

Analysis of the Influence of Meteorological Factors on SO₂ and NO₂ Gas Concentrations from the Boiler Chimney of Sugar Factory

Analisis Pengaruh Faktor Meteorologi Terhadap Konsentrasi Gas SO₂ dan NO₂ dari Cerobong Ketel Pabrik Gula X

Mareta Fifianah¹, Aussie Amalia^{1*}

¹ UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

*surel: aussieamalia.tl@upnjatim.ac.id

ABSTRACT

The process of burning bagasse in a steam boiler produces pollutants in the form of exhaust gas emissions through the chimney, which can pollute air quality and harm health. The aim of this study is to determine the great influence of meteorological factors including exhaust gas temperature, air temperature, and flow speed in 4 areas of the boiler pipe that can affect the load of SO₂ and NO₂ gas pollutants through statistical data analysis. The ANOVA test used in this study was the ANOVA One Way test. The results of the study showed that there was a significant influence of the air temperature factor on SO₂ in Boiler 4 / Cheng Chen with a value of F value 14,553 and a sig value of 0,032, as well as the influence that exists on the exhaust gas temperature factor and air temperature on NO₂ in Stork Boiler 2 with an F value of 15,358 ; 17,889 and a sig value of 0.030 ; 0.024. The results of the analysis can be used as monitoring to evaluate the success rate and operational efficiency of the boiler under the management that has been carried out.

Keywords:

Exhaust Gas Emissions,
Meteorological Factors,
One Way ANOVA Test,

Received: May 21st 2024
Reviewed: May 22nd 2024
Pulished: August 12nd 2024

ABSTRAK

Proses pembakaran ampas tebu pada ketel uap menghasilkan polutan berupa emisi gas buang melalui cerobong yang dapat mencemari kualitas udara dan mengganggu kesehatan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besar pengaruh faktor meteorologi meliputi suhu gas buang, suhu udara, dan kecepatan alir pada 4 area cerobong ketel yang dapat mempengaruhi beban kandungan pencemar emisi gas SO₂ dan NO₂ dengan analisis data statistik. Uji ANOVA yang digunakan pada penelitian ini adalah uji ANOVA One Way. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya signifikan pengaruh faktor suhu udara terhadap SO₂ di Ketel 4 / Cheng Chen dengan nilai F hitung 14,553 dan nilai sig 0,032, serta adanya pengaruh yang terdapat pada faktor suhu gas buang dan suhu udara terhadap NO₂ di Ketel Stork 2 dengan nilai F hitung sebesar 15,358 ; 17,889 dan nilai sig sebesar 0,030 ; 0,024. Berdasarkan hasil pengujian faktor lain hampir secara keseluruhan nilai F dan sig tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada pengaruh suhu gas buang, suhu udara, dan kecepatan alir terhadap gas SO₂ dan NO₂. Hasil analisis dapat digunakan sebagai pemantauan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan dan efektivitas operasional pada cerobong ketel dalam pengelolaan yang telah dilakukan.

Kata Kunci:

Emisi Gas Buang,
Faktor Meteorologi,
Uji ANOVA One Way,

Diterima: 21 Mei 2024
Direview: 22 Mei 2024
Dipublikasi: 12 Agustus 2024



PENDAHULUAN

Ketel uap (*boiler*) merupakan bagian inti dalam proses pengolahan pabrik gula, yang berfungsi memanaskan *steam header* dengan cara mendidihkan air hingga menjadi uap menggunakan bahan bakar ampas tebu (*bagasse*) [1]. Proses penggilingan tebu menghasilkan nira dan menyisakan ampas tebu sebagai residu sisa gilingan [2]. Hasil dari ampas tebu terbagi menjadi 2 jenis, yaitu ampas kasar dan ampas halus. Proses pembakaran pada ketel dapat menggunakan ampas kasar sebagai bahan bakar, dan blower berfungsi untuk menghembuskan hasil ampas halus menuju *bagacillo* [3]. Ketel uap merupakan pembangkit listrik yang menyuplai seluruh kebutuhan daya listrik dalam pabrik. Seluruh daya listrik yang digunakan dalam operasional pabrik dapat melalui ketel uap [4].

Pengeluaran polutan melewati cerobong berupa emisi gas buang pada proses pembakaran boiler. Emisi udara yang dikeluarkan mengandung berupa gas seperti SO_2 dan NO_2 . Bahan pencemar tersebut mudah bereaksi dan menyebar sesuai arah angin yang dapat mempengaruhi kualitas udara juga berbahaya bagi kesehatan [5]. Beberapa sumber pencemar udara menetap pada kegiatan industri pengolahan gula seperti asap pabrik, asap dapur, pembangkit listrik, penggunaan bahan bakar, dan lainnya; sumber pencemar udara tidak menetap seperti operasional mesin pabrik, kendaraan bermotor, dan lainnya; sumber pencemar udara campuran yang berasal dari titik tetap atau titik tidak tetap kawasan industri [6].

Pemantauan kualitas udara sangat penting dilakukan untuk menjaga dan memelihara, supaya kualitas udara tidak tercemar oleh gas yang berbahaya, serta tidak mengganggu kesehatan manusia maupun lingkungan. Senyawa kimia yang tersebar di atmosfer dapat menyebabkan pencemaran udara, jika mengandung emisi yang berbahaya terhadap ekosistem lingkungan maupun makhluk hidup [7]. Komposisi udara normal dapat terganggu akibat pencemaran udara. Kandungan bahan dan zat asing yang tersebar di udara dengan jumlah dan waktu tertentu dapat mempengaruhi kondisi lingkungan dan makhluk hidup lainnya [8].

Analisis data untuk keperluan faktor reaksi pada dispersi polutan terdiri dari berbagai macam faktor meteorologi gas buang cerobong ketel yang dapat mempengaruhi beban kandungan pencemaran udara. Hubungan antara meteorologi dan polutan udara tertentu menjadi bagian penting dari penelitian meliputi peristiwa curah hujan, karakteristik aliran yang dominan, dan elemen cuaca seperti suhu udara, kelembaban, dan tekanan telah dikaitkan dengan pembentukan, transportasi, difusi, dan pengendapan polutan di udara [9]. Perumusan pengendalian pencemaran udara melalui pemodelan matematika dan statistik dapat bermanfaat untuk melakukan pemantauan peningkatan kualitas udara, serta dapat dimanfaatkan sebagai pengembangan oleh *stakeholder* [10].

Salah satu tindakan dan strategi yang dapat dilakukan untuk mengatasi atau mengendalikan tingkat pencemaran udara dengan melakukan pengelolaan kualitas udara. Pemantauan kualitas udara dapat digunakan untuk melakukan evaluasi efektivitas pengelolaan serta mengetahui tingkat keberhasilan hasil pengelolaan. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui seberapa besar pengaruh faktor meteorologi pada 4 cerobong boiler terhadap emisi gas SO_2 dan NO_2 yang dapat diketahui melalui uji analisis statistika. Besar pengaruh hubungan faktor meteorologi terhadap konsentrasi gas SO_2 dan NO_2 yang dilihat dari nilai F dan Sig dilakukan melalui uji *Analysis of Variance* (ANOVA).

METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada Stasiun Ketel Pabrik Gula X, Kecamatan Diwek. Pada [Tabel 1](#), menunjukkan koordinat letak titik pantau, serta titik lokasi penelitian dapat dilihat [Gambar 1](#).

Tabel 1. Titik Lokasi Pemantauan Pengujian Kualitas Udara Ambien

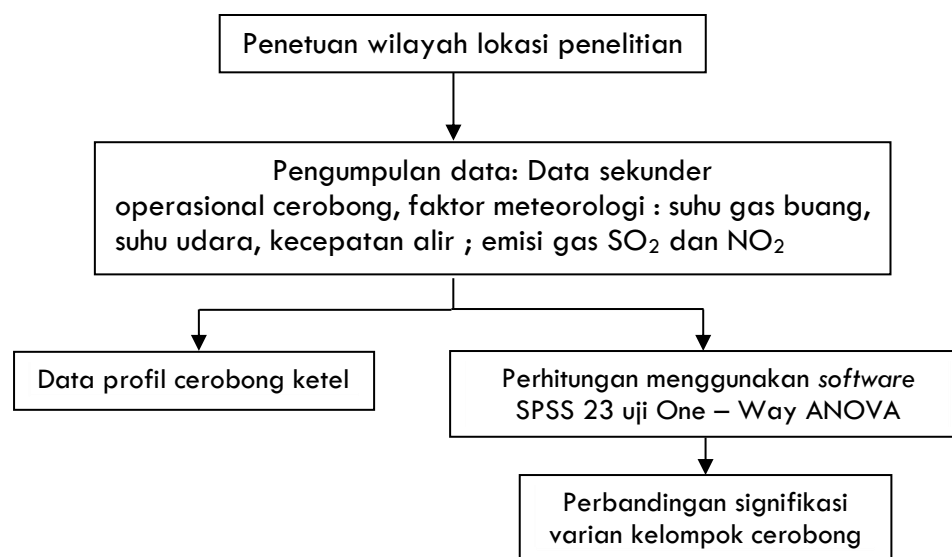
No.	Titik Pemantauan	Koordinat
1.	Ketel Stork 1	S: -7.542083 E: 112.235638
2.	Ketel Stork 2	S: -7.54208 E: 112.2356
3.	Ketel Stork 3	S: -7.54172 E: 112.23552
4.	Ketel Cheng Chen	S: -7.542194 E: 112.235305



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian
Sumber: Google Earth (2024)

Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang dilakukan dengan mencatat laporan hasil uji emisi sumber tidak bergerak dari 4 unit cerobong ketel. Data sekunder pada penelitian ini berupa data operasional cerobong ketel, data meteorologi seperti suhu gas buang, suhu udara, kecepatan alir, serta emisi gas SO_2 dan NO_2 . Analisis data faktor meteorologi dan beban emisi dalam penelitian ini menggunakan *software* SPSS 23 melalui uji ANOVA satu arah (*One Way ANOVA*). Selanjutnya yaitu analisis komparatif dengan cara membandingkan hasil nilai F dan Sig. pada kolom tabel yang digunakan untuk nilai signifikansi varian dari seluruh kelompok yang berbeda. Pelaksanaan penelitian ini dengan diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Digram Alir Tahap Penelitian
Sumber: Penulis (2024)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Profil Cerobong Ketel

Pabrik Gula X memiliki 4 unit cerobong sebagai jalur pengeluaran limbah gas buang. Menurut [11] hasil gas buang pembakaran bahan bakar fosil dan industri dari kegiatan manusia menyebabkan zat pencemaran udara yang dikenal di dunia. Emisi gas Sulfur Dioksida (SO_2) dan

Nitrogen Dioksida (NO₂) mempengaruhi kualitas udara yang dihasilkan pada proses pengolahan gula pada stasiun ketel. Kondisi meteorologi tertentu dapat meningkatkan konsentrasi polutan [12]. Perbedaan faktor kualitas udara disebabkan oleh kualitas dan sistem dari cerobong ketel Tabel 2.

Tabel 2. Operasional Cerobong Ketel

Sistem Operasional Cerobong	
Sumber Lokasi	Sistem Cerobong
Ketel Stork 1	Wet Scrubber
Ketel Stork 2	Wet Scrubber
Ketel Stork 3	Wet Scrubber
Ketel 4 / Cheng-Chen	Multi Cyclone

Sumber: Penulis (2024)

Analisis Uji ANOVA Terhadap Faktor Hubungan Kualitas Udara

Uji Anova dilakukan melalui pengelompokan dan penilaian data inventori tahap awal untuk mengetahui nilai statistika pengaruh faktor meteorologi terhadap kandungan pencemaran SO₂ dan NO₂ pada setiap cerobong ketel. Pengujian dapat digunakan untuk menunjukkan perbedaan antara variabel kandungan partikulat pencemaran udara.

Pengujian pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat secara simultan dilakukan melalui uji F [13]. Menurut [14] tingkatan nilai F yang digunakan adalah sebesar 0.5 atau 5%, jika nilai signifikan $F < 0.05$ maka dapat diartikan bahwa variabel independen secara simultan mempengaruhi variabel dependen ataupun sebaliknya. Dalam menganalisis hasil uji F pada tabel ANOVA nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka variabel bebas berpengaruh terhadap variabel terikat, namun apabila $F_{hitung} < F_{tabel}$ maka dinyatakan variabel bebas tidak berpengaruh pada variabel terikat.

Selanjutnya nilai signifikan dari hasil ANOVA *single factor* dengan $\alpha = 0.05$ dilihat untuk menentukan apakah perbedaan antar kelompok sampel signifikan atau tidak. Sedangkan nilai signifikansi untuk jumlah industri lainnya $> 0,05$ [15]. Pada kolom sig. $> 0,05$ maka H_0 diterima (H_a ditolak) maka data diatas dikatakan tidak homogen, begitupun sebaliknya jika hasil sig. $< 0,05$ maka H_a ditolak (H_0 ditolak) maka data diatas dikatakan homogen. Variansi dan distribusi data juga dilihat untuk melihat karakteristik persepsi dari tiap-tiap kelompok meteorologi terhadap emisi gas SO₂ dan NO₂ cerobong ketel.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [16] pada pembangkit listrik di PT. Indonesia Power Bali PGU Pesanggaran menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikansi diantara sebaran emisi dengan nilai sig pada parameter SO₂ sebesar 0,450 dan NO₂ sebesar 0,833. Penelitian ini memiliki kesamaan dengan menggunakan analisis data faktor meteorologi yang mempengaruhi emisi gas cerobong, serta memiliki perbedaan yaitu pada penelitian sebelumnya hanya menggunakan data pengamatan 5 titik sampel dari 12 data cerobong, sedangkan pada penelitian ini fokus data keseluruhan hasil cerobong emisi gas buang. Dengan perhitungan uji yang diperoleh pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hubungan Faktor Meteorologi Terhadap Gas Sulfur Dioksida (SO₂)

Source	Cerobong Ketel	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Suhu Gas Buang – SO ₂	Ketel Stork 1	32.490	1	32.490	.891	.415
		109.338	3	36.446		
	Ketel Stork 2	6.725	1	6.725	.591	.498
		34.150	3	11.383		
	Ketel Stork 3	2.328	1	2.328	.267	.641
	26.181	3	8.727			
Suhu Udara – SO ₂	Ketel 4 / Cheng Chen	3.038	1	3.038	9.418	.055
		.968	3	.323		
	Ketel Stork 1	12.929	1	12.929	.301	.621
		128.898	3	42.966		
	Ketel Stork 2	6.031	1	6.031	.519	.523
	34.844	3	11.615			
	Ketel Stork 3	7.769	1	7.769	1.124	.367

Source	Cerobong Ketel	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
		20.740	3	6.913		
	Ketel 4 / Cheng Chen	3.321	1	3.321	14.553	.032
		.685	3	.228		
Kecepatan Alir – SO ₂	Ketel Stork 1	11.742	1	11.742	.271	.639
		130.085	3	43.362		
	Ketel Stork 2	10.311	1	10.311	1.012	.389
		30.565	3	10.188		
	Ketel Stork 3	2.001	1	2.001	.226	.667
		26.509	3	8.836		
	Ketel 4 / Cheng Chen	.073	1	.073	.005	.828
		3.932	3	1.331		

Sumber : Hasil Perhitungan One Way ANOVA (2024)

Berdasarkan Tabel 3 diatas diperoleh hasil nilai F tabel ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) yaitu F tabel = 10,1. Faktor yang paling berpengaruh jika dilihat dari nilai F dan sig pada 4 cerobong ketel diketahui adanya perbedaan secara signifikan pada faktor suhu udara terhadap SO₂ di Ketel 4 / Cheng Chen. Artinya kekuatan korelasi antara variabel suhu udara dengan konsentrasi gas SO₂ di udara sekitar memiliki hubungan yang kuat, sehingga dapat didefinisikan semakin besar suhu udara maka konsentrasi gas SO₂ di udara juga semakin naik.

Untuk faktor lain secara keseluruhan nilai F dan sig diketahui tidak ada perbedaan yang signifikan antara hubungan suhu gas buang, suhu udara, dan kecepatan alir terhadap gas SO₂. Hal ini didasarkan dengan hasil uji yang relatif sama karena tidak terdapat dampak faktor meteorologi terhadap signifikan kenaikan gas SO₂. Hal ini karena penurunan faktor meteorologi yang mengurangi dispersi partikel konsentrasi gas SO₂.

Tabel 4. Hubungan Faktor Meteorologi Terhadap Gas Nitrogen Dioksida (NO₂)

Source	Cerobong Ketel	Sum of Square	df	Mean Square	F	Sig.
Suhu Gas Buang – NO ₂	Ketel Stork 1	402.656	1	402.656	2.284	.228
		528.792	3	176.264		
	Ketel Stork 2	736.181	1	736.181	15.358	.030
		143.799	3	47.933		
	Ketel Stork 3	869.720	1	869.720	8.544	.061
	305.368	3	101.789			
Suhu Udara – NO ₂	Ketel 4 / Cheng Chen	773.402	1	773.402	7.180	.075
		323.170	3	107.723		
	Ketel Stork 1	15.008	1	15.008	.049	.839
		916.440	3	305.480		
	Ketel Stork 2	753.601	1	753.601	17.889	.024
	126.379	3	42.126			
Kecepatan Alir – NO ₂	Ketel Stork 3	857.957	1	857.957	8.116	.065
		317.131	3	105.710		
	Ketel 4 / Cheng Chen	735.780	1	735.780	6.118	0.90
		360.792	3	120.264		
	Ketel Stork 1	169.509	1	169.509	.667	.474
	761.939	3	253.980			
Kecepatan Alir – NO ₂	Ketel Stork 2	81.551	1	81.551	.306	.618
		798.429	3	266.143		
	Ketel Stork 3	86.150	1	86.150	.237	.660
		1088.938	3	362.979		
	Ketel 4 / Cheng Chen	191.042	1	191.002	.633	.488
	905.530	3	301.843			

Sumber : Hasil Perhitungan One Way ANOVA (2024)

Pada nilai F tabel ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) yaitu F tabel = 10,1. Hasil perhitungan pada Tabel 4 menunjukkan nilai F dan sig pada 4 cerobong ketel diketahui nilai pengaruh terdapat pada faktor suhu gas buang dan suhu udara terhadap NO₂ di Ketel Stork 2. Sehingga kekuatan korelasi suhu gas buang dan suhu udara dengan konsentrasi gas NO₂ disekitar

memiliki hubungan yang kuat, maka dapat didefinisikan semakin naik suhu gas buang maka konsentrasi gas NO₂ di udara juga semakin besar. Begitupun pengaruh pada besar nilai suhu udara yang menyebabkan konsentrasi gas NO₂ semakin naik.

Dalam faktor lain hampir keseluruhan nilai F dan sig maka dapat diketahui tidak ada perbedaan yang signifikan antara suhu gas buang, suhu udara, dan kecepatan alir terhadap gas NO₂. Hal ini didasarkan dengan hasil uji yang relatif sama karena tidak terdapat dampak faktor meteorologi terhadap signifikan kenaikan NO₂. Hal ini karena penurunan suhu gas buang mengurangi dispersi partikel yang meningkatkan konsentrasi gas NO₂.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji ANOVA 4 area cerobong ketel pada faktor pengaruh suhu gas buang, suhu udara, kecepatan alir terhadap SO₂ dan NO₂ secara keseluruhan menunjukkan tidak adanya perbedaan signifikan karena nilai F hitung < F tabel dan nilai sig. > 0,05 dengan demikian dapat disimpulkan *H₀* diterima (*H_a* ditolak) maka data dapat dikatakan tidak homogen. Namun adanya perbedaan secara signifikan antara suhu udara terhadap SO₂ di Ketel 4 / Cheng Chen dengan nilai F hitung sebesar 14,553 dan nilai sig sebesar 0,032, serta nilai pengaruh pada faktor suhu gas buang dan suhu udara terhadap NO₂ di Ketel Stork 2 dengan nilai F hitung sebesar 15,358 ; 17,889 dan nilai sig sebesar 0,030 ; 0,024.

Adanya nilai perbedaan kandungan emisi gas SO₂ dan NO₂ dengan sistem berbeda juga menjadi salah satu reaksi dalam pembeda skala nilai emisi limbah gas buang bagi pencemaran udara. Sehingga perbedaan faktor kualitas udara dapat disebabkan oleh kualitas dan sistem dari cerobong. Solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini dengan melakukan kerjasama pada bagian instalasi untuk pemeriksaan dan perawatan intensif pada cerobong ketel.

REFERENSI

- [1] O. A. Rosyid, W. H. Pudjo, and F. Diding, "Studi Penghematan Energi Pada Unit Ketel Uap Di Pabrik Gula," *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, vol. 10, no. 3, pp. 171–176, 2008. Link: <https://www.neliti.com/id/publications/132858/studi-penghematan-energi-pada-unit-ketel-uap-di-pabrik-gula#cite>
- [2] A. Widjaja, Soeprijanto, "Fermentasi Hidrolisat Enzimatis Bagasse Tebu Menjadi Hidrogen," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2012. Link: <https://www.semanticscholar.org/paper/FERMENTASI-HIDROLISAT-ENZIMATIK-BAGASSE-TEBU-Widjaja-Soeprijanto/b11589c7b286e285da9640144cf1b739a126261f#citing-papers>
- [3] M.G Samosir, "Penilaian Kualitas Kinerja Pabrik Gula Madukismo dengan Metode Statistical Quality Control," *Tesis, Program Studi Magister Manajemen Agribisnis, Program Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta*, 2006.
- [4] Rosmeika, L. Sutiarso, Bandul, Suratmo, "Pengkajian Daur Hidup Ampas Tebu Di Pabrik Gula Madukismo, Yogyakarta Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA)," *Enjiniring Pertanian*, vol. VIII, no. 2, pp. 115–126, 2009. Link: <https://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/9572>
- [5] Sugiarto P. Herawati, A. Riyanti, "Analisis Konsentrasi SO₂, NO₂ dan Partikulat pada Sumber Emisi Tidak Bergerak (Cerobong) Berbahan Bakar Batu Bara dan Cangkang (Studi Kasus di Kabupaten Muaro Jambi)," *Jurnal Daur Lingkungan*, vol. 2, no. 1. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.33087/daurling.v2i1.20>
- [6] B. S. Hadi, "Pemantauan Kualitas Udara Ambien PM₁₀, dan Risiko Kesehatan Terhadap Masyarakat di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta," 2021. Link: <https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/30914>
- [7] Miller, G.T. & Spoolman, S.E, *Living in the Environment (16th Edition)*. California: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009.
- [8] Wardhana, W. A, *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Yogyakarta: Andi Offset. Hal 19, 71-169, 2001.

- [9] Mather, J.R., *Meteorologi dan Polusi Udara di Lembah Delaware*. Publikasi di *Klimatologi*. 21:1-136, 1968.
- [10] D. V. Vallero, *Foundamental of Air Pollution*. 1967.
- [11] Sugiarti, "Gas Pencemar Udara dan Pengaruhnya Bagi Kesehatan Manusia," *Jurnal Chemical*, vol. 10, no. 1, pp. 50–58, 2009. DOI: <https://doi.org/10.35580/chemica.v10i1.399>
- [12] Schreiber, K.V, *Pendekatan Klimatologi Sinoptik untuk Penilaian Visibilitas dan Lokasi Sumber Pencemar, Kawasan Taman Nasional Grand Canyon*. Disertasi Doktorat, Universitas Delaware, 1996.
- [13] R. Pardede and R. Manurung, *Analisis Jalur (Path Analysis) : Teori Dan Aplikasi Dalam Riset Bisnis*, Cet. 1. Jakarta: Rineka Cipta, 2014.
- [14] G. Imam, "Aplikasi analisis multivariate dengan program IBM SPSS 19," Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, vol. 68, 2011.
- [15] Sugiono, *Metode Penelitian Pendidikan (Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D)*; Alfabeta. Bandung, 2011.
- [16] I. W. G. Sutasoma, I. W. Nuarsa, and I. M. S. Wijana, "Analisis Dispersi Emisi Cerobong Pembangkit Listrik Di Pt. Indonesia Power Bali Pgu Pesanggaran," *ECOTROPHIC : Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*, vol. 17, no. 1, p. 81, 2023. Link: https://www.researchgate.net/publication/371088005_ANALISIS_DISPERSI_EMISI_CEROBONG_PEMBANGKIT_LISTRIK_DI_PT_INDONESIA_POWER_BALI_PGU_PESANGGARAN