

Evaluasi dan Analisis Kualitas dan Kualitas Udara pada Terowongan *Lubang Jepang* di Kota Bukittinggi

Teddi Triandana^{1*}, Bambang Heriyadi^{1**}

¹ Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang

*tr.teddi@engineer.com

**bambang_heriyadi@yahoo.co.id

Abstract. Lubang Jepang is an ancient tunnel that build during Japanese's colonizing in Indonesia. However it refuctioned after Indonesian Independency and officially became tourist area at 1984. Known as a tourist destination in Bukittinggi, Lubang Jepang tunnel has excalation amount of visitors yearly. Tunnel has the limitation amount and quality of circulated air in it. There are range borders such as determinations of Kepmen 555.K/26/M.P.E/1995 that organizing air quality and quantity in the tunnel for circulationing process. Then the analysis between air quality and quantity in tunnel and range borders to satisfy the requirment of fresh air for visitor is needed. Base on range borders of Kepmen 555.K/26/M.P.E/1995 in point 2 to point 11 at certain time and weather terms have percentage of humidities below the mark along with point 9 that has the lowest effective temperature in 16,85%. Meanwhile the gas contents (O₂ dan CO₂) of all locations in Lubang Jepang tunnel are safe and up to standard. So by the comparison between current air circulation's debit and respiration requirment per-second based on Kepmen 555.K/26/M.P.E/1995 known that the maximum of visitors are 398 persons periodically, yet amount of visitors are down to 196 persons while puoring rain. Then the result of air usage evaluation for visitor at the moment is fulfilled.

Keywords: air quantity, temperature, air circulation, tunnel, range border

1. Pendahuluan

Udara bersih merupakan unsur kehidupan yang dianugerahkan oleh Tuhan YME kepada manusia untuk bernafas. Udara bisa berubah menjadi tidak layak digunakan untuk bernafas dikarenakan berbagai hal yang mengakibatkan udara menjadi terkena polusi maupun jumlahnya yang terbatas.

Manusia bernafas membutuhkan oksigen (O₂) dan mengeluarkan karbondioksida (CO₂) serta uap air sebagai sisa pernafasan. Kebutuhan akan udara bersih atau udara segar menjadi hal yang tidak bisa dihindarkan dalam aktivitas harian, baik itu di dalam ruangan maupun ruangan terbatas dan kedap udara. Oleh karena itu, ventilasi dibutuhkan dalam proses mengalirkan udara masuk dan keluar ruangan.

Ruang terbatas dan kedap udara memiliki kuantitas udara segar yang jumlahnya terbatas. Salah satu contohnya adalah terowongan bawah tanah. Berdasarkan jumlah dan kadungannya, udara di dalam terowongan bawah tanah memiliki nilai ambang batas yang harus dipenuhi.

Pada terowongan, ventilasi memiliki peran penting dalam menjaga sirkulasi udara bagi individu dan peralatan yang berada di dalamnya dari polusi udara dan fluktuasi suhu udara. Apabila terjadi polusi udara pada lokasi tersebut akan mengakibatkan sakit, gangguan kesehatan dan ketidak nyamanan dalam beraktivitas.

Berdasarkan Kepmen 555.K/26/M.P.E/1995 pada bagian ke delapan tentang ventilasi pasal 369 ayat 1 dijelaskan bahwa KTT yang dalam kasus ini adalah otoritas berwenang; "harus menjamin tersedianya aliran udara bersih yang cukup untuk semua tempat kerja dengan ketentuan volume oksigennya tidak kurang dari 19,5 persen dan volume karbon dioksidanya tidak lebih dari 0,5 persen;" dan pasal 370 ayat 1 yang berbunyi; "Temperatur udara di dalam tambang bawah tanah harus dipertahankan antara 18 derajat celcius sampai dengan 24 derajat Celcius dengan kelembaban relatif maksimum 85 persen." Dengan ketetapan tersebut diharapkan tercapainya kualitas dan

kuantitas udara yang memenuhi standar di dalam terowongan.

Lubang Jepang merupakan salah satu terowongan kuno yang dibangun pada periode penjajahan Jepang di Indonesia (1942–1945) oleh pekerja yang disebut romusa. Namun berubah fungsi setelah Indonesia merdeka dan resmi dikelola menjadi kawasan wisata pada tahun 1984.

Dikenal sebagai kota wisata, kota Bukittinggi dengan berbagai kawasan wisatanya selalu menarik kunjungan wisatawan mancanegara begitupun wisatawan lokal setiap tahunnya. Hal tersebut dibuktikan dengan meningkatnya kunjungan wisata di Taman Panorama dan *Lubang Jepang* (TPLJ) beberapa tahun ke belakang ini.

Tabel 1. Kunjungan Wisatawan 2013-2017^[1]

Tahun	Wisman	Wisnus	Total
2013	32.067	404.145	436.212
2014	32.501	433.038	465.539
2015	25.970	434.935	460.905
2016	27.516	511.258	538.774
2017	30.412	516.483	546.895

Sebagai suatu terowongan bawah tanah, *Lubang Jepang* memiliki keterbatasan dalam kapasitas kunjungan yang berhubungan dengan kebutuhan udara segar untuk pernapasan. Praktisnya, kebutuhan udara segar berbanding lurus dengan meningkatnya kunjungan yang memasuki terowongan. Ditambah dengan belum ditemukannya keberadaan ventilasi mekanis yang siap digunakan dalam mengantisipasi terjadinya kekurangan dan pencemaran udara segar di dalam terowongan *Lubang Jepang*.

Secara teoritis dibutuhkan evaluasi dan kajian terhadap kualitas dan kuantitas udara segar demi memenuhi kebutuhan udara di dalam terowongan *Lubang Jepang*. Dengan latar belakang tersebut maka penulis tertarik untuk mengangkat judul “Evaluasi dan Analisa Kualitas dan Kuantitas Udara pada Terowongan *Lubang Jepang* di Kota Bukittinggi” sebagai judul penelitian ini.

2. Kajian Pustaka

2.1 Lokasi Penelitian

Secara geografis kota Bukittinggi terletak pada koordinat 0°17'8,93"LU 100°22'3,61"BT / 0,28333°LS 100,36667°BT yang terbentang pada rangkaian Bukit Barisan yang membujur sepanjang pulau Sumatera dan dikelilingi oleh oleh dua gunung berapi yaitu Gunung Marapi dan Gunung Singgalang. Kota ini berada pada ketinggian 909–941 meter di atas permukaan laut dan memiliki hawa cukup sejuk dengan suhu berkisar antara 16.1-24.9 °C.



Gambar 1. Tampak Muka terowongan *Lubang Jepang*

Luas wilayah kota Bukittinggi adalah 25,24 km² dengan 82,8% diperuntukkan menjadi lahan budidaya dan sisanya merupakan hutan lindung.

Topografi kota dengan semboyan *Saayun Salangkah* ini berupa bukit–bukit berlembah di seluruh wilayah, diantaranya Bukit Ambacang, Bukit Tambun Tulang, Bukit Mandiangin, Bukit Campago, Bukit Kubangkabau, Bukit Pinang Nan Sabatang, Bukit Pananggih, Bukit Paninjauan dan sebagainya. Lalu ada lembah yang dikenal dengan nama Ngarai Sianok dengan kedalaman bervariasi antara 75–110m yang di bawahnya mengalir sungai dengan nama Batang Masang.

Iklim kota Bukittinggi diklasifikasikan sebagai tropis dikarenakan tingginya curah hujan di kota Bukittinggi, bahkan di bulan–bulan kemarau.

2.2 Kajian Teori

Ventilasi merupakan suatu usaha pengendalian terhadap pergerakan atau aliran udara^[2]. Parameter yang harus dipenuhi pada ventilasi adalah jumlah, mutu dan arah alirannya. Secara sederhana dapat diartikan sebagai perputaran udara secara bebas di dalam suatu ruangan. Ditinjau dari cara kerjanya, ventilasi ada dua yaitu ventilasi alami dan ventilasi mekanis.

Pada dunia pertambangan, ventilasi tambang merupakan suatu usaha pengendalian terhadap pergerakan udara atau aliran udara tambang termasuk didalamnya adalah jumlah, mutu dan arah alirannya. Adapun tujuan utama dari sistem ventilasi tambang adalah menyediakan udara segar dengan kuantitas dan kualitas yang cukup baik, kemudian mengalirkan serta membagi udara segar tersebut ke dalam tambang supaya tercipta kondisi kerja yang aman dan nyaman baik bagi para pekerja tambang maupun proses penambangan^[2].

Standar udara bersih adalah udara yang mempunyai komposisi sama atau mendekati dengan komposisi udara atmosfer pada keadaan normal. Komposisi udara segar dapat dilihat pada Tabel 2.

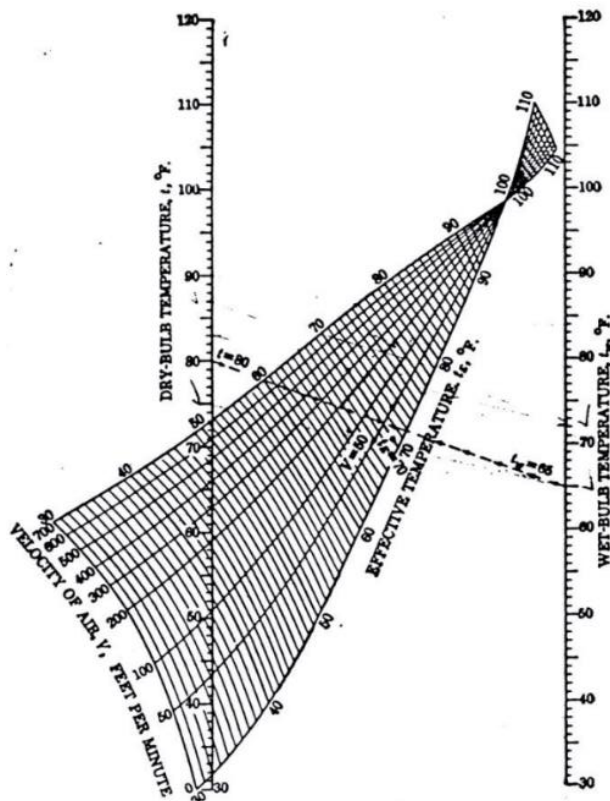
Tabel 2. Komposisi Udara Segar^[3]

Unsur	Volume (%)	Berat (%)
Nitrogen (N ₂)	78,09	75,53
Oksigen (O ₂)	20,95	23,14
Karbondioksida (CO ₂)	0,03	0,046
Argon (Ar), dll	0,93	1,284

Penilaian terhadap kualitas ventilasi diukur menggunakan standar kenyamanan *thermal* yang menjadi faktor penentu dalam mendapatkan nilai kenyamanan *thermal* yang antara lainnya adalah

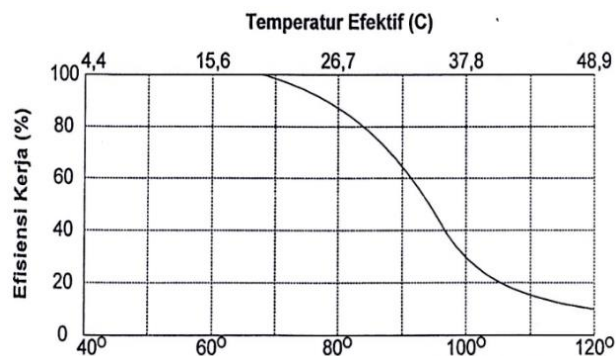
- Suhu udara, T (*temperature*), °C
- Kecepatan angin, v (*velocity*), m/detik
- Kalambapan udara, RH (*relative humidity*), %

Maka dalam menentukan kualitas udara dibutuhkan parameter-parameter yang merefleksikan unsur-unsur yang berkaitan langsung dengan; Temperatur kering (t_d), Temperatur basah (t_w), Kelembapan relatif (Rh) dan Temperatur efektif (t_e). Point-point tersebut bersama *velocity* dihubungkan pada tabel nomograf (gambar 2).



Gambar 2. Nomograf^[4]

Terdapat hubungan yang tidak dapat dikesampingkan antara kenyamanan *thermal* dan efisiensi kerja. Panas dan kelembapan mempengaruhi manusia dalam beberapa hal antara lain menurunkan efisiensi, menimbulkan kecerobohan dan kecelakaan serta menyebabkan sakit dan kematian. Gambar 3 menampilkan hubungan efisiensi kerja dengan temperatur efektif yang berlangsung pada suatu bidang kerja.



Gambar 3. Temperatur efektif – Efisiensi Kerja^[5]

Selain temperatur efektif dan efisiensi kerja, kuantitas udara berperan dalam memasok kebutuhan udara segar ke dalam terowongan melalui ventilasi. Dimana untuk mendapatkan debit udara kita membutuhkan kecepatan angin di dalam terowongan dan dimensi terowongan.

Persamaan untuk mengetahui luas permukaan adalah^[6]

$$A = p \times l \quad (1)$$

Keterangan: A = Luas penampang (m²)
p = panjang (m)
l = lebar (m)

Jumlah debit udara yang ada di dalam terowongan dapat diketahui dengan persamaan^[7]

$$Q = v \times A \quad (2)$$

Keterangan: Q = Jumlah udara (m³/s)
v = Kecepatan udara (m/s)
A = Luas penampang (m²)

Hukum Kirchoff 1 menjelaskan mengenai perputaran arus di dalam problematika keteknikan. Namun ventilasi juga terkait dalam hal ini. Bedanya pada ventilasi arus digantikan oleh debit udara yang bersirkulasi di dalam ruang^[8]. Perumusannya dapat diterangkan sebagai berikut

$$\sum Q = 0 \quad (3)$$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli tahun 2018 di Taman Panorama dan *Lubang Jepang* (TPLJ), tepatnya di dalam terowongan *Lubang Jepang*. Terowongan *Lubang Jepang* berlokasi tepatnya di Ateh Ngarai Sianok, Kota Bukittinggi.

3.1 Jenis Penelitian

Berdasarkan jenis data yang diperoleh maka teknik analisis data menggunakan data kuantitatif, yaitu dengan mengolah kemudian disajikan dalam bentuk tabel atau grafik. Untuk mempersentasikan hasil pengolahan data tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode analisis data statistik dan persentasi.

Metode penelitian kuantitatif merupakan metode penelitian yang berlandaskan pada filsafat positivisme, digunakan untuk meneliti pada populasi atau sampel yang

umumnya dilakukan secara random, pengumpulan data menggunakan instrumen penelitian, analisis data bersifat kuantitatif atau statistik dengan tujuan untuk menguji hipotesis yang telah ditetapkan [9].

3.2 Tahap Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dimulai dengan mengambil data primer berupa data kualitas dan kuantitas udara di terowongan *Lubang Jepang*. Data sekunder berupa data kunjungan di Taman Panorama dan Lobang Jepang (TPLJ) Kota Bukittinggi.

3.3 Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data yang dilakukan yaitu kuantitas dan kualitas udara dibedakan menjadi tujuh variabel per-lokasi pengambilan data. Yaitu yang pertama adalah rata-rata satu hari lalu berdasarkan waktu dan cuaca saat pengambilan data.

3.4 Tahap Analisis Data

Analisis data menggunakan proses *plotting* dan komparasi dalam menentukan kualitas dan kuantitas udara aktual. Lalu menganalisa batasan kunjungan yang diperbolehkan merujuk pada kualitas dan kuantitas udara aktual setelah dilakukan penganalisaan tersebut dihubungkan dengan penggunaan ventilasi yang ada saat ini.

3.4.1 Kuantitas Udara Aktual

Perhitungan kuantitas udara menggunakan nomograf untuk menemukan temperatur efektif dan kurva efisiensi kerja untuk mendapatkan efisiensi kerja per-lokasi.

3.4.2 Kualitas Udara Aktual

Untuk kualitas udara penganalisaan dilakukan dengan membandingkan kualitas udara aktual dengan nilai ambang batas berdasarkan ketetapan Kepmen 555.K/26/M.P.E/1995.

4. Hasil dan Pembahasan

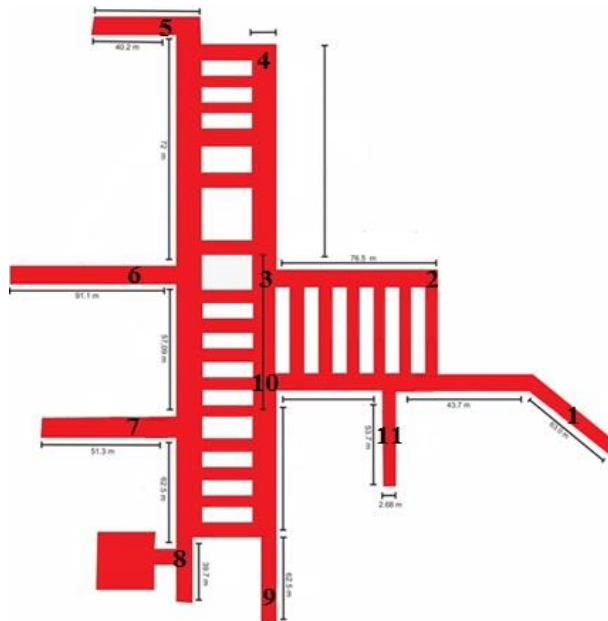
Penelitian dilakukan pada terowongan *Lubang Jepang* yang berlokasi di sebelah selatan *Jam Gadang* Bukittinggi. Pengamatan dan pengukuran kualitas dan kuantitas udara dilakukan pada 11 titik terjadinya sirkulasi udara yang meliputi seluruh terowongan yang aktif dilalui oleh pengunjung setiap memasuki terowongan *Lubang Jepang*. Penulis menggunakan alat Anemometer, Psychometer, GPS, Distancemeter dan Multi Gas Detector dalam melakukan pengambilan data kualitas kuantitas udara segar serta kondisi umum lubang bukaan. Selanjutnya dilakukan analisis guna menjawab problematika yang terjadi.

4.1 Kondisi Umum dan Kualitas Udara Terowongan *Lubang Jepang*

Terowongan *Lubang Jepang* memiliki 2 (dua) pintu yaitu terletak di sebelah timur adalah pintu masuk utama dan di sebelah barat daya adalah pintu keluar yang berhubungan langsung dengan *Ngarai Sianok*. Di antara 2 (dua) pintu

tersebut terdapat 6 (enam) lorong yang membujur hingga titik pusat terowongan dan 15 (lima belas) lorong yang melintang dimana di tengahnya terdapat pintu keluar.

Pengambilan sampel data memakan waktu kira-kira dua hingga tiga menit per-lokasi yang berjumlah sebelas lokasi yang semuanya berada di kawasan Taman Panorama dan Lobang Jepang (TPLJ).



Gambar 4. Lokasi 11 Titik Pengambilan Data

Terowongan *Lubang Jepang* memiliki panjang 1389,85 meter (berdasarkan hasil pengukuran data penelitian) dari pintu masuk hingga pintu keluar dengan dimensi dan elevasi yang berbeda setiap lorongnya (lihat Tabel 3). Pengambilan data elevasi dilakukan dengan GPS merk Garmin dan dimensi menggunakan *distance meter* dan/atau meteran (panjang maksimal 50 meter).

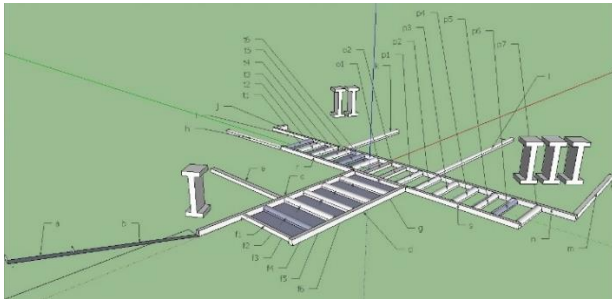
Tabel 3. Elevasi dan Kandungan O₂ serta CO₂ di dalam Terowongan *Lubang Jepang*

No	Lokasi	Elevasi (mdpl)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)
1	Titik 1	918	20.9	0
2	Titik 2	905	20.8	0
3	Titik 3	905	20.8	0
4	Titik 4	905	20.8	0
5	Titik 5	910	20.9	0
6	Titik 6	904	20.9	0
7	Titik 7	905	20.9	0
8	Titik 8	905	20.8	0
9	Titik 9	904	20.9	0
10	Titik 10	904	20.9	0
11	Titik 11	905	20.8	0

Selain data elevasi, Tabel 3 juga menampilkan data kandungan oksigen (O₂) dan karbondioksida (CO₂) yang relatif sama di setiap lokasinya yaitu pada Titik 1, Titik 5, Titik 6, Titik 7, Titik 9, Titik 10 memiliki kandungan oksigen 20,9% dan pada Titik 2, Titik 3, Titik 4, Titik 8, Titik 11 kandungan oksigennya adalah 20,8% dan kandungan karbondioksida di setiap

lokasi adalah sama yaitu $\pm 0\%$ atau memenuhi ambang batas.

Untuk mendapatkan debit udara di dalam terowongan, dibutuhkan kecepatan angin dan dimensi terowongan dimana perbedaannya akan mempengaruhi debit keluar-masuknya udara di lokasi tersebut. Berikut pada Gambar 5 merupakan gambaran 3 dimensi (3D) dari denah lokasi yang didesain menggunakan *software* Portable SketchUp Pro 8. Denah dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu denah I, denah II dan denah III guna memudahkan dalam kalkulasi luas dan volume serta panjang terowongan secara keseluruhan.



Gambar 5. Denah 3D Terowongan Lubang Jepang

Selanjutnya untuk mendapatkan luas dan panjang terowongan, akan ditampilkan penampang sesuai tampilan aktual yang didapat pada saat pengambilan data dari setiap lokasi terowongan secara keseluruhan. Gambaran 2 dimensi (2D) desain setiap penampang menggunakan *software* AutoCAD 2007 dan penandaan dari setiap *section* akan diberi tanda dengan huruf dan angka.

Berdasarkan gambaran 2D dapat diketahui dimensi penampang setiap titik tempat keluar-masuk udara

dan berikut pada Tabel 6 adalah luas penampang setiap titik tersebut.

Tabel 4. Luas Penampang TPLJ

Lokasi Pengambilan Data	Dimensi (m ²)
Titik 1	6,5139
Titik 5	4,4612
Titik 6	5,4191
Titik 7	7,5429
Titik 8	3,5328
Titik 9	4,6575
Titik 11	4,8116

4.2 Kuantitas Udara Terowongan Lubang Jepang

Sebelum melakukan analisa data kualitas dan kuantitas udara pada terowongan *Lubang Jepang* dibutuhkan data mentah berupa kecepatan udara, dimensi penampang, suhu udara (umum maupun kering dan basah), persentase kandungan oksigen dan karbondioksida di udara serta kelembaban udara.

Selain hal-hal yang telah disebutkan di atas kondisi cuaca dan waktu pengambilan data juga diberi perhatian khusus pada penelitian ini.

Tabel 5. Data Kecepatan – Dimensi Penampang – Debit Udara Titik 1

	Titik 1				
	Cerah	Mendung	Hujan	Lengang (Pagi)	Lengang (Sore)
v (m/s)	0,43	0,7	0,21	0,23	0,24
A (m ²)	6,51	6,51	6,51	6,51	6,51
Q (m ³ /s)	2,83	4,53	1,37	1,52	1,54
T (°C)	25,76	24,98	26,5	25,8	25,53

Tabel 6. Data Kecepatan – Dimensi Penampang – Debit Udara Titik 2 hingga Titik 11

	Cerah	Mendung	Hujan	Lengang (Pagi)	Lengang (Sore)	Cerah	Mendung	Hujan	Lengang (Pagi)	Lengang (Sore)
Titik 2										
v (m/s)	0,33	0,35	0,52	0,25	0,46	0,43	0,59	0,19	0,24	0,33
A (m ²)	4,73	4,73	4,73	4,73	4,73	4,66	4,65	4,65	4,66	4,66
Q (m ³ /s)	1,55	1,65	2,46	1,16	2,15	2,02	2,73	0,88	1,12	1,52
T (°C)	24,67	24,55	25,2	24,3	24,53	24,02	24,08	24,4	24,3	23,99
Titik 3										
v (m/s)	0,3	0,33	0,21	0,19	0,4	0,62	0,5	0,4	0,82	0,57
A (m ²)	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,46	4,46	4,46	4,46	4,46
Q (m ³ /s)	1,35	1,47	0,91	0,85	1,77	2,75	2,25	1,78	3,65	2,54
T (°C)	23,9	24,08	24	23,9	23,89	23,82	23,68	23,7	23,8	23,6
Titik 4										
v (m/s)	0,85	0,91	0,32	1,25	0,7	0,63	0,81	0,45	0,41	0,52
A (m ²)	5,42	5,42	5,42	5,42	5,42	7,54	7,54	7,54	7,54	7,54
Q (m ³ /s)	4,58	4,95	1,73	6,77	3,77	4,73	6,07	3,39	3,09	3,9
T (°C)	23,77	23,68	23,5	23,55	23,71	23,82	24,08	23,4	23,35	23,77
Titik 5										
v (m/s)	0,18	0,16	0,06	0,15	0,19	1,28	1,03	1,44	1,68	0,79
A (m ²)	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66
Q (m ³ /s)	0,64	0,56	0,21	0,53	0,67	5,95	4,8	6,71	7,84	3,69
T (°C)	23,88	23,88	21,8	23,45	23,54	23,7	23,73	24	24,1	23,9
Titik 6										
v (m/s)	0,49	0,39	0,46	0,49	0,45	0,43	0,7	0,21	0,41	0,16
A (m ²)	3,82	3,82	3,82	3,82	3,82	4,81	4,81	4,81	4,81	4,81
Q (m ³ /s)	1,88	1,5	1,76	1,85	1,71	2,07	3,34	1,01	1,98	0,76
T (°C)	23,91	23,88	24,3	24,4	23,8	24,02	23,73	26	24,3	24,11
Titik 7										
v (m/s)	0,18	0,16	0,06	0,15	0,19	1,28	1,03	1,44	1,68	0,79
A (m ²)	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	4,66	4,66	4,66	4,66	4,66
Q (m ³ /s)	0,64	0,56	0,21	0,53	0,67	5,95	4,8	6,71	7,84	3,69
T (°C)	23,88	23,88	21,8	23,45	23,54	23,7	23,73	24	24,1	23,9
Titik 8										
v (m/s)	0,3	0,33	0,21	0,19	0,4	0,62	0,5	0,4	0,82	0,57
A (m ²)	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,46	4,46	4,46	4,46	4,46
Q (m ³ /s)	1,35	1,47	0,91	0,85	1,77	2,75	2,25	1,78	3,65	2,54
T (°C)	23,9	24,08	24	23,9	23,89	23,82	23,68	23,7	23,8	23,6
Titik 9										
v (m/s)	0,3	0,33	0,21	0,19	0,4	0,62	0,5	0,4	0,82	0,57
A (m ²)	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,46	4,46	4,46	4,46	4,46
Q (m ³ /s)	1,35	1,47	0,91	0,85	1,77	2,75	2,25	1,78	3,65	2,54
T (°C)	23,9	24,08	24	23,9	23,89	23,82	23,68	23,7	23,8	23,6
Titik 10										
v (m/s)	0,3	0,33	0,21	0,19	0,4	0,62	0,5	0,4	0,82	0,57
A (m ²)	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,46	4,46	4,46	4,46	4,46
Q (m ³ /s)	1,35	1,47	0,91	0,85	1,77	2,75	2,25	1,78	3,65	2,54
T (°C)	23,9	24,08	24	23,9	23,89	23,82	23,68	23,7	23,8	23,6
Titik 11										
v (m/s)	0,3	0,33	0,21	0,19	0,4	0,62	0,5	0,4	0,82	0,57
A (m ²)	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45	4,46	4,46	4,46	4,46	4,46
Q (m ³ /s)	1,35	1,47	0,91	0,85	1,77	2,75	2,25	1,78	3,65	2,54
T (°C)	23,9	24,08	24	23,9	23,89	23,82	23,68	23,7	23,8	23,6

4.3 Aliran Udara Terowongan *Lubang Jampang*

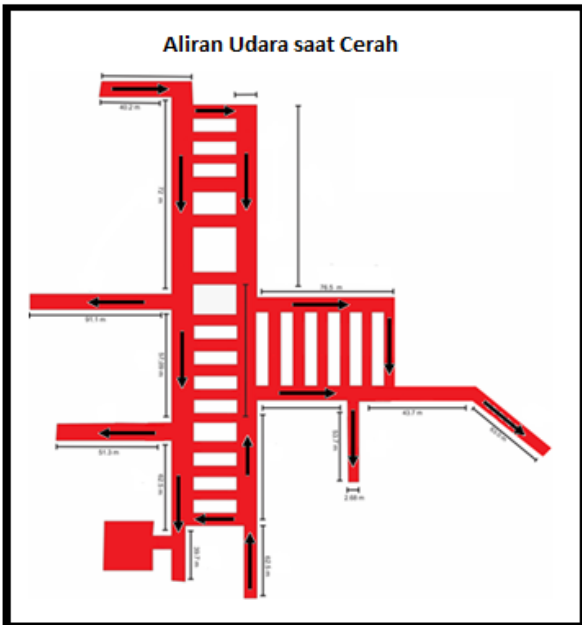
Dari pengamatan pada saat penelitian, menjelang siang hingga sore (10.00 hingga 15.00 WIB) merupakan waktu padat kunjungan pada terowongan *Lubang Jampang*. Gambar 6 dan Gambar 7 menampilkan aliran udara di dalam terowongan berdasarkan cuaca dan/atau kondisi aktual (Cerah, Mendung, Hujan, Paska Hujan dan Lembang [kunjungan di bawah 15 orang satuan waktu periode kunjungan]).

Berikut pada Tabel 7 merupakan rekap data arah aliran udara di dalam terowongan *Lubang Jampang* pada saat cerah, saat mendung dan hujan, paska hujan serta kondisi saat lengang

Tabel 7. Aliran Udara terowongan *Lubang Jampang*

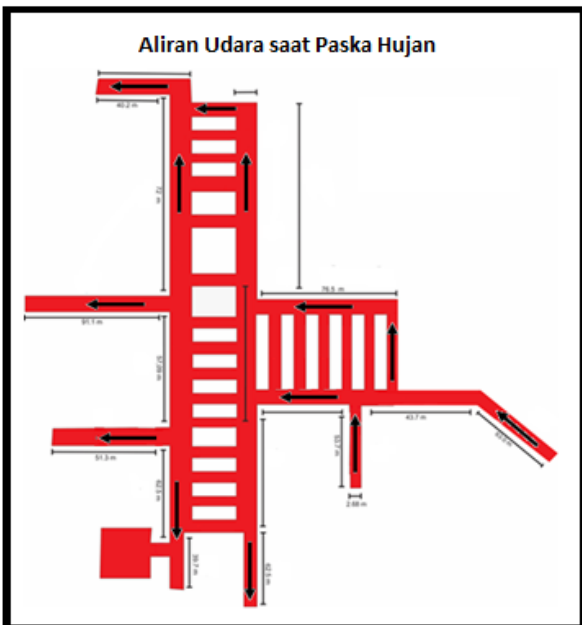
ALIRAN UDARA TEROWONGAN LUBANG JAMPANG				
Lokasi	Cerah	Mendung	Hujan	Lembang
Titik 1	Keluar	Keluar	Keluar	Masuk
Titik 11	Keluar	Keluar	Keluar	Keluar
Titik 9	Masuk	Keluar	Keluar	Keluar
Titik 8	Keluar	Keluar	Keluar	Keluar
Titik 7	Keluar	Masuk	Masuk	Masuk
Titik 6	Keluar	Masuk	Masuk	Masuk
Titik 5	Masuk	Masuk	Masuk	Keluar

4.3.1 Aliran Udara Saat Cerah – Mendung dan Hujan



Gambar 6. Aliran Udara terowongan *Lubang Jampang* (kondisi Cerah – Mendung dan Hujan)

4.3.2 Aliran Udara Saat Paska Hujan – Lembang



Gambar 7. Aliran Udara terowongan *Lubang Jampang* (kondisi Paska Hujan – Lembang)

Dari Gambar 6 dan 7 diketahui arah angin yang bersirkulasi di dalam terowongan *Lubang Japang*. Dengan melihat arah panah dapat diketahui di titik tertentu apakah udara masuk atau keluar.

4.4 Kujungan Aktual TPLJ

Data kunjungan didapat dari penghitungan karcis pada loket-loket yang ada. Terowongan *Lubang Japang* merupakan bagian dari kawasan wisata Taman Panorama dan *Lubang Japang* (TPLJ) dimana pintu masuk dan keluarnya adalah sama. Data kunjungan aktual TPLJ dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Data kunjungan aktual TPLJ^[10]

Tanggal	Pintu I (orang)	Pintu II (orang)	Pintu III (orang)	Jumlah (orang)
04/07/2018	1631	813	47	2491
05/05/2018	1600	705	46	2351
06/07/2018	5210	1822	126	7158
07/07/2018	s.d.a	s.d.a	s.d.a	s.d.a
08/07/2018	s.d.a	s.d.a	s.d.a	s.d.a
12/07/2018		405		405
13/07/2018	2460	1402	109	3971
14/07/2018	s.d.a	s.d.a	s.d.a	s.d.a
15/07/2018	s.d.a	s.d.a	s.d.a	s.d.a
16/07/2018	322	220	0	542

4.5 Analisis Kualitas Udara Aktual

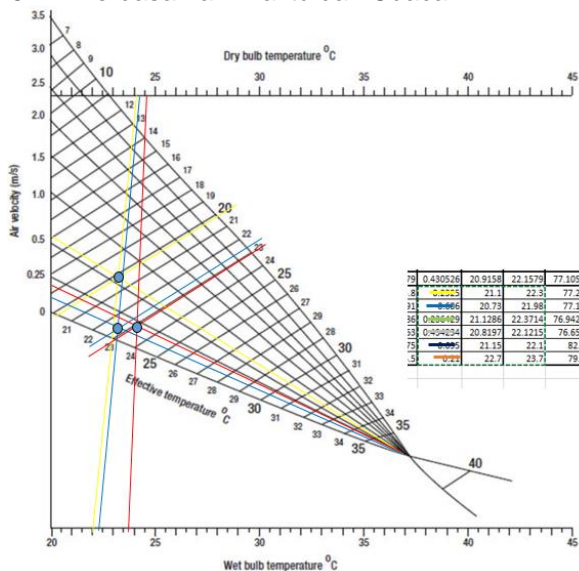
4.5.1 Analisis Kualitas Udara Aktual Titik 1

Rata-rata kualitas kelembaban udara di Titik 1 adalah :

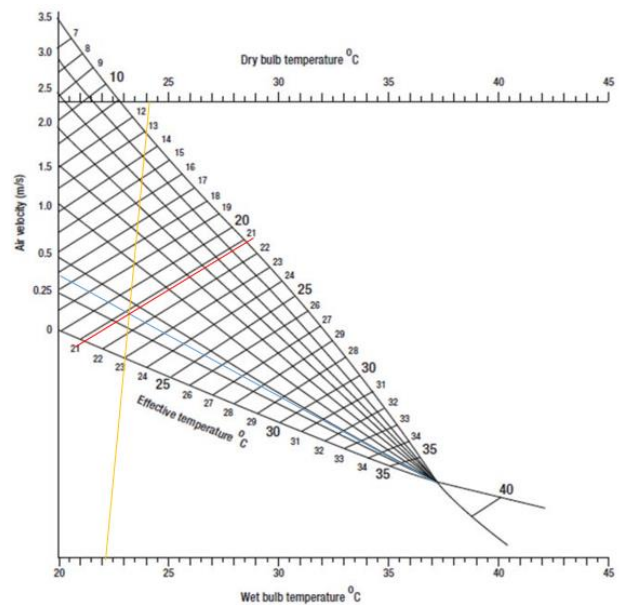
- *Dry bulb temperature* = 20,9158°C
- *Wet bulb temperature* = 22,1579°C
- *Relative Humidity* = 77,1053%

Dengan menarik garis lurus nilai-nilai kelembaban serta menggabungkan nilai kecepatan angin rata-rata maka dapat dilihat pada Gambar 8 nilai *Effective Temperature* di Titik 1.

4.5.1.1 Berdasarkan Waktu dan Cuaca

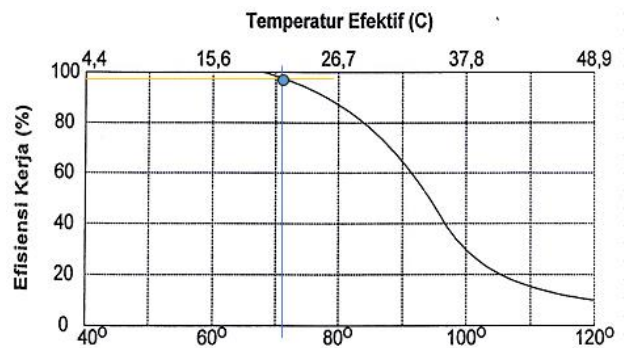


Gambar 10. Plotting *Effective Temperature* Titik 1 (waktu dan cuaca)

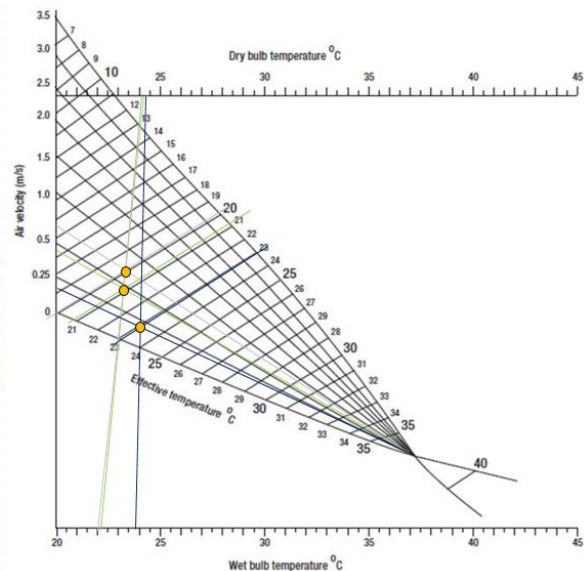


Gambar 8. Plotting *Effective Temperature* Titik 1

Dengan nilai *Effective Temperature* yang sudah diketahui, selanjutnya dilakukan plotting pada grafik Efisiensi Kerja yang menghasilkan angka berada di 96% seperti terlihat pada Gambar 9 di bawah ini.



Gambar 9. Plotting Efisiensi Kerja Titik 1

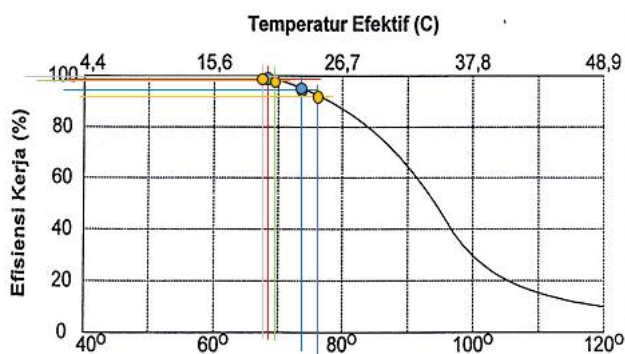


Apabila dihubungkan dengan waktu dan cuaca saat pengambilan data maka akan terdapat parameter lain yang memberi informasi bahwa terdapat perbedaan pada *Effective Temperature* dan Efisiensi Kerja. *Plotting* dan nilai *Effective Temperature* di Titik 1 dapat dilihat pada Gambar 10 dan Tabel 9.

Tabel 9. Nilai *Effective Temperature* Jenjang Masuk (waktu dan cuaca)

Waktu & Cuaca	<i>Effective Temperature</i> (°C)
Pagi	20,1
Siang	22,6
Sore	21,8
Cerah	19,8
Mendung	23
Hujan	23

Dengan nilai *Effective Temperature* berdasarkan waktu dan cuaca sudah diketahui, selanjutnya proses *plotting* pada grafik Efisiensi Kerja menghasilkan nilai Efisiensi Kerja yang berada pada *range* 92% hingga 100% seperti terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11. *Plotting* Efisiensi Kerja Titik 1 (waktu dan cuaca)

Dari hasil analisa di atas didapat rekapitulasi data seperti terlihat pada tabel 10 berikut.

Tabel 10. Rekap Data Kualitas Udara Titik 1 (waktu dan cuaca)

Kondisi	Db (°C)	Wb (°C)	Rh (%)	v (m/s)	Te (°C)	EK (%)
Rata-rata	20.92	22.16	77.11	0.43	21,15	96
Pagi	21.1	22.3	77.25	0.23	20,1	98
Siang	20.73	21.98	77.19	0.61	22,6	92
Sore	21.13	22.37	76.94	0.24	21,8	97
Cerah	20.72	22.07	75.33	0.37	19,8	99
Mendung	21.15	22.1	82.7	0.70	23	92
Hujan	22.7	23.7	79.6	0.21	23	92

4.5.1.2 Penerapan Nilai Ambang Batas (KepMen 555 K Tahun 1995)

Ketetapan tentang nilai ambang batas (NAB) menurut Keputusan Menteri 555 K Tahun 1995 dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 11. NAB Kepmen 555K^[11]

NAB Kepmen 555K	v (m/s)	Rh (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	Te (°C)
	0,1167 ≥	≤ 85	19,5 ≥	≤ 0,5	18 – 24

Merujuk pada Tabel 11 yang menampilkan data-data kualitas udara di jenjang masuk dan Tabel 18 yang menyatakan nilai ambang batas berdasarkan Kepmen 555K tahun 1995 maka dapat disimpulkan bahwa kondisi udara segar di lokasi Titik 1 sudah memenuhi standar dan dalam keadaan baik.

Proses *plotting* untuk titik 2 hingga titik 11 dilakukan menggunakan proses dengan gambar yang sama maka selanjutnya penulis hanya menampilkan rekap data dari masing-masing titik di Tabel 8 hingga Tabel 12.

4.5.2 Analisis Kualitas Udara Aktual Titik 2 hingga Titik 6

Tabel 12. Rekap Data Kualitas Udara Titik 2 hingga Titik 6

Titik	Kondisi	Db (°C)	Wb (°C)	Rh (%)	Te (°C)	EK (%)
2	Rata-rata	20,94	21,76	84,74	21,5	95
	Pagi	21,2	21,75	89,15	21,45	95
	Siang	21,01	21,81	84,53	21,2	97
	Sore	20,77	21,69	83,77	21,1	97
	Cerah	20,68	21,54	84,04	21,4	96
	Mendung	21,48	22,1	87,35	20,95	98
3	Rata-rata	22,5	23,4	84,1	21,35	96
	Pagi	20,61	21,28	86,98	20,3	98
	Siang	20,7	21,5	86	21,7	94
	Sore	20,61	21,27	87,71	19,85	99
	Cerah	20,57	21,24	86,23	20,8	96
	Mendung	20,25	21,04	85,12	20,4	98
4	Rata-rata	21,38	21,75	92	22,7	93
	Pagi	22,5	22,8	93	22,6	93
	Siang	21,17	21,71	90,53	21,3	97
	Sore	21,25	21,75	91,05	21,3	97
	Cerah	21.18	21,69	90,74	21,95	94
	Mendung	21,13	21,71	90,09	21,75	95
5	Rata-rata	20,84	21,44	89,36	21	97
	Pagi	20,84	21,44	89,36	21	97
	Siang	20,73	21,46	87,62	19,8	99
	Sore	20,86	21,4	88,71	19,9	99
	Cerah	20,39	21,24	86,54	19,75	99
	Mendung	21,53	21,95	91,15	20,6	98
6	Rata-rata	22,2	22,6	88,7	21,1	97
	Pagi	20,05	20,7	86,3	19,2	99
	Siang	20,54	21,21	87,13	17,55	100
	Sore	20,49	21,17	87,76	19,6	98
	Cerah	20,11	20,9	85,34	18,75	100
	Mendung	21,25	21,6	91,88	17,95	100
7	Rata-rata	22,4	22,7	96	21,1	97
	Pagi	22,4	22,7	96	21,1	97
	Siang	20,05	20,7	86,3	19,2	99
	Sore	20,05	20,7	86,3	19,2	99
	Cerah	20,05	20,7	86,3	19,2	99
	Mendung	20,05	20,7	86,3	19,2	99

4.5.3 Analisis Kualitas Udara Aktual Titik 7 hingga Titik 11

Tabel 13. Rekap Data Kualitas Udara Titik 7 hingga Titik 11

Titik	Kondisi	Db (°C)	Wb (°C)	Rh (%)	Te (°C)	EK (%)
7	Rata-rata	20.62	21.18	89.49	19,8	99
	Pagi	20.4	20.9	90.9	20,25	99
	Siang	20.59	21.24	88.02	19,85	99
	Sore	20.71	21.19	91.19	20,05	99
	Cerah	20.49	21.11	88.74	19,6	99
	Mendung	20.75	21.23	90.95	19,15	100
	Hujan	21.8	22.1	94.1	21,8	97
8	Rata-rata	21.3	21.55	94.6	22,5	90
	Pagi	21.83	22.13	94.16	22,4	90
	Siang	21.37	21.71	92.76	22,65	90
	Sore	21.34	21.7	92.99	22,05	91
	Cerah	22.33	22.38	98.33	22,15	91
	Mendung	22.5	23.1	85	22,7	90
	Hujan	21.3	21.55	94.6	23,5	88
9	Rata-rata	20.86	21.27	92.86	17,85	100
	Pagi	20.65	21.05	93.35	16,85	100
	Siang	20.89	21.26	92.29	17,75	100
	Sore	20.89	21.36	93.54	19,05	99
	Cerah	20.63	21.03	92.15	17,8	100
	Mendung	21.4	21.68	93.85	18,6	100
	Hujan	22	23.1	98.9	18,5	100
10	Rata-rata	21.06	21.45	92.8	20,35	99
	Pagi	20.8	21.3	91.1	20,35	99
	Siang	20.9	21.43	90.8	20,5	90
	Sore	21.36	21.51	96.13	20,3	99
	Cerah	20.75	21.13	91.98	20,8	98
	Mendung	21.9	22.38	95.03	21,4	97
	Hujan	22	22.2	95.3	21	98
11	Rata-rata	21.78	22.15	92.92	20,9	96
	Pagi	21.6	22.05	90.85	21,9	94
	Siang	21.84	22.23	92.15	20,7	96
	Sore	21.74	22.06	94.61	21,9	94
	Cerah	21.71	22.04	93.27	21,05	93
	Mendung	21.85	22.18	94.13	20,05	98
	Hujan	22.5	23.5	83.2	22,95	89

4.6 Analisis Kuantitas Udara Aktual

Dengan mengetahui luas bukaan dan kecepatan udara, dapat diketahui debit udara masuk–keluar terowongan. Bentuk bukaan yang berbeda setiap titiknya memberi variasi data pada penelitian ini. Bentuk persegi atau persegi panjang, trapesium dan bentuk *arching* merupakan variasi bentuk dari bukaan pada beberapa titik di terowongan *Lubang Jampang*.

Hukum Kirchoff 1 menyebutkan bahwa kuantitas udara yang meninggalkan *junction* harus setara dengan kuantitas udara yang masuk ke *junction*. Maka berikut adalah debit udara di dalam terowongan *Lubang Jampang* sesuai kondisi.

4.6.1 Cerah

Tabel 14. Kuantitas Udara saat Cerah

Masuk (m ³ /s)		Keluar (m ³ /s)	
p12/titik 9	8,073 2,832862	p1/titik 1	3,560932
p24/ titik 5		p5/titik 11	0,834011
		p14/titik 8	0,459264
		p22/titik 7	4,180024
		p23/titik 6	3,391453
$\Sigma = 10,90586$		$\Sigma = 12,42568$	

4.6.2 Mendung

Tabel 15. Kuantitas Udara saat Mendung

Masuk (m ³ /s)		Keluar(m ³ /s)	
P22/titik 7	6,072035 4,951703 2,24733	p1/titik 1	4,527161
P23/titik 6		p5/titik 11	0,980364
p24/titik 5		p12/titik 9	4,803047
		p14/titik 8	0,556416
$\Sigma = 13,27107$		$\Sigma = 10,86699$	

4.6.3 Hujan

Tabel 16. Kuantitas Udara saat Hujan

Masuk (m ³ /s)		Keluar(m ³ /s)	
P22/titik 7	3,394305 1,734112 1,41312	p1/titik 1	1,367919
P23/titik 6		p5/titik 11	0,529276
p24/titik 5		p12/titik 9	6,101325
		p14/titik 8	0,211968
$\Sigma = 6,541537$		$\Sigma = 8,210488$	

4.6.4 Lengah

Tabel 17. Kuantitas Udara saat Lengah (pagi hari)

Masuk (m ³ /s)		Keluar(m ³ /s)	
p1/titik 1	1,514482 3,092589 6,773875	p5/titik 11	1,984785
P22/titik 7		p12/titik 9	7,836244
p23/titik 6		p14/titik 8	0,52992
		p24/titik 5	3,647031
$\Sigma = 11,38095$		$\Sigma = 13,99798$	

Tabel 18. Kuantitas Udara saat Lengah (sore hari)

Masuk (m ³ /s)		Keluar(m ³ /s)	
p1/titik 1	1,540072 3,900757 3,770145	p5/titik 11	0,759545
P22/titik 7		p12/titik 9	3,692732
p23/titik 6		p14/titik 8	0,666185
		p24/titik 5	2,536511
$\Sigma = 9,210974$		$\Sigma = 7,654974$	

Terjadinya selisih numerik jumlah debit udara masuk dan keluar diakibatkan oleh beberapa faktor eksternal seperti pengambilan data setiap tempat yang membutuhkan waktu 3-5 menit dan perpindahan dari satu titik ke titik lainnya yang membutuhkan waktu yang cukup signifikan serta faktor internal yaitu fluktuasi keluar–masuk pengunjung saat pengambilan data berlangsung.

Serta perubahan cuaca yang menjadikan resistensi udara di dalam atau di luar terowongan yang mengakibatkan udara mengembang saat suhu fluktuatif.

4.7 Kapasitas Penggunaan Udara Terowongan Lubang Japang

Berdasarkan debit udara yang beredar di dalam terowongan *Lubang Japang* dapat diketahui apakah jumlah tersebut memenuhi kebutuhan udara segar yang dibutuhkan manusia untuk bernafas. Dengan membandingkan kuantitas udara yang ada dengan kebutuhan udara per-orang, akan didapat rata-rata individu yang diperbolehkan masuk ke dalam terowongan.

Tabel 19. Penggunaan Udara Terowongan *Lubang Japang*

Kondisi	Kuantitas Udara Aktual (m ³ /s)	Standar Udara untuk Bernapas	Kapasitas Penggunaan (orang)
		Kepmen 555.K 1995 (m ³ /menit)	Kepmen 555.K 1995
Cerah	10,90586	2	327
Mendung	13,27107	2	398
Hujan	6,541537	2	196
Pagi	11,38095	2	341
Sore	9,210974	2	276

4.8 Evaluasi Penggunaan Udara Terowongan Lubang Japang

Dengan melakukan evaluasi pada penggunaan udara aktual (Tabel 20), dapat diketahui status cakupan udara yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan dan keamanan akibat dari udara segar yang tidak tercukupi dengan baik.

Tabel 20. Evaluasi Penggunaan Udara Terowongan *Lubang Japang*

Kondisi	Kapasitas Penggunaan (orang)	Kunjungan Aktual (orang)	Evaluasi Kebutuhan Udara
Cerah	327	311	Cukup
Mendung	398	206	Cukup
Hujan	196	154	Cukup
Pagi	341	67	Cukup
Sore	276	123	Cukup

Berdasarkan hasil evaluasi diketahui udara segar di dalam terowongan *Lubang Japang* telah mencukupi kebutuhan pengunjung di semua cuaca pada siang hari dan pagi serta sore hari.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

1. Apabila diambil *range* maksimal-minimal, secara umum kualitas dan kuantitas udara rata-rata terowongan *Lubang Japang* adalah; 6,5415 m³ hingga 13,271 m³ debit udara per-detiknya; 17,85%, hingga 22,5% temperatur efektif; 77,1052% hingga 94,6% kelembaban, 20,8% hingga 20,9% kandungan O₂ dan 0% kandungan CO₂ serta 95% hingga 100% efisiensi kerja.
2. Apabila data kualitas dan kuantitas udara dihubungkan dengan nilai ambang batas (NAB) Kepmen 555.K/26/M.PE/1995 terdapat angka

Rh yang melebihi batas di Titik 1 hingga Titik 11 pada waktu dan kondisi cuaca tertentu. Selain persentase Rh, temperatur efektif di Titik 9 juga memiliki angka di bawah standar dengan suhu terendah adalah 16,85°C saat pagi. Sementara itu kandungan gas (O₂ dan CO₂) di semua lokasi terowongan *Lubang Japang* berada dalam keadaan aman dan memenuhi standar.

3. Berdasarkan perbandingan debit masuk–keluar udara aktual dengan kebutuhan pernapasan orang per-detik menurut nilai ambang batas (NAB) Kepmen 555.K/26/M.PE/1995 maka didapat kunjungan maksimal adalah 398 orang dalam satuan periode kunjungan. Namun terdapat penurunan kapasitas pada saat hujan dengan batasan 196 orang

5.2 Saran

1. Dengan hasil kajian kualitas dan kuantitas udara di atas, diharapkan otoritas berwenang untuk mempersiapkan dan mempertimbangkan penggunaan ventilasi mekanis di beberapa lokasi untuk mengantisipasi fluktuasi udara segar di dalam terowongan maupun apabila saat terjadi keadaan darurat. Seperti terlihat pada data di atas persentase kelembaban udara memiliki angka yang melebihi nilai ambang batas dan juga angka temperatur efektif yang terlalu rendah di Titik 9.
2. Dibutuhkan kajian lebih lanjut untuk menentukan angka kunjungan ke dalam terowongan *Lubang Japang* yang lebih relevan sesuai kajian yang valid terhadap batasan kunjungan sebagai bahan edukasi pada pengunjung terhadap ketersediaan udara segar per/individu.
3. Saat ini terowongan *Lubang Japang* memiliki 5 (lima) *fan* yang terpasang di antara pintu masuk dan titik pusat terowongan (berdimensi 20 x 30 cm setiap perangkatnya) yang setelah dilakukan kajian membutuhkan tambahan ventilasi mekanis lainnya untuk menghindari terjadinya kekurangan udara segar di saat suatu situasi darurat terjadi. Seperti di beberapa titik pengambilan data jumlah tampungan maksimum dalam satu periode kunjungan berada di bawah di bawah 100 orang, direkomendasikan menggunakan ventilasi tambahan (mekanis).

6. Daftar Pustaka

- [1] *Rekap Kunjungan Wisatawan Tahun 2013 S/D 2017*. Bidang Ekonomi & Kreatif Kota Bukittinggi. (2018)
- [2] D.P. Agung. *Aplikasi Pengukuran Ventilasi Alami*. Sawahlunto: Balai Diklat Tambang Bawah Tanah. (2014)
- [3] H.L. Hartman, R.V. Ramani, J.Y. Mutmansky. *Mine Ventilation and Air Conditioning | Second Edition*. Canada: John Wiley & Son, Inc. Vol.3 , p.7 (1982)
- [4] B. Heriyadi. *Materi Ajar Peranginan Ventilasi Tambang*. Sawahlunto: BDTBT (2002)

- [5] H.L. Hartman, R.V. Ramani, J.Y. Mutmansky. *Mine Ventilation and Air Conditioning / Third Edition*. Canada: John Wiley & Son, Inc. Vol.3 , p.7 (1997)
- [6] Vandeni, Andri. *Analisis Kemampuan Sistem Ventilasi PT. Cahaya Bumi Perdana dalam Mengontrol Kualitas dan Kuantitas Udara yang Sesuai dengan Peraturan Perundang-undangan*. Padang: Universitas Negeri Padang. (2017)
- [7] *Perhitungan Desain Terowongan*. Badan Pembinaan Konstruksi dan Sumber Daya Manusia Pusat Pembinaan Kompetensi dan Pelatihan Konstruksi. Departemen Pekerjaan Umum. (2011)
- [8] Michelle, W. Jessica. *Characterization of air recirculation in multiple fan ventilation systems*. USA. The University of Utah (2012)
- [9] A.M. Latar. *Modul -4 Sistem Ventilasi Pengenceran Udara*. Jakarta: Program Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat FIIK – Unes (2013)
- [10] *Buku Kunjungan Harian Lapangan*. Bagian Taman Panorama dan Lubang Jepang. Bukittinggi. Dinas Pemuda dan Olahraga. (2018)
- [11] Sudjana, I.B. *KEPMEN 555.K/MPE/1995*. Jakarta: Kementerian Pertambangan dan Energi Negara Kesatuan Republik Indonesia (1995)