama^{1*}; Wahyudi Budi Pramono¹

1. Magister Rekayasa Elektro, Universitas Islam Indonesia, Jl. Kaliurang Km.14.5, Daerah Istimewa Yogyakarta 55584, Indonesia

*Email: 23925003@students.uii.ac.id

Received: 20 Agustus 2024 | Accepted: 16 Desember 2024 | Published: 24 Desember 2024

ABSTRACT

The increase in global energy demand has led to a significant reliance on fossil fuel-based power plants, such as coal, which are a major source of air pollution, including sulfur dioxide (SO₂). SO₂ emissions have the potential to cause environmental and health issues, such as acid rain and respiratory problems. To address this, Flue Gas Desulfurization (FGD) technology was developed to reduce SO₂ concentrations in exhaust gases through various methods. Additionally, a Continuous Emission Monitoring System (CEMS) is used for real-time emission monitoring and to ensure compliance with emission standards. This study evaluates the effectiveness of FGD in reducing SO₂ emissions at the 660 MW Cilacap Unit 3 Power Plant, using data from various load conditions (low, medium, and high) and two operational conditions (with and without FGD operation). SO₂ emission data were collected using CEMS over the past two years to compare the effectiveness of FGD. The results show that FGD significantly reduces SO₂ emissions at all load levels, with reductions of 44.3% at low load, 59.1% at medium load, and 62.8% at high load. The reduction in SO₂ emissions is more pronounced when FGD is in operation. These data underscore the crucial role of FGD in mitigating the environmental impact of coal-fired power plants by enhancing emission control efficiency.

Keyword: continuous emission monitoring system, emission, flue gas desulfurization, coal fired power plant, SO₂

ABSTRAK

Peningkatan permintaan energi global telah menyebabkan ketergantungan besar pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil, seperti batubara, yang merupakan sumber utama polusi udara, termasuk sulfur dioksida (SO₂). Emisi SO₂ berpotensi menyebabkan masalah lingkungan dan kesehatan, seperti hujan asam dan gangguan pernapasan. Untuk mengatasi ini, teknologi Flue Gas Desulfurization (FGD) dikembangkan untuk mengurangi konsentrasi SO₂ dalam gas buang melalui berbagai metode. Selain itu, Continuous Emission Monitoring System (CEMS) digunakan untuk pemantauan emisi secara real-time dan memastikan kepatuhan terhadap standar emisi. Penelitian ini menilai efektivitas FGD dalam mengurangi emisi SO₂ di PLTU Cilacap Unit 3 yang berkapasitas 660 MW, menggunakan data dari berbagai kondisi beban (rendah, menengah, dan tinggi) dan dua kondisi operasional (FGD beroperasi dan tidak beroperasi). Data emisi SO₂ dikumpulkan menggunakan CEMS selama dua tahun terakhir untuk membandingkan efektivitas FGD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FGD secara signifikan mengurangi emisi SO₂ pada semua tingkat beban, dengan penurunan sebesar 44.3% pada beban rendah, 59.1% pada

beban menengah, dan 62.8% pada beban tinggi. Penurunan emisi SO₂ lebih terasa saat FGD beroperasi. Data ini menekankan peran penting FGD dalam mengurangi dampak lingkungan dari pembangkit listrik batubara dengan meningkatkan efisiensi pengendalian emisi.

Kata kunci: *continuous emission monitoring system, emisi, flue gas desulfurization, pltu, SO₂*

1. PENDAHULUAN

Peningkatan permintaan energi global yang pesat seiring dengan pertumbuhan ekonomi telah menyebabkan ketergantungan yang signifikan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil, seperti batubara. Meskipun pembangkit listrik ini menawarkan solusi yang efisien untuk kebutuhan energi, mereka juga merupakan sumber utama pencemaran udara. Salah satu polutan yang menonjol adalah sulfur dioksida (SO_2), yang berasal dari proses pembakaran batubara [1]. Emisi SO_2 memiliki dampak lingkungan dan kesehatan yang serius, termasuk pembentukan hujan asam yang dapat merusak ekosistem, tanaman, dan struktur bangunan, serta memicu berbagai masalah kesehatan pada manusia, seperti gangguan pernapasan dan penyakit kardiovaskular [2][3].

Untuk menangani masalah pencemaran udara yang disebabkan oleh SO_2 , teknologi *Flue Gas Desulfurization* (FGD) telah dikembangkan sebagai salah satu solusi efektif [4]. Teknologi FGD dirancang untuk mengurangi konsentrasi SO_2 dalam gas buang pembangkit listrik dengan berbagai metode, seperti proses basah, kering, dan semi-kering, yang masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan tersendiri dalam hal efisiensi dan biaya [5]. Di samping teknologi FGD, penggunaan *Continuous Emission Monitoring System* (CEMS) memungkinkan pemantauan emisi gas buang secara kontinu dan real-time, yang sangat penting untuk menilai kinerja FGD dan memastikan bahwa pembangkit listrik mematuhi standar emisi yang ditetapkan [3][6][7][8].

Namun, meskipun teknologi FGD telah banyak diterapkan, masih terdapat kekurangan dalam penelitian yang secara khusus mengkaji efektivitas FGD dalam mengurangi emisi SO_2 pada berbagai tingkat beban unit pembangkit. Penelitian ini bertujuan untuk menampilkan kekosongan data emisi yang dihasilkan dengan menganalisis data emisi SO_2 di PLTU Cilacap 660 MW, yang telah menerapkan FGD dan menggunakan CEMS sebagai alat pemantauan terus menerus. Dengan adanya data yang dikumpulkan dari berbagai kondisi operasional, penelitian ini akan mengevaluasi seberapa efektif teknologi FGD dalam mengurangi emisi SO_2 dan bagaimana CEMS dapat digunakan untuk memantau dan meningkatkan kinerja sistem FGD secara berkelanjutan.

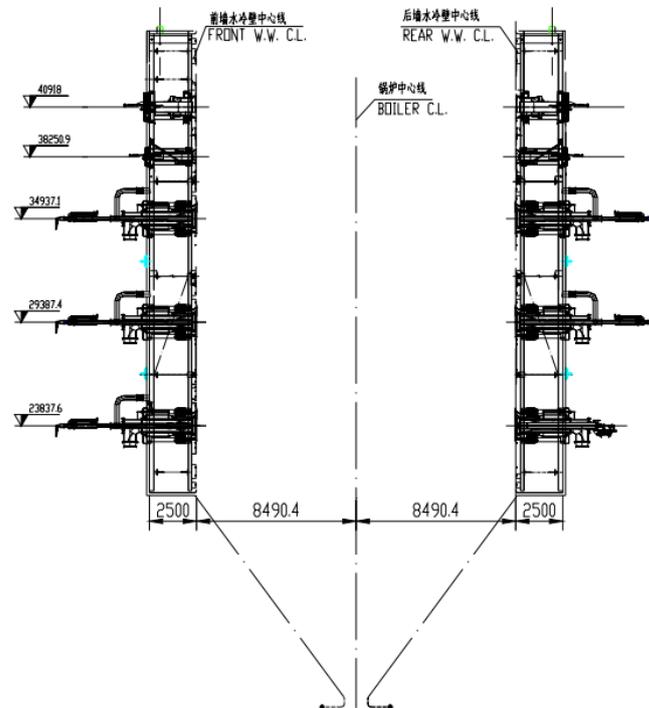
2. METODE PENELITIAN

PLTU Cilacap Unit 3 adalah salah satu pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang terletak di Cilacap, Jawa Tengah. Pembangkit ini memiliki kapasitas terpasang sebesar 660 megawatt dengan teknologi *boiler supercritical*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak operasi sistem FGD terhadap kinerja penurunan gas buang pada berbagai kondisi beban selama periode dua tahun terakhir. Data yang dianalisis adalah emisi SO_2 sebelum dan sesudah FGD pada kondisi beban rendah, menengah, dan tinggi. Durasi pengambilan data kurang lebih 24 jam untuk setiap kondisi beban operasional atau menyesuaikan beban pada saat unit beroperasi. Data dikumpulkan pada saat sistem FGD beroperasi dan tidak beroperasi, sehingga memungkinkan perbandingan kinerja PLTU Cilacap Unit 3 dalam kedua kondisi tersebut.

2.1. Spesifikasi Peralatan Boiler PLTU Cilacap 660 MW

Desain boiler untuk menghasilkan daya sebesar 660 MW dengan model *supercritical*. Uap hasil pembakaran sebesar 2077.89 t/h dengan *steam pressure* sebesar 25.4 Mpa, dengan nilai kalori batu bara sebesar 3400 sampai dengan 3692 Kcal/kg.

Sistem pembakaran pada boiler menggunakan model *overfire air system* (OFA) yang berfungsi untuk menurunkan NO_x yang dihasilkan dari pembakaran batubara, gas, atau HSD pada boiler. Seperti diperlihatkan pada Gambar 1.

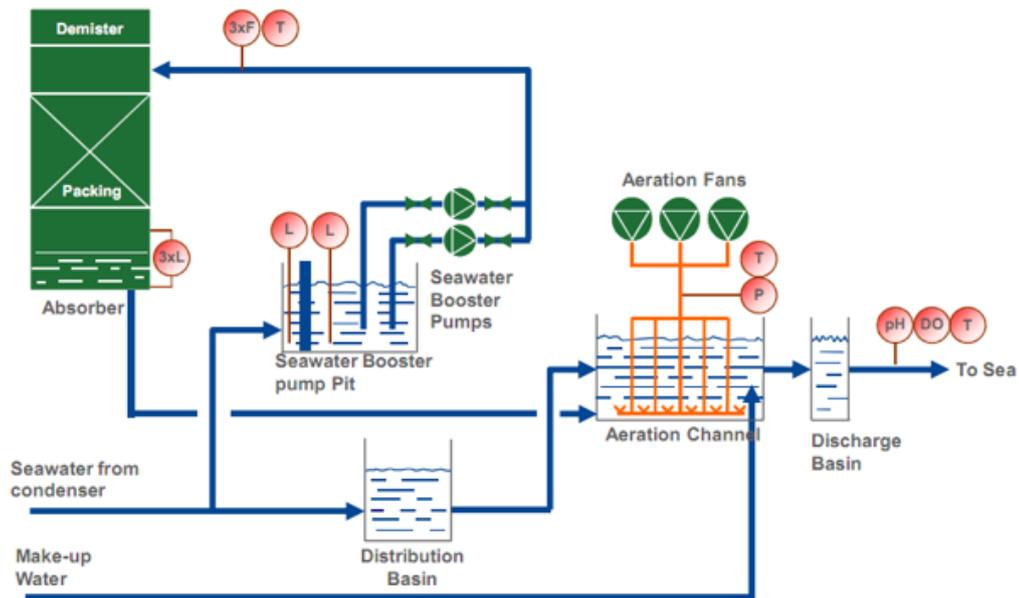


Gambar 1. Model sistem pembakaran boiler OFA [9].

2.2. Spesifikasi Peralatan *Flue Gas Desulfurization*

Sistem FGD di PLTU Cilacap Unit 3 menggunakan teknologi *seawater FGD* yang dikembangkan oleh vendor *Alstom*, seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Teknologi ini dirancang untuk mengurangi kandungan SO_2 dalam gas buang dari *boiler* batubara berkapasitas 660 MW. Dalam sistem ini, air laut digunakan sebagai bahan penyerapan untuk menghilangkan sebagian besar kandungan SO_2 dari gas buang *boiler*.

Sistem ini dilengkapi dengan satu *absorber* yang berfungsi sebagai *packing counter current absorber*. Konsentrasi SO_2 pada gas yang masuk ke cerobong tidak boleh melebihi 550 mg/m^3 . Selama operasi, sistem *sea water flue gas desulfurization* (SWFGD) dirancang agar tidak mengganggu operasi pembangkit secara signifikan. Selain itu, *duct bypass gas* buang dengan kapasitas 100% pada *boiler maximum continuous rate* (BMCR) dirancang untuk memudahkan pemeliharaan sistem. Sistem ini juga dirancang untuk beroperasi secara kontinu pada beban di atas 40% dari kondisi *turbine maximum continuous rate* (TMCR). Kualitas air laut yang dibuang dari sistem harus memenuhi persyaratan lingkungan yang ketat sesuai baku mutu air bahang.



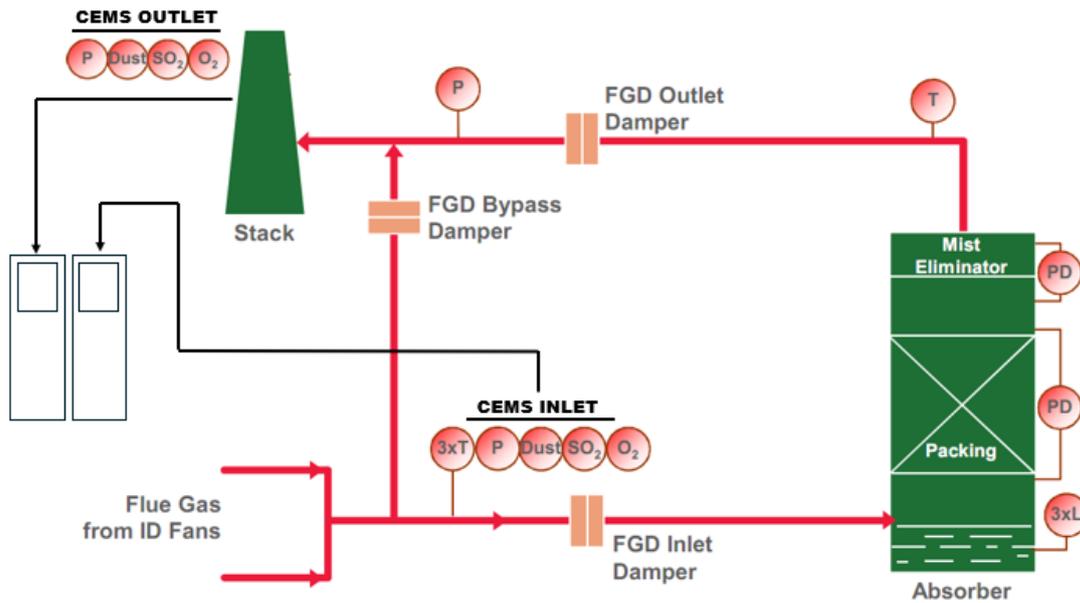
Gambar 2. Flue gas desulfurization [10]

Air pendingin kondenser yang berasal dari air laut yang dipompa oleh *circulating water pump* (CWP) dicabangkan ke *seawater booster pump pit*, selanjutnya di pompakan ke *absorber* FGD menggunakan *seawater booster pump* (SWBP). Hasil keluaran dari *absorber* FGD akan ditampung pada *aeration channel* dan dibaurkan dengan udara menggunakan *aeration fan* untuk selanjutnya dialirkan ke laut.

2.3. Spesifikasi *Continues Emission Monitoring System* (CEMS)

Sistem CEMS di PLTU Cilacap Unit 3 dirancang untuk memantau secara terus-menerus emisi gas buang dari pembangkit. CEMS merupakan alat penting dalam memastikan bahwa emisi gas buang tetap berada dalam batas yang diizinkan dan memenuhi standar lingkungan. Sistem ini terdiri dari berbagai sensor dan perangkat pengukuran yang terpasang pada saluran gas buang untuk mengukur konsentrasi berbagai polutan, termasuk SO_2 , *nitrogen oksida* (NO_x), *carbon monoksida* (CO), dan partikel lainnya.

CEMS bekerja dengan mengumpulkan data emisi secara *real-time*, yang kemudian dianalisis dan dilaporkan untuk memastikan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan. Data yang dikumpulkan meliputi konsentrasi gas, suhu, tekanan, dan aliran gas, yang memberikan gambaran lengkap tentang kinerja sistem pengendalian emisi. Informasi ini ditransmisikan ke pusat kontrol atau *central control room* (CCR) untuk pemantauan dan analisis lebih lanjut. Dengan kemampuan untuk mendeteksi perubahan dalam emisi secara cepat, CEMS memungkinkan operator untuk mengambil tindakan korektif jika diperlukan dan memastikan bahwa semua operasi pembangkit tetap berada dalam batas yang telah ditetapkan. Selain itu, data yang dihasilkan oleh CEMS juga digunakan untuk pelaporan regulasi dan penilaian dampak lingkungan secara *online* dan *real-time* untuk mendukung transparansi dan akuntabilitas operasional dalam kepedulian terhadap lingkungan. Integrasi sistem antara FGD dan CEMS seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Integrasi sistem FGD dan CEMS [10]

Peralatan CEMS dipasang pada dua lokasi strategis di dalam sistem FGD, pada *inlet* FGD dan *outlet* FGD. CEMS pada inlet FGD bertujuan untuk mengukur konsentrasi emisi, terutama SO₂, NO_x, dan partikel debu, sebelum gas buang masuk ke sistem *absorber*. Hal ini penting untuk menentukan efisiensi sistem dan memastikan bahwa operasi sistem FGD berjalan optimal.

Setelah gas buang melewati serangkaian proses penyaringan dalam *absorber* FGD, CEMS di outlet FGD digunakan untuk mengukur kembali konsentrasi emisi yang sama. Perbedaan antara pengukuran *inlet* dan *outlet* memberikan data kuantitatif tentang efektivitas penurunan emisi dari sistem FGD.

Sistem FGD di PLTU Cilacap unit 3 dirancang dengan kapasitas untuk menurunkan emisi SO₂ hingga 90%. Proses ini dilengkapi dengan *mist eliminator* yang menghilangkan *fly ash* yang tersisa, memastikan bahwa gas buang yang keluar melalui cerobong sudah sangat rendah kandungan SO₂ dan partikulatnya.

Dengan konfigurasi dan sistem pengendalian yang tepat, PLTU Cilacap unit 3 mampu memenuhi standar lingkungan yang ketat dan berkontribusi dalam pengurangan dampak pencemaran udara.

2.4. Baku Mutu Emisi Pembangkit Tenaga Termal

Dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI No. 15 Tahun 2019, yang di maksud dengan baku mutu adalah ukuran batas atau kadar maksimum dan/atau beban emisi maksimum yang diperbolehkan masuk atau dimasukkan ke dalam udara ambien. Pada peraturan ini juga disebutkan sistem pemantauan emisi secara terus-menerus adalah suatu alat yang bertujuan untuk mengukur kadar suatu parameter emisi dan laju air melalui pengukuran secara terus menerus [3]. Tabel 1. dijelaskan tentang baku mutu emisi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), PLTU Cilacap unit 3 menggunakan acuan ini dikarenakan unit pembangkit dibangun sebelum peraturan menteri berlaku ditahun 2019.

Tabel 1. Baku mutu emisi PLTU dibangun sebelum 2019 [3].

	Parameter	Kadar Maksimum		
		Batubara	Minyak Solar	Gas
		(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)	(mg/Nm ³)
1	Sulfure Dioksida (SO ₂)	550	650	50
2	Nitrogen Oksida (No. _x)	550	450	320
3	Partikulat (PM)	100	75	30
4	Merkuri (Hg)	0.03	-	-

2.5. Metode Pengambilan dan Analisis Data Emisi

Data emisi SO₂ akan diambil pada tiga tingkatan beban unit, pada beban rendah, beban menengah dan beban tinggi. Pengukuran akan dilakukan saat FGD beroperasi dan tidak beroperasi untuk mengetahui masing-masing untuk mengetahui efek dari penurunan emisi setelah melewati FGD. Beban rendah didefinisikan sebagai operasi unit pada 30-50% dari kapasitas maksimum, beban menengah didefinisikan sebagai operasi unit pada 50-80% dari kapasitas dan beban tinggi sebagai operasi unit pada 80-100% dari kapasitas maksimum. Data diambil secara sampling menggunakan peralatan CEMS selama periode operasi yang memenuhi persyaratan operasi yang signifikan untuk pengambilan data.

Sampel data akan diambil secara 24 jam untuk setiap tingkatan beban pada kondisi FGD beroperasi dan tidak beroperasi. Data yang dikumpulkan meliputi konsentrasi SO₂ pada *inlet* FGD serta *outlet* cerobong dan data beban unit. Data emisi SO₂ akan ditampilkan dalam bentuk grafik untuk mengevaluasi atau membandingkan efektivitas FGD dalam mengurangi emisi SO₂.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi ini mengevaluasi efektivitas sistem FGD dalam mengurangi emisi SO₂ di PLTU Cilacap Unit 3 dengan kapasitas 660 MW. Analisis dilakukan berdasarkan data yang dikumpulkan pada tiga kategori beban serta dua kondisi operasi pada FGD antara lain:

1. Beban rendah (30-50%), beban menengah (50-80%), dan beban tinggi (80-100%) dengan kondisi peralatan FGD tidak beroperasi.
2. Beban rendah (30-50%), beban menengah (50-80%), dan beban tinggi (80-100%) dengan kondisi peralatan FGD beroperasi.

Data emisi SO₂ dikumpulkan menggunakan CEMS saat FGD beroperasi dan tidak beroperasi selama periode beban tertentu setiap tingkat beban.

3.1. Hasil Pengukuran Emisi SO₂ pada Beban Rendah

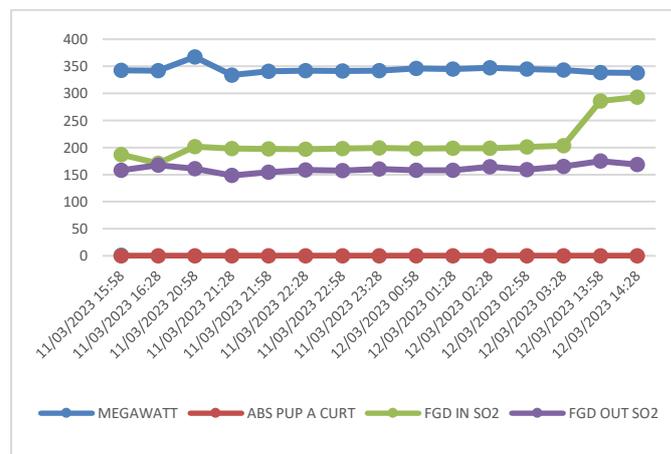
Pengukuran emisi SO₂ di PLTU Cilacap Unit 3 menunjukkan variasi konsentrasi yang signifikan berdasarkan tingkat dan beban kondisi operasi FGD:

- **Beban rendah FGD tidak beroperasi**

Pada beban rendah berkisar antara 30-50% dari kapasitas, yaitu antara 200 MW hingga 330 MW, pengukuran dilakukan untuk melihat efek dari ketidakberoperasian FGD. Hasil pengukuran ini ditunjukkan pada Tabel 2, sedangkan grafik perbandingan antara FGD SO₂ *inlet* dan *outlet* pada Gambar 4. Indikator utama bahwa FGD tidak beroperasi adalah tidak adanya aktivitas pada *seawater booster pump FGD supply system*, yang dapat dilacak melalui arus motor peralatan tersebut.

Tabel 2. Beban rendah FGD tidak beroperasi

TIME	MEGAWA TT	ABS PUP A CURT	FGD IN SO2	FGD OUT SO2	EFEKTIVITAS (%)
11/03/2023 15:58	342,40	0,16	187,00	158,02	15,5%
11/03/2023 16:28	342,24	0,16	170,99	167,48	2,1%
11/03/2023 20:58	367,34	0,16	201,94	160,84	20,4%
11/03/2023 21:28	334,05	0,16	198,35	148,41	25,2%
11/03/2023 21:58	340,60	0,16	197,61	154,27	21,9%
11/03/2023 22:28	341,87	0,16	197,21	158,77	19,5%
11/03/2023 22:58	341,53	0,16	198,05	157,35	20,5%
11/03/2023 23:28	342,13	0,16	199,31	160,60	19,4%
12/03/2023 00:58	346,07	0,16	197,85	157,94	20,2%
12/03/2023 01:28	344,77	0,16	198,54	158,04	20,4%
12/03/2023 02:28	347,22	0,16	198,92	164,54	17,3%
12/03/2023 02:58	345,07	0,16	200,99	158,93	20,9%
12/03/2023 03:28	342,95	0,16	203,73	165,26	18,9%
12/03/2023 13:58	338,65	0,16	285,85	174,88	38,8%
12/03/2023 14:28	337,64	0,16	293,29	168,93	42,4%



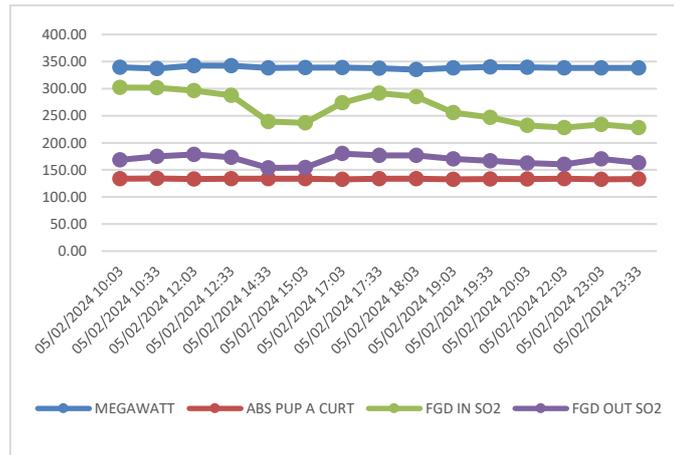
Gambar 4. Grafik emisi SO₂ FGD tidak beroperasi

- **Beban rendah FGD beroperasi**

Pada beban rendah yang berkisar antara 30-50%, yaitu di antara 200 MW hingga 330 MW, pengukuran dilakukan untuk mengetahui pengaruh operasi FGD. Tabel 3 menyajikan data hasil sampling pada beban rendah ketika FGD beroperasi. Gambar 5 memperlihatkan grafik berdasarkan data sampling emisi yang dikumpulkan saat FGD sistem beroperasi pada beban rendah. Data ini penting untuk memahami efisiensi sistem FGD dalam mengurangi emisi SO₂ selama periode operasi tertentu.

Tabel 3 Sampling data beban rendah FGD beroperasi

TIME	MEGAWA TT	ABS PUP A CURT	FGD IN SO ₂	FGD OUT SO ₂	EFEKTIVITAS (%)
05/02/2024 10:03	339,53	133,62	302,09	168,24	44,3%
05/02/2024 10:33	337,24	134,14	302,02	174,88	42,1%
05/02/2024 12:03	342,71	133,09	296,34	178,47	39,8%
05/02/2024 12:33	342,28	133,58	287,60	173,36	39,7%
05/02/2024 14:33	338,56	133,94	239,20	153,60	35,8%
05/02/2024 15:03	338,85	133,82	236,80	154,28	34,8%
05/02/2024 17:03	339,04	132,81	273,78	179,99	34,3%
05/02/2024 17:33	337,96	133,90	291,84	176,74	39,4%
05/02/2024 18:03	335,15	133,96	285,37	176,62	38,1%
05/02/2024 19:03	338,54	132,74	256,05	170,41	33,4%
05/02/2024 19:33	340,36	132,92	247,20	166,79	32,5%
05/02/2024 20:03	339,67	132,93	232,33	162,37	30,1%
05/02/2024 22:03	338,25	133,49	228,30	160,16	29,8%
05/02/2024 23:03	338,47	132,57	233,86	170,44	27,1%
05/02/2024 23:33	338,13	133,27	228,07	163,06	28,5%



Gambar 5. Grafik emisi SO₂ FGD beroperasi

Data pada Tabel 2 dan Tabel 3, serta grafik pada Gambar 4 dan Gambar 5, menunjukkan perbedaan efektivitas pengurangan emisi SO₂ oleh sistem FGD saat beroperasi dan tidak beroperasi pada beban rendah. Ketika FGD tidak beroperasi, penurunan konsentrasi SO₂ dari *inlet* ke *outlet* tidak signifikan, dengan konsentrasi SO₂ di *outlet* berkisar antara 148,40 mg/Nm² hingga 174,88 mg/Nm², menunjukkan kemampuan terbatas dalam mengurangi emisi tanpa FGD yang berfungsi. Sebaliknya, saat FGD beroperasi, terjadi penurunan konsentrasi SO₂ yang lebih signifikan, dengan konsentrasi SO₂ di *outlet* berkisar antara 153,60 mg/Nm² hingga 179,99 mg/Nm². Data ini mengindikasikan efektivitas sistem FGD dalam mengurangi emisi SO₂ secara substansial saat dioperasikan, bahkan pada beban rendah sampai dengan 44%.

3.2. Hasil Pengukuran Emisi SO₂ pada Beban Menengah

Pada pengujian beban menengah akan diambil pada 50 % sampai dengan 80% beban, atau pada saat beban unit pada 400 MW sampai dengan 550 MW.

• **Beban menengah FGD tidak beroperasi**

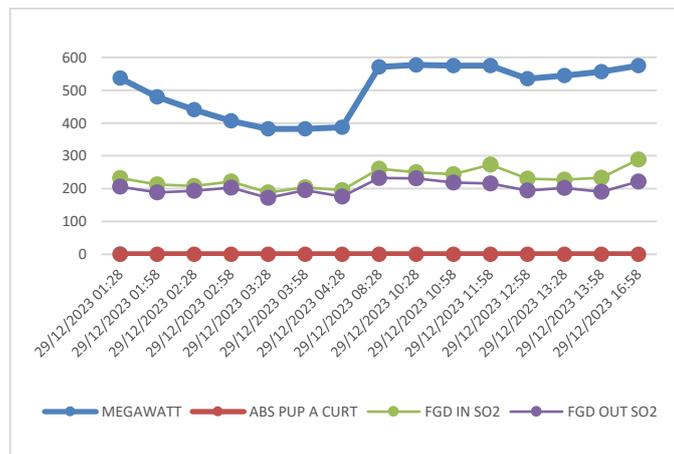
Pengujian beban menengah (400–550 MW) dilakukan saat FGD tidak beroperasi. Tabel 4 menunjukkan data emisi SO₂ pada *inlet* dan *outlet* FGD, sementara Gambar 6 menggambarkan grafik perbandingan beban unit, emisi SO₂, dan SWBP FGD. Data ini menggambarkan dampak ketidakteroperasian FGD terhadap emisi SO₂.

Data dikumpulkan pada tanggal 29 Desember 2023, mulai dari pukul 01:28 hingga 16:58. Pengumpulan data dilakukan saat pembangkit beroperasi antara 400 hingga 550 MW. Selama pengujian ini, sistem FGD tidak beroperasi, untuk mengetahui mempengaruhi emisi SO₂. Pengujian ini penting untuk mengetahui hubungan antara beban kerja pembangkit dan tingkat emisi yang dihasilkan, serta membantu dalam pengembangan strategi pengurangan dampak lingkungan.

Tabel 4 Data emisi beban menengah dengan FGD tidak beroperasi

TIME	MEGAWA TT	ABS PUP A CURT	FGD IN SO ₂	FGD OUT SO ₂	EFEKTIVITAS (%)
29/12/2023 01:28	536,92	0,16	232,54	205,55	11,6%

29/12/2023 01:58	479,73	0,16	212,83	188,63	11,4%
29/12/2023 02:28	440,61	0,16	208,12	193,27	7,1%
29/12/2023 02:58	406,50	0,16	221,19	203,26	8,1%
29/12/2023 03:28	381,96	0,16	188,28	171,83	8,7%
29/12/2023 03:58	382,11	0,16	203,57	195,18	4,1%
29/12/2023 04:28	387,09	0,16	195,07	175,49	10,0%
29/12/2023 08:28	571,30	0,16	260,52	232,59	10,7%
29/12/2023 10:28	577,15	0,16	249,99	231,11	7,6%
29/12/2023 10:58	575,18	0,16	243,72	218,67	10,3%
29/12/2023 11:58	574,67	0,16	273,03	215,70	21,0%
29/12/2023 12:58	534,38	0,16	230,03	193,80	15,7%
29/12/2023 13:28	544,28	0,16	227,40	201,81	11,3%
29/12/2023 13:58	556,43	0,16	232,74	190,52	18,1%
29/12/2023 16:58	574,48	0,16	288,87	221,65	23,3%



Gambar 6. Grafik emisi SO₂ FGD tidak beroperasi

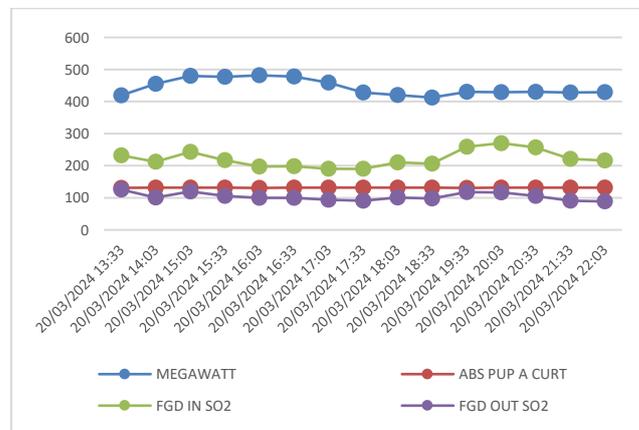
- **Beban menengah FGD beroperasi**

Pada pengujian beban menengah (400–550 MW) dengan FGD beroperasi, Tabel 5 menyajikan data emisi SO₂ pada *inlet* dan *outlet* FGD. Gambar 7 menampilkan grafik perbandingan beban unit, emisi SO₂, dan status peralatan SWBP sebagai *supply* air laut ke *absorber*. Data diambil pada tanggal 20 Maret 2024 mulai dari

dari jam 13:33 WIB sampai dengan 22:00 WIB mengikuti pembebanan dari unit dan PLN.

Tabel 5. Data emisi beban menengah dengan FGD beroperasi

TIME	MEGAWA TT	ABS PUP A CURT	FGD IN SO2	FGD OUT SO2	EFEKTIVITAS (%)
20/03/2024 13:33	419,61	130,82	231,99	125,75	45,8%
20/03/2024 14:03	455,33	131,16	212,60	100,88	52,6%
20/03/2024 15:03	479,61	131,37	243,19	119,95	50,7%
20/03/2024 15:33	476,93	131,39	217,23	105,33	51,5%
20/03/2024 16:03	481,67	130,92	197,26	100,19	49,2%
20/03/2024 16:33	477,81	131,70	197,99	100,19	49,4%
20/03/2024 17:03	459,33	131,32	190,34	93,74	50,7%
20/03/2024 17:33	427,89	131,75	189,98	90,73	52,2%
20/03/2024 18:03	420,40	131,15	209,76	100,61	52,0%
20/03/2024 18:33	412,50	131,23	206,12	98,08	52,4%
20/03/2024 19:33	430,46	130,85	258,52	117,74	54,5%
20/03/2024 20:03	429,55	131,52	270,33	116,95	56,7%
20/03/2024 20:33	430,10	131,17	257,27	105,66	58,9%
20/03/2024 21:33	428,38	131,71	220,76	90,73	58,9%
20/03/2024 22:03	429,62	131,22	216,60	88,67	59,1%



Gambar 7. Grafik emisi SO₂ FGD beroperasi

Pada pengujian beban menengah, yang berkisar antara 50 hingga 80% dari total kapasitas beban, sistem FGD menunjukkan peran yang signifikan dalam mengendalikan emisi SO₂. Data yang ditampilkan pada Tabel 4 dan Gambar 6 mengindikasikan bahwa ketika FGD tidak beroperasi, konsentrasi SO₂ di *outlet* FGD tidak begitu menunjukkan penerunan tetapi masih dibawah batas emisi yaitu 550 mg/Nm², Tabel 5 dan Gambar 7 mengungkapkan bahwa saat FGD beroperasi, emisi SO₂ di *outlet* berkurang drastis, mencerminkan efektivitas sistem FGD dalam menurunkan emisi bahkan saat berada dalam kondisi beban menengah sampai dengan 59.1%.

3.3. Hasil Pengukuran Emisi SO₂ pada Beban Tinggi

Pada pengujian beban menengah akan diambil pada 80% sampai dengan 100% beban, atau pada saat beban unit pada 590 MW sampai dengan 660 MW.

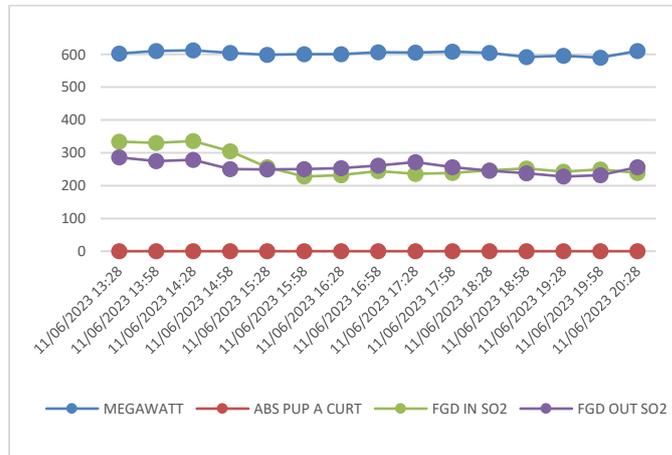
- **Beban tinggi FGD tidak beroperasi**

Pada pengujian beban tinggi (590–660 MW) dengan FGD tidak beroperasi, Tabel 6 dan Gambar 8 menampilkan grafik yang menyajikan data emisi SO₂ pada *inlet* dan *outlet* FGD. Data pengujian diambil pada tanggal 11 Juni 2023 dari histori operasi pada CCR dari jam 13:00 WIB sampai dengan jam 20:00 WIB, didapatkan data pada Tabel 6.

Tabel 6. Data emisi beban tinggi FGD tidak beroperasi

TIME	MEGAWA TT	ABS PUP A CURT	FGD IN SO2	FGD OUT SO2	EFEKTIVITAS (%)
11/06/2023 13:28	602,87	0,16	333,85	286,04	14,3%
11/06/2023 13:58	610,06	0,16	330,31	275,06	16,7%
11/06/2023 14:28	612,33	0,16	335,78	278,78	17,0%
11/06/2023 14:58	604,92	0,16	305,14	250,18	18,0%
11/06/2023 15:28	598,76	0,16	256,07	249,42	2,6%
11/06/2023 15:58	600,99	0,16	227,74	250,18	-9,9%
11/06/2023 16:28	600,56	0,16	231,97	252,93	-9,0%
11/06/2023 16:58	606,38	0,16	244,51	261,25	-6,8%
11/06/2023 17:28	605,92	0,16	235,90	271,47	-15,1%
11/06/2023 17:58	608,52	0,16	238,81	256,06	-7,2%
11/06/2023 18:28	604,16	0,16	246,80	245,15	0,7%
11/06/2023 18:58	591,53	0,16	252,14	237,75	5,7%

11/06/2023 19:28	595,60	0,16	242,98	227,52	6,4%
11/06/2023 19:58	590,02	0,16	249,55	231,44	7,3%
11/06/2023 20:28	610,03	0,16	238,81	256,06	-7,2%



Gambar 8. Grafik emisi SO₂ FGD tidak beroperasi

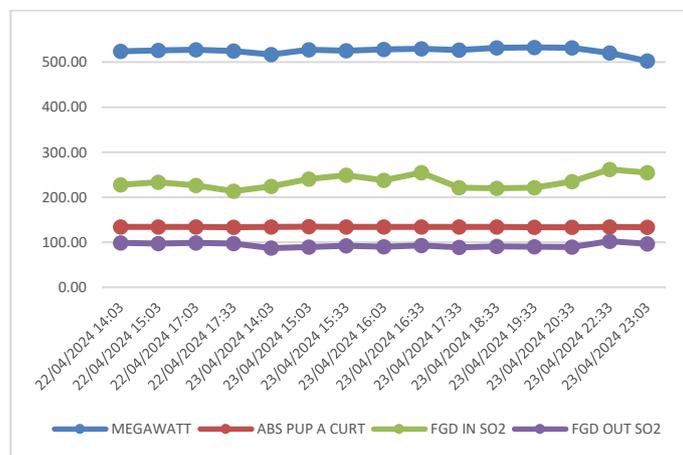
- **Beban tinggi FGD beroperasi**

Pada pengujian beban tinggi (590–660 MW) dengan FGD beroperasi, Tabel 7 menyajikan data rinci mengenai emisi SO₂ pada inlet dan outlet sistem FGD. Gambar 9 mengilustrasikan perbandingan visual antara beban unit, emisi SO₂, dan status suplai air pompa booster FGD. Data ini menggarisbawahi efektivitas FGD dalam menurunkan emisi SO₂, memberikan gambaran jelas tentang pengaruh operasional FGD terhadap kualitas udara saat unit beroperasi pada kapasitas maksimal.

Tabel 7. Data emisi beban tinggi FGD beroperasi

TIME	MEGAWA TT	ABS PUP A CURT	FGD IN SO2	FGD OUT SO2	EFEKTIVIFITS (%)
22/04/2024 14:03	523,57	134,20	227,36	98,68	56,60%
22/04/2024 15:03	525,95	134,30	233,42	97,29	58,32%
22/04/2024 17:03	527,59	134,04	226,02	98,56	56,39%
22/04/2024 17:33	524,52	133,41	213,34	97,29	54,40%
23/04/2024 14:03	516,75	133,80	223,80	86,99	61,13%
23/04/2024 15:03	527,34	134,55	240,65	89,14	62,96%
23/04/2024 15:33	525,23	134,02	248,99	92,61	62,80%

23/04/2024 16:03	528,23	133,99	237,67	89,89	62,18%
23/04/2024 16:33	529,28	134,16	254,61	92,97	63,49%
23/04/2024 17:33	526,43	134,08	221,22	88,52	59,99%
23/04/2024 18:33	531,83	133,72	220,01	90,65	58,80%
23/04/2024 19:33	532,58	133,44	220,99	89,90	59,32%
23/04/2024 20:33	531,27	133,27	234,55	89,20	61,97%
23/04/2024 22:33	520,17	133,85	261,84	102,33	60,92%
23/04/2024 23:03	502,29	133,44	254,63	96,53	62,09%



Gambar 9. Grafik emisi SO₂ FGD beroperasi

Pengujian emisi SO₂ pada beban tinggi dengan FGD beroperasi menunjukkan hasil yang signifikan dalam mengurangi emisi SO₂. Data yang disajikan dalam Tabel 7 dan Gambar 9 menegaskan efektivitas sistem FGD dalam menurunkan konsentrasi SO₂ pada outlet secara signifikan dibandingkan dengan kondisi ketika FGD tidak beroperasi. Ketika FGD beroperasi, konsentrasi SO₂ pada outlet turun secara konsisten hingga mencapai kisaran 86,99 mg/Nm³ hingga 102,33 mg/Nm³, jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondisi ketika FGD tidak beroperasi, di mana konsentrasi SO₂ pada outlet masih berada dalam kisaran 227,52 mg/Nm³ hingga 286,04 mg/Nm³.

Ini menunjukkan bahwa FGD mampu mengurangi emisi SO₂ secara efektif, dengan tingkat efektivitas yang bervariasi antara 54,40% hingga 63,49%. Penurunan ini tidak hanya penting untuk mematuhi batas emisi yang diizinkan tetapi juga untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, operasi FGD merupakan elemen kunci dalam memastikan bahwa pembangkit listrik mematuhi standar lingkungan yang ketat dan memainkan peran penting dalam perlindungan kualitas udara.

4. KESIMPULAN

Studi ini menilai efektivitas sistem FGD di PLTU Cilacap Unit 3 dalam mengurangi emisi SO₂ pada berbagai tingkat beban. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem FGD secara signifikan mengurangi emisi SO₂ pada semua tingkat beban. Pada beban rendah (30-50%), terjadi penurunan emisi SO₂ sebesar 44.3% dengan pengoperasian FGD dibandingkan dengan kondisi tanpa FGD. Sementara itu, pada beban menengah (50-80%), FGD berhasil menurunkan emisi SO₂ sebesar 59.1%. Pada beban tinggi (80-100%), FGD menunjukkan efektivitas tertinggi dengan penurunan emisi SO₂ sebesar 62.8%. Secara keseluruhan, sistem FGD terbukti efektif dalam memenuhi regulasi emisi dan menjaga emisi SO₂ pada tingkat yang aman, memastikan bahwa PLTU Cilacap Unit 3 mematuhi standar lingkungan yang berlaku.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Pahlevi, S. Thamrin, I. Ahmad, and F. B. Nugroho, "Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia," *J. Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 5, no. 2, pp. 50–60, Jul. 2024, doi: 10.14710/jebt.2024.22973.
- [2] Y. Wang, T. Eriksson, and N. Luo, "The health impacts of two policies regulating SO₂ air pollution: Evidence from China," *China Econ. Rev.*, vol. 78, p. 101937, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.chieco.2023.101937.
- [3] "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI NP.15 TAHUN 2019 Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Tenaga Termal.pdf."
- [4] R. K. Srivastava and W. Jozewicz, "Flue Gas Desulfurization: The State of the Art," *J. Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 51, no. 12, pp. 1676–1688, Dec. 2001, doi: 10.1080/10473289.2001.10464387.
- [5] D. Bahrin, "Penyusunan Kriteria Pemilihan Proses Flue Gas Desulfurization PLTU-Batubara," 2015.
- [6] "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 tentang Pengendalian Penecemaran udara.pdf."
- [7] L. Tang *et al.*, "Air pollution emissions from Chinese power plants based on the continuous emission monitoring systems network," *Sci. Data*, vol. 7, no. 1, p. 325, Oct. 2020, doi: 10.1038/s41597-020-00665-1.
- [8] L. Tang, M. Jia, J. Yang, L. Li, X. Bo, and Z. Mi, "Chinese industrial air pollution emissions based on the continuous emission monitoring systems network," *Sci. Data*, vol. 10, no. 1, p. 153, Mar. 2023, doi: 10.1038/s41597-023-02054-w.
- [9] "BOILER OPERATION INSTRUCTION MODEL 130NYM DONGFANG BOILER.pdf."
- [10] M. Cao, "SWFGD Training / Process Part".