

### Analisis Kualitas Udara Goa Seribu Banuarea

Istas Pratomo Manalu<sup>1,a)</sup>, Gerry Italiano Wowiling<sup>1</sup>, Sari Muthia Silalahi<sup>1</sup>,  
Marojahan Mula Sigiro<sup>1</sup>, Eka Stephani Sinambela<sup>1</sup>, Andriyono Manalu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Computer Technology, Vocational Faculty, Institut Teknologi Del Toba, 22381, Indonesia

<sup>2</sup>Department of Physics Education, Faculty of Teacher Training and Education, Universitas HKBP Nommensen Pematangsiantar, Pematangsiantar, 21132, Indonesia

E-mail: <sup>a)</sup> istaspratomo8@gmail.com

Received: 13 Juni 2023

Revision: 26 Juni 2023

Accepted: 14 Juli 2023

**Abstrak:** Peningkatan perekonomian daerah sangat didukung oleh berbagai sektor, salah satunya adalah objek wisata. Sehingga para pemerintah daerah sangat memperhatikan potensi wisata yang ada di daerah dan memperkenalkannya kepada masyarakat luas. Salah satu objek wisata yang baru diperkenalkan adalah Goa Seribu yang terletak di Desa Banuarea, Kecamatan Pakkat, Humbang Hasundutan. Sejak diresmikan pada tahun 2020, objek wisata ini selalu dikunjungi oleh masyarakat yang menyukai destinasi wisata Goa, tanpa memperhatikan kondisi udara di dalam goa. Kondisi goa yang hanya memiliki sedikit mulut goa membuat pergerakan udara yang sangat minim. Begitu juga dengan adanya sungai didalam goa serta tetesan air dari stalaktit meningkatkan kelembapan udara di dalam goa. Selain itu, banyaknya kelelawar yang juga membuat udara dalam goa tidak begitu segar. Oleh sebab itu, melalui penelitian kualitas udara di dalam Goa Seribu dapat mengukur kadar PM10, PM 2,5, Karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan Karbon Monoksida (CO). Pengukuran akan dilakukan setiap jarak 5 meter hingga kedalaman 100 meter. Waktu pengukuran untuk setiap titik dilakukan selama 5 menit. Data yang diperoleh akan ditampilkan dalam bentuk grafik untuk melihat distribusi kualitas udara di setiap titik. Sehingga diharapkan, melalui penelitian ini, memberikan acuan batas aman kunjungan goa bagi para wisatawan, serta menjadi acuan himbauan bagi para regu pendamping wisatawan serta pemerintah daerah.

**Kata Kunci:** PM10, PM2,5, Karbondioksida, Karbonmonoksida, Goa.

**Abstract:** The increase in the regional economy is strongly supported by various sectors, including the tourism sector. This makes the local government pay attention to the tourism potential that exists in the area and introduce it to the wider community. One of the newly introduced tourist objects is the Seribu Cave which is located in Banuarea Village, Pakkat District, Humbang Hasundutan. Since it was inaugurated in 2020, this place has always been visited by people who like Gua's tourist destinations, regardless of the air condition inside the cave. The condition of the cave which has only a few cavities causes very minimal air movement. Likewise, the presence of a river in the cave and water droplets from stalactites increase the humidity in the cave. Apart from that, the bat nests also make the air in the cave not so fresh. Therefore, through air quality research in Seribu Caves it is possible to measure levels of PM 10, PM 2.5, carbon dioxide and carbon monoxide. Measurements are made every 5 meters to a depth of 100 meters. The measurement duration for each point is 5 minutes. The data obtained is displayed in graphical form to see the distribution of air quality at each point. The results showed that the IPSU value of PM 10 was 39, PM 2.5 had a value of 81, CO had a value of 38 and CO<sub>2</sub> had a value of 786 ppm. These results show that none of these parameters exceeds the threshold based on the Regulation of the Minister of Environment and Forestry of the Republic of Indonesia Number P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 concerning Air Pollutant Standard Index.

**Keywords:** PM10, PM2,5, Karbondioksida, Karbonmonoksida, Gua.

### PENDAHULUAN

Sumatera Utara memiliki banyak objek wisata yang sudah mendunia salah satunya adalah Danau Toba. Daerah-daerah lainnya yang ada di Sumatera Utara juga memiliki objek wisata yang cukup menarik, seperti Gua

Seribu, yang terletak di lereng Dolok Pinapan (Bukit Pinapan), Desa Banuarea, Kecamatan Pakkat, Kabupaten Humbang Hasundutan (Humbahas) yang terletak sekitar 45 Km dari Doloksanggul.

Objek wisata ini tergolong objek wisata yang masih baru diperkenalkan oleh pemerintah daerah hingga nasional. Wakil Bupati Humbang Hasundutan Oloan P. Nababan, SH, MH menerima kunjungan dari Badan Pelaksana Otorita Danau Toba (BPODT) dalam rangka rencana pengembangan Goa Seribu Humbang Hasundutan. Kujungan ini dalam memenuhi permintaan Pemerintah Kabupaten Humbang Hasundutan untuk mengembangkan Destinasi Goa Seribu di Humbahas kepada Menparekraf RI.

Masyarakat dan pemerintah percaya bahwa Potensi wisata alam Goa Seribu, memang akan membawa dampak besar bagi masyarakat Kabupaten Humbahas khususnya Desa Banuarea baik itu pada sektor ekonomi ataupun sosial. Goa Seribu memiliki banyak Goa baik itu yang sudah dieksplorasi masyarakat sekitar dan yang belum sama sekali sehingga disebut sebagai Goa Seribu. Di dalam Goa terdapat ukiran stalaktit dan stalagmit yang menambah keindahan Goa. Sebelum mencapai lorong masuk Goa, terdapat objek lain seperti air terjun yang akan menambah keindahan objek wisata ini.



**Gambar 1.** Ruang Goa Seribu Dipenuhi Oleh Stalaktit

Sejak diresmikan pada tahun 2020 oleh Plt. Bupati Humbang Hasundutan, Saut Parlindungan Simamora, Goa Seribu telah banyak dikunjungi oleh wisatawan daerah atau luar daerah, yang menyebabkan semakin banyak promosi yang diberikan kepada masyarakat luas. Masyarakat luas yang ingin mengunjungi Goa Seribu seharusnya memperoleh informasi mengenai kondisi yang ada di dalam Goa. Seperti kualitas udara, pencahayaan, akses menuju lokasi, jaringan internet, kualitas air sungai dalam Goa, akses masuk lorong dan keluar dan aturan-aturan lain yang ditetapkan oleh pemerintah setempat. Terkhusus untuk kualitas udara dalam Goa, sejauh ini belum diketahui mengenai konsentrasi CO, CO<sub>2</sub>, PM10, PM2,5 untuk mengetahui partikel yang terkandung di dalam udara. Oleh sebab itu, tim peneliti akan melakukan studi lapangan untuk memperoleh kualitas udara di dalam Goa. Sehingga bisa menjadi masukan kepada wisatawan agar bisa mempersiapkan hal-hal yang diperlukan sebelum memasuki Goa.

## KAJIAN PUSTAKA

### A. Wisata Goa

Goa adalah ruang bawah tanah alami di antara bebatuan yang terbentang sedemikian rupa sehingga memungkinkan masuknya manusia. Mereka terbentuk selama ribuan tahun dan memiliki kekayaan visual yang unik. Oleh karena itu, mereka sangat penting sebagai tempat rekreasi dan kegiatan pariwisata [1], [2]. Goa juga termasuk salah satu tempat wisata yang berkelanjutan, sehingga sangat penting dipertahankan untuk mengembangkan satu daerah di masa sekarang hingga yang akan datang. Selain itu, dengan adanya wisata goa akan menunjukkan karakter geografis suatu daerah [3].

### B. Penurunan CO<sub>2</sub> di Dalam Goa

Penurunan konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam Goa sangat jarang terjadi apabila tidak memiliki celah /ventilasi dari berbagai dinding Goa. Dengan banyaknya ventilasi Goa, siklus karbon yang melalui goa dianggap menjadi mekanisme utama penghilangan CO<sub>2</sub> dari goa [4]. Terdapat berbagai mekanisme penghilangan CO<sub>2</sub> yang dominan meliputi aliran udara yang digerakkan oleh suhu dan aliran udara yang digerakkan oleh angin. Namun ketinggian mulut Goa sangat mempengaruhi aliran CO<sub>2</sub> serta letak geometri dan volume goa. Sebagian besar suhu di dalam Goa cenderung stabil walaupun suhu di luar fluktuatif sepanjang tahun. Pembalikan musiman udara goa terjadi ketika suhu permukaan menurun di bawah suhu goa, menghasilkan gradien kepadatan yang

tidak stabil. Hal ini disebabkan adanya perbedaan gradien pintu masuk goa serta arah angin yang dominan mempengaruhi pertukaran gas goa-troposfer.

### C. Sumber CO<sub>2</sub> di dalam Goa

Sumber gas CO<sub>2</sub> yang paling banyak di udara goa berasal dari sumber geologis (magmatik/metamorfik), dekomposisi bahan organik di dalam goa, respirasi tanah di atas Goa, respirasi hewan seperti kelelawar, dan gas dari air tanah yang kaya CO<sub>2</sub>. Penyebab lainnya adalah wisatawan dapat meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub>. Di banyak goa, sumber dominan CO<sub>2</sub> adalah udara atmosfer dan respirasi tanah. CO<sub>2</sub> dari tanah dapat diangkut ke dalam goa sebagai gas atau terlarut dalam air rembesan, menyimpulkan berdasarkan variasi spasial konsentrasi CO<sub>2</sub> bahwa CO<sub>2</sub> yang dihasilkan di tanah memasuki goa-goa melalui rembesan air dan retakan yang ada pada dinding Goa [5]–[7].

### D. Particulate Matter 10 µm (PM10) dan 2,5 µm (PM 2,5)

Particulate Matter 10 µm merupakan partikel yang sangat kecil berupa padat dan cair. Disamping itu ada pula yang berinti padat dan dikelilingi oleh cairan. Partikulat ini terdiri dari ion organik, senyawa logam, elemen karbon, senyawa organik dan senyawa lainnya. Beberapa partikulat tersebut bersifat higroskopis dan berisi partikulat yang terikat air. Partikulat organik terutama yang berbentuk kompleks, terdiri dari ribuan senyawa organik. Partikulat organik dibagi kedalam dua jenis yaitu partikulat primer dan sekunder. Partikel primer diemisikan langsung dari sumbernya, sedangkan partikulat sekunder terbentuk dari reaksi kimia dalam atmosfer [8], [9]. PM10 secara alami berasal dari tanah, bakteri, virus, jamur, ragi, serbuk sari serta partikulat garam dan evaporasi air laut [10]–[13]. Sedangkan dari aktivitas manusia, partikulat dihasilkan dari penggunaan kendaraan bermotor, hasil pembakaran, proses industri dan tenaga listrik.

Menurut Crawford (1980) partikel di udara secara umum dapat dibagi kedalam dua bagian utama, yaituyaitu partikel halus (Fine partikel) yang memiliki ukuran lebih kecil dari 2,5 µm, sedangkan partikel kasar (Coarse partikel) berukuran lebih besar dari 2,5 µm [14]. Partikulate matter 2,5 (PM 2,5) adalah partikel dengan diameter aerodinamik lebih kecil dari 2,5 µm. Unsur partikulat ini dapat mempengaruhi kesehatan manusia sebagai reseptor terutama menyebabkan gangguan pada sistem respirasi.

Ada tiga cara masuknya bahan polutan seperti PM10 dari udara ke tubuh manusia yaitu melalui inhalasi, ingestidan penetrasi kulit [15], [16]. Inhalasi bahan polutan udara ke paru-paru dapat menyebabkan gangguan pada paru-paru dan saluran nafas. Beberapa studi epidemiologi menunjukkan keterkaitan PM10 dan khususnya PM2,5 dengan beberapa permasalahan kesehatan. Berikut ini merupakan tabel Indeks Standar Pencemaran Udara (ISPU) yang digunakan sebagai acuan untuk melihat dampak kandungan udara kepada kesehatan manusia.

**Tabel 1.** Batas Indeks Standar Pencemaran Udara dalam Satuan SI [17], [18]

Indeks Standar Pencemaran Udara	PM10 24 Jam	PM 2,5 24 Jam	CO 8 Jam
50	50	15,5	4000
100	150	55,4	8000
200	350	150,4	15000
300	420	250,4	30000
400	500	500	45000

Tabel 1 memperlihatkan batas ISPU (tanpa satuan) yang akan menentukan kualitas udara dengan berbagai kategori, kategori Baik berada pada range 1-50 menandakan mutu udara sangat baik, kategori sedang 51-100 menandakan mutu udara masih bisa diterima pada kesehatan, kategori tidak sehat berada pada rentang 101-200 menandakan tingkat mutu udara yang merugikan kesehatan, kategori sangat tidak sehat berada pada rentang 201-300 dapat memberikan resiko kesehatan pada sejumlah segmen populasi yang terpapar, dan kategori berbahaya melebihi 301, yang dapat memberikan kerugian kesehatan secara serius.

### E. Studi Literatur

Pada penelitian yang berjudul INDOOR AIR QUALITY: THE SAMPLES OF SAFRANBOLU BULAK MENCILIS CAVE pada tahun 2017 [1], adalah penelitian yang dilakukan pada Goa untuk menentukan kualitas udara berupa CO<sub>2</sub> dan partikel didalamnya.

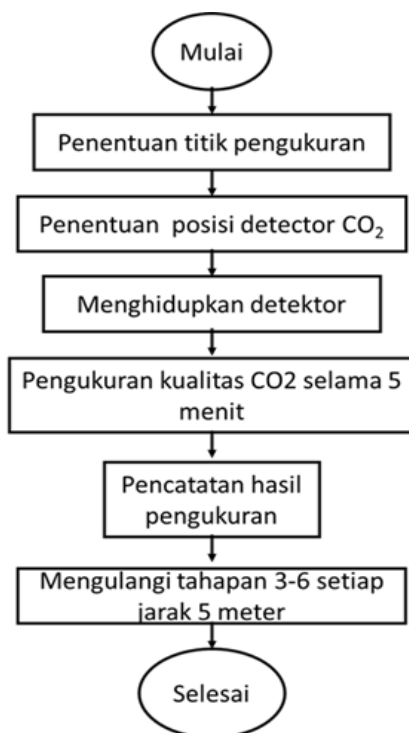
Penulis mengatakan bahwa mengunjungi goa dapat menyebabkan beberapa masalah kesehatan yang serius. Misalnya, konsentrasi gas berbahaya, termasuk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dapat melebihi tingkat kritis selama kunjungan sekelompok wisatawan. Pengukuran dilakukan dengan interval jarak 25-meter yang menggunakan pendeteksi portable. Penelitian menyimpulkan bahwa jumlah CO<sub>2</sub> meningkat pesat: dari 50 meter di dalam pintu masuk goa itu 1.200 ppm, dan meningkat menjadi 2500 ppm pada kedalaman 150 meter. Hasil ini menunjukkan bahwa ketika kunjungan wisatawan terjadi, kualitas udara dalam ruangan dapat berubah dan

beberapa masalah kesehatan mungkin timbul, terutama dari pengaruh peningkatan jumlah CO<sub>2</sub>. Hal ini dapat menyebabkan sakit kepala, pusing, iritasi tenggorokan dan hidung, bersin, dan batuk.

Penelitian berikutnya yaitu A Study on the Changes of Air Quality the Baekryong Cave in Pyeonchang (Natural Monument Number 260) [19]. Peneliti memilih Goa ini, karena objek ini masih baru dibuka untuk kunjungan umum. Penelitian ini berfokus pada elemen utama yang mempengaruhi kualitas udara, seperti suhu, kelembaban, dan jumlah karbon dioksida, yang dipantau sebelum dan sesudah dilihat publik. Metode pengukuran suhu dan kelembaban yang digunakan adalah pengukur kelembaban suhu otomatis (RH/TEMP DATA LOGGER EL-USB-2) dipasang 1m di atas tanah. Sedangkan Jumlah karbon dioksida diukur dengan alat terpisah yaitu dengan alat ukur portabel (IAQ-CALC CO/CO<sub>2</sub> 7525 AS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu goa, kelembaban relatif, dan jumlah karbon dioksida dipengaruhi oleh pengunjung dan musim. Suhu udara dipengaruhi oleh lingkungan sekitar pintu masuk saja, sedangkan semakin jauh ke dalam lorong Goa, suhu sekitar pintu masuk tidak mempengaruhi secara signifikan. Perubahan kelembaban relatif hanya dipengaruhi oleh musim di dekat pintu masuk goa, menunjukkan bahwa itu dipertahankan secara teratur oleh air bawah tanah di dalam goa. Meskipun jumlah karbon dioksida di dalam goa tampaknya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti topografi dan fenomena benua, uap, suhu, dll. Hal ini dianggap paling dipengaruhi oleh pengunjung di antara semua faktor lingkungan lainnya. Hasil dari penelitian ini menunjukkan, goa-goa yang dibuka untuk umum perlu terus dilakukan pemantauan jumlah karbon dioksida. Selain itu, perlu ada penelitian tambahan mengenai pengaruh jumlah karbon dioksida terhadap perubahan lingkungan di dalam goa.

## METODOLOGI

Pengukuran tingkat kualitas udara dilakukan selama 5 hari yang akan dilakukan pada hari Jumat, Sabtu dan Minggu mulai dari pukul 09-12.00 WIB. Pemilihan hari dilakukan karena pada hari Jumat, pengunjung sangat sepi. Sehingga data yang akan diperoleh pada hari Jumat merupakan data konsentrasi CO<sub>2</sub> yang masih bersumber dari dalam Goa. Sedangkan Sabtu dan Minggu merupakan hari padat pengunjung. Titik pengukuran akan dimulai dari mulut Goa, hingga kedalaman 100 meter, dengan titik pengukuran berjarak 5 meter. Pengukuran akan dilaksanakan selama 5 menit di setiap titik. Pengambilan data akan dilaksanakan setiap menitnya, sehingga 1 titik pengukuran terdiri dari 5 data. Langkah-langkah pengukuran polutan pada setiap titik dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



**Gambar 2.** Flowchart Pengukuran Parameter Kualitas Udara di dalam Goa

Hasil data yang diperoleh akan diolah dalam bentuk grafik dan akan di urutkan pada setiap titik pengukuran, sehingga distribusi kualitas udara di dalam Goa dapat dianalisis terhadap baku mutu serta indeks standart pencemaran udara (ISPU). Berikut merupakan batas ISPU dalam satuan SI.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Pengaruh Variable

Penelitian dilaksanakan di Goa Seribu yang terletak di lereng Dolok Pinapan (Bukit Pinapan), Desa Banuarea, Kecamatan Pakkat, Kabupaten Humbang Hasundutan tepatnya Goa Sirahar Ni Api dengan panjang lorong diperkirakan 200 meter. Pada penelitian ini suhu yang diperoleh pada lingkungan luar mencapai 27°C, sedangkan di dalam goa berkisar antara 23-25°C. Penelitian dilaksanakan sesuai dengan rencana penelitian. Jarak maksimal pengukuran adalah 100 m dengan pengukuran kualitas udara setiap 5 meter. Hasil penelitian kandungan udara di dalam Goa dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini. Tabel di atas merupakan hasil rata-rata pengukuran dari 5 kali pengambilan data pada setiap titik.

**Tabel 2.** Hasil Rata-Rata Pengukuran Parameter yang Diperlukan Dalam Penelitian

No	Distance	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
1	Entrance	25	34	1	403
2	5	21	27	3	401
3	10	26	34	3	403
4	15	22	28	3	413
5	20	30	39	2	418
6	25	26	34	1	406
7	30	22	39	3	501
8	35	27	35	3	786
9	40	27	35	3	410
10	45	25	32	3	410
11	50	20	36	3	640
12	55	22	28	2	470
13	60	24	31	3	442
14	65	26	33	3	406
15	70	22	35	2	444
16	75	23	39	3	456
17	80	24	33	1	410
18	85	22	32	1	419
19	90	26	30	3	428
20	95	22	34	2	449
21	100	25	39	3	447

### B. Particulate Matter (PM10)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa PM10 di dalam Goa tidak melebihi nilai ambien yang telah ditetapkan untuk kualitas udara sehat kepada manusia. Berdasarkan PMK No.1077 tentang Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah nilai ambang batas PM10 adalah tidak melebihi 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dalam 24 jam. Dalam penelitian ini, pengambilan data dilaksanakan dalam kurun waktu 4 jam karena keterbatasan daya listrik perangkat yang digunakan. Sehingga peneliti tidak memiliki acuan untuk mencari nilai IPSU PM10.



**Gambar 3.** Pencatatan Data Pengukuran Kualitas Udara di Dalam Goa Seribu

Namun dari sampel data yang diperoleh selama 4 jam tersebut diperoleh rata-rata 33,67  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , dengan nilai tertinggi berada pada jarak 20 m, 30 m, 70 m dan 100 m dengan nilai 39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai ini masih sangat jauh di bawah nilai batas ambang 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa Goa Sirahar Ni Api masih terhindar dari particulate matter PM10.

Berdasarkan analisis deskriptif di lapangan bahwa rongga udara di dalam Goa hanya ada 2 buah, yaitu pintu masuk dan pintu keluar yang berjarak ± 200 m. Dalam observasi Goa, aliran udara ke dalam Goa sangat kecil atau bahkan tidak ada. Ini disebabkan pintu masuk Goa mencorok ke dalalam lembah ±7 m. Selain itu, lorong-lorong di dalam Goa yang cukup banyak dan berliku. Sehingga udara masuk tidak dapat menuju pintu keluar.



**Gambar 4.** Grafik Pengukuran Konsentrasi PM 10 Terhadap Jarak

Untuk menghitung ISPU berdasarkan indeks standar pencemar udara menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara, maka ISPU untuk PM 10 adalah:

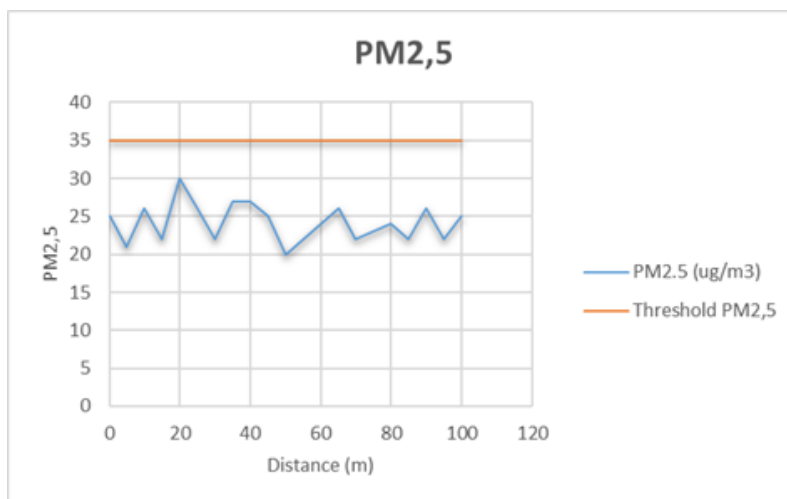
$$I = \frac{Ia - Ib}{Xa - Xb}(Xx - Xb) + Ib$$

$$I = \frac{50 - 0}{50 - 0}(39 - 0) + 0 = 39$$

Dengan demikian, nilai 39 dikategorikan baik dengan penjelasan tingkat kualitas udara yang tidak memberikan efek bagi kesehatan manusia atau hewan dan tidak berpengaruh terhadap tumbuhan, bangunan atau nilai estetika.

**C. Particulate Matter (PM2,5)**

Selain PM 10, peneliti juga mengukur konsentrasi PM 2,5 yaitu debu yang berukuran 2,5 mikrometer. Pengukuran PM 2,5 juga dilakukan bersamaan dengan pengukuran parameter lainnya dengan kondisi serupa. Dari Gambar 5 di bawah ini menjelaskan bahwa PM 2,5 berada pada rentang 20 – 30 µg/m<sup>3</sup> atau dengan rata-rata pengukuran 24,14 µg/m<sup>3</sup>. Dimana nilai ini berada di bawah batas ambang PM 2,5 yaitu 35 µg/m<sup>3</sup>.



**Gambar 5.** Grafik Pengukuran Konsentrasi PM 2,5 Terhadap Jarak

Nilai tertinggi adalah  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  berada pada jarak 20 meter dari pintu masuk goa. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia No P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 Tentang Indeks Standar Pencemar Udara, maka ISPU untuk PM 2,5 adalah:

$$I = \frac{Ia - Ib}{Xa - Xb}(Xx - Xb) + Ib$$

$$I = \frac{100 - 50}{55,4 - 15,5}(30 - 15,5) + 50$$

$$I = 81 \text{ (pembulatan)}$$

Dengan demikian, nilai 81 berada pada kategori “sedang” dengan penjelasan Tingkat kualitas udara yang tidak memberikan efek bagi kesehatan manusia ataupun hewan tetapi berpengaruh pada tumbuhan, bangunan atau nilai estetika.

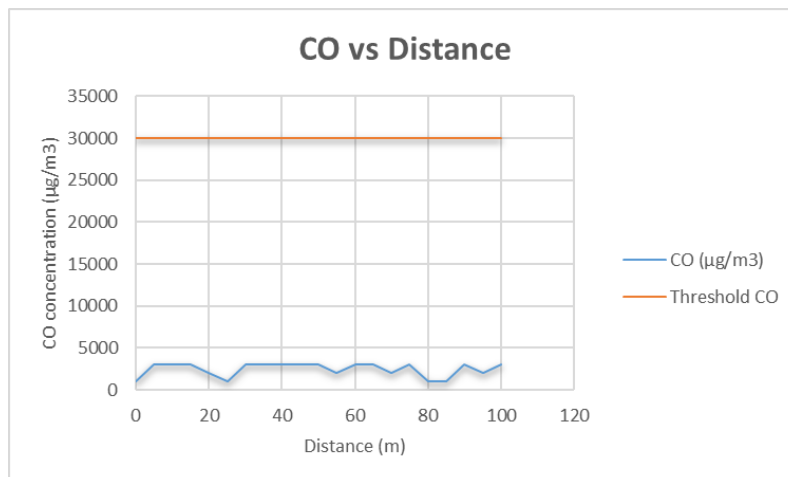
#### D. Karbonmonoksida (CO)

Pengukuran CO dilakukan dengan memperoleh nilai dalam bentuk ppm, sehingga harus diubah terlebih dahulu kedalam satuan  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dengan ketetapan 1 ppm serupa dengan  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Nilai tertinggi yang diperoleh adalah  $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Untuk melakukan perhitungan nilai ISPU dari CO, maka kita menggunakan standar perhitungan setiap jam yaitu  $30.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per jam. Sedangkan jika memiliki data CO yang diukur selama 24 jam, maka nilai Batas ambangnya adalah  $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  per 24 jam.

$$I = \frac{Ia - Ib}{Xa - Xb}(Xx - Xb) + Ib$$

$$I = \frac{100 - 50}{4000 - 0}(3000 - 0) + 0$$

$$I = 38$$



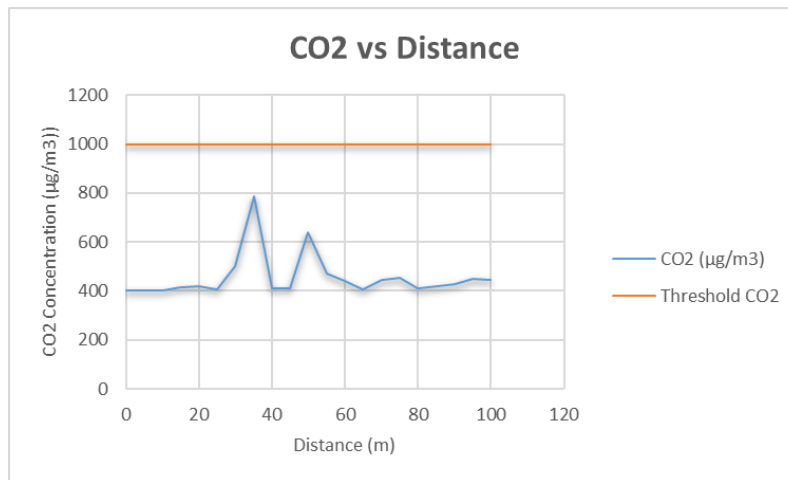
**Gambar 6.** Grafik Pengukuran Konsentrasi CO Terhadap Jarak

Dari Gambar 6 di atas, nilai CO di dalam goa relative konstan pada range 1-3 ppm ( $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3 - 3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Sehingga diperoleh nilai ISPU dari nilai tertinggi sebesar 38. Ini berada di dalam range 0-50 dengan kategori baik dan mengindikasikan tingkat kualitas udara tidak memberikan dampak bagi kesehatan manusia, hewan atau tumbuhan.

#### E. Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

Pengukuran Karbondioksida CO<sub>2</sub> merupakan tujuan utama pada penelitian ini. Gambar berikut ini menunjukkan nilai konsentrasi CO<sub>2</sub> yang kita peroleh dalam ppm. Nilai tertinggi berada pada jarak 35 m yaitu 786 ppm.





**Gambar 7.** Grafik Pengukuran Konsentrasi CO<sub>2</sub> Terhadap Jarak

Dari pintu masuk hingga jarak 25 m, konsentrasi CO<sub>2</sub> masih memiliki rata-rata 400 ppm. Namun pada jarak 35 m hingga 60 m memiliki konsentrasi yang fluktuatif, dan memiliki nilai tertinggi. Ini disebabkan, banyaknya sarang kelelawar di dinding Goa pada jarak 35-60 m dan memiliki kelembapan yang sangat tinggi pada permukaan tanah dan juga dinding Goa. Seperti pada Gambar 8 dan 9 berikut ini.



**Gambar 8.** Permukaan Goa yang Basah dan Merupakan Aliran Sungai Hujan



**Gambar 9.** Dinding Goa Sebagai Sarang Kelelawar

ISPU dari konsentrasi CO<sub>2</sub> tidak diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia No. P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020. Namun Israni dkk, melalui paper yang berjudul Perbandingan Pengeluaran Karbondioksida di laboratorium Komputer Universitas Atma Jaya Yogyakarta menyatakan bahwa nilai batas ambang dari CO<sub>2</sub> di dalam ruangan adalah 1000 ppm. Hal ini juga sudah berdasarkan PMK No.1077 tentang Kesehatan Udara Dalam Ruang Rumah. Oleh sebab itu penulis dalam penelitian ini menetapkan batas ambang CO<sub>2</sub> pada nilai yang sama. Sehingga jika diamati pada grafik tersebut, tidak ada nilai yang melebihi ambang batas. Sehingga bisa dipastikan bahwa kadar CO<sub>2</sub> di dalam Goa masih tergolong baik.



## KESIMPULAN

Pengukuran kualitas udara di dalam Goa 1000 khususnya di Goa Sirahar Ni Api telah dilaksanakan. Parameter yang berhasil diperoleh yaitu PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, CO dan CO<sub>2</sub>. Berdasarkan hasil pengukuran PM<sub>10</sub> diperoleh nilai tertinggi adalah 39 µg/m<sup>3</sup>. Dimana nilai ini berada di bawah batas ambang menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020. Begitu juga dengan PM<sub>2,5</sub> yang juga berada di bawah batas ambang yaitu 30 µg/m<sup>3</sup>. CO dan CO<sub>2</sub> juga memiliki nilai maksimum yang masih di bawah batas ambang yaitu 30000 µg/m<sup>3</sup> dan 1000 µg/m<sup>3</sup>. Berdasarkan nilai yang diperoleh tersebut, dapat disimpulkan bahwa kualitas udara di dalam Goa 1000 khususnya Goa Sirahar Ni Api di golongkan pada kriteria Baik. Dengan demikian peneliti menyimpulkan bahwa Goa 1000 sangat layak untuk dikunjungi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Cetin, H. Sevik, and A. Saat, "Indoor Air Quality: The Samples of Safranbolu Bulak Mencilis Cave," *Fresenius Environ. Bull.*, vol. 26, no. 10, pp. 5965–5970, 2017.
- [2] P. A. Santi and E. Nurjani, "Analisis Kualitas Udara Stasiun Global Atmosphere Watch (Gaw) Bukit Kototabang Kabupaten Agam Sumatera Barat," *J. Bumi Indones.*, vol. 1, no. 1, p. 238168, 2012.
- [3] E. E. Okonkwo, E. Afoma, and I. Martha, "Cave Tourism and its Implications to Tourism Development in Nigeria: A Case Study of Agu-Owuru Cave in Ezeagu," *Int. J. Res. Tour. Hosp.*, vol. 3, no. 3, pp. 16–24, 2017, doi: <https://dx.doi.org/10.20431/2455-0043.0303003>.
- [4] H. A. Yanuarita, "Pembangunan Pariwisata Berkelanjutan: Studi tentang Pengembangan Wisata Gua Selomangleng di Kota Kediri," *Publik (Jurnal Ilmu Adm.)*, vol. 7, no. 2, pp. 136–146, 2018, doi: <http://dx.doi.org/10.31314/pjia.7.2.136-146.2018>.
- [5] M. Cao, Y. Jiang, J. Lei, Q. He, J. Fan, and Z. Zeng, "Constraining the soil carbon source to cave-air CO<sub>2</sub>: evidence from the high-time resolution monitoring soil CO<sub>2</sub>, cave-air CO<sub>2</sub> and its δ<sup>13</sup>C in Xueyudong, Southwest China," *Biogeosciences Discuss*, pp. 1–23, 2019, doi: <https://doi.org/10.5194/bg-2019-66>.
- [6] L. Kukuljan, F. Gabrovšek, M. D. Covington, and V. E. Johnston, "CO<sub>2</sub> dynamics and heterogeneity in a cave atmosphere: role of ventilation patterns and airflow pathways," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 146, pp. 91–109, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03722-w>.
- [7] P. Madonia *et al.*, "Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations in Caves Protected as Nature Reserves and Related Gas Hazard," *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 11, p. 1760, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos13111760>.
- [8] F. A. Vargas, N. Y. Rojas, J. E. Pachon, and A. G. Russell, "PM<sub>10</sub> characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 72–80, 2012, doi: <https://doi.org/10.5094/APR.2012.006>.
- [9] I. Grgič, I. Iskra, B. Podkrajšek, and V. D. Gerjevič, "Measurements of aerosol particles in the Škocjan Caves, Slovenia," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, pp. 1915–1923, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2080-4>.
- [10] L. F. Kurnianti, "Pengaruh Konsentrasi Zat Pengatur Tumbuh NAA dan BAP Terhadap Pertumbuhan Biji Dendrobium capra J.J. Smith Secara In Vitro," Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2012.
- [11] G.-C. Fang *et al.*, "The study of fine and coarse particles, and metallic elements for the daytime and night-time in a suburban area of central Taiwan, Taichung," *Chemosphere*, vol. 41, no. 5, pp. 639–644, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00507-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00507-X).
- [12] H. Kan *et al.*, "Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China," *Environ. Int.*, vol. 33, no. 3, pp. 376–384, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.12.001>.
- [13] C.-C. Lin, S.-J. Chen, K.-L. Huang, W.-I. Hwang, G.-P. Chang-Chien, and W.-Y. Lin, "Characteristics of Metals in Nano/Ultrafine/Fine/Coarse Particles Collected Beside a Heavily Trafficked Road," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 21, pp. 8113–8122, 2005, doi: <https://doi.org/10.1021/es048182a>.
- [14] A. Seaton *et al.*, "Particulate air pollution and the blood," *Thorax*, vol. 54, no. 11, pp. 1027–1032, 1999, doi: <http://dx.doi.org/10.1136/thx.54.11.1027>.
- [15] H. Gunawan, Y. Ruslinda, V. S. Bachtiar, and A. Dwinta, "Model Hubungan Konsentrasi Particulate Matter 10 (PM<sub>10</sub>) di Udara Ambien Dengan Karakteristik Lalu Lintas di Jaringan Jalan Primer Kota Padang," in *Prosiding Semnastek*, 2018, pp. 1–11.
- [16] B. S. Hadi, "Pemantauan Kualitas Udara Ambien PM<sub>10</sub> dan Risiko Kesehatan Terhadap Masyarakat di Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta," Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, 2021.
- [17] M. K. Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Kesehatan Indonesia No 1077/MENKES/PER/V/2011 Tentang Pedoman Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah." Jakarta, pp. 1–32, 2011.
- [18] P. P. RI, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No 14 Tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemaran Udara." pp. 1–16, 2020.
- [19] T. H. Kim *et al.*, "A Study on the Changes of Air Quality the Baekryong Cave in Pyeonchang (Natural Monument Number 260)," *J. Korean Nat.*, vol. 5, no. 3, pp. 237–241, 2012, doi: <https://doi.org/10.7229/jkn.2012.5.3.237>.