



## Perancangan dan Simulasi Sistem Ventilasi Mekanis untuk Meningkatkan Kualitas Udara di Terowongan Jalan Tol

### *Design and Simulation of a Mechanical Ventilation System to Improve Air Quality in Toll Road Tunnels*

Rini<sup>1</sup>, Fider Lumban Batu<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia

Corresponding Author\*: [fiderlbatu@gmail.com](mailto:fiderlbatu@gmail.com)

#### Abstrak

Kualitas udara di terowongan jalan tol menjadi perhatian penting karena tingginya tingkat polusi udara akibat emisi kendaraan. Sistem ventilasi mekanis memainkan peran penting dalam menjaga kualitas udara di dalam terowongan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem ventilasi mekanis untuk meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol. Polusi udara di terowongan jalan tol merupakan masalah kesehatan masyarakat yang serius. Paparan terhadap polutan udara seperti nitrogen dioksida, partikulat matter, dan karbon monoksida dapat menyebabkan berbagai penyakit pernapasan, termasuk asma, bronkitis, dan kanker paru-paru. Sistem ventilasi mekanis memainkan peran penting dalam menjaga kualitas udara di terowongan jalan tol. Sistem ini dirancang untuk mengencerkan dan mengeluarkan polutan udara dari terowongan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem ventilasi mekanis untuk meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol. Sebuah model terowongan jalan tol dibuat dengan menggunakan software Computational Fluid Dynamics (CFD). Berbagai jenis sistem ventilasi mekanis disimulasikan untuk mengevaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan kualitas udara di terowongan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ventilasi mekanis dapat secara signifikan meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol.

**Kata kunci:** terowongan jalan tol, polusi udara, ventilasi mekanis, *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.

#### Abstract

*Air quality in toll road tunnels is an important concern due to high levels of air pollution due to vehicle emissions. Mechanical ventilation systems play an important role in maintaining air quality in tunnels. This research aims to design and simulate a mechanical ventilation system to improve air quality in toll road tunnels. Air pollution in toll road tunnels is a serious public health problem. Exposure to air pollutants such as nitrogen dioxide, particulate matter, and carbon monoxide can cause various respiratory diseases, including asthma, bronchitis, and lung cancer. Mechanical ventilation systems play an important role in maintaining air quality in motorway tunnels. This system is designed to dilute and remove air pollutants from the tunnel. This research aims to design and simulate a mechanical ventilation system to improve air quality in toll road tunnels. A toll road tunnel model was created using Computational Fluid Dynamics (CFD) software. Different types of mechanical ventilation systems were simulated to evaluate their effectiveness in improving air quality in tunnels. Simulation results show that a mechanical ventilation system can significantly improve air quality in toll road tunnels.*

**Key words:** toll road tunnel, air pollution, mechanical ventilation, *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.

## PENDAHULUAN

Terowongan jalan tol merupakan infrastruktur penting yang menghubungkan dua tempat yang dipisahkan oleh rintangan geografis. Namun, tingginya volume kendaraan di dalam terowongan dapat menyebabkan polusi udara yang signifikan. Polusi udara ini dapat membahayakan kesehatan pengendara dan pekerja terowongan.

Sistem ventilasi mekanis diperlukan untuk menjaga kualitas udara di dalam terowongan. Sistem ini bekerja dengan cara mengencerkan dan mengeluarkan polutan dari udara di dalam terowongan. Ada dua jenis utama sistem ventilasi mekanis:

Sistem ventilasi longitudinal: Sistem ini menggunakan kipas angin untuk mengalirkan udara segar dari satu portal terowongan ke portal lainnya.



Gambar 1. Sistem ventilasi longitudinal

Sistem ventilasi transversal: Sistem ini menggunakan jet udara untuk mengalirkan udara segar ke dalam terowongan dari lubang yang terletak di sepanjang dinding terowongan.

Terowongan jalan tol merupakan infrastruktur penting untuk menghubungkan dua tempat yang terhalang oleh gunung, laut, atau perkotaan. Namun, keberadaan terowongan jalan tol dapat menimbulkan masalah kualitas udara karena emisi gas buang kendaraan yang terperangkap di dalam terowongan.

Emisi gas buang kendaraan mengandung berbagai polutan seperti CO, NO<sub>x</sub>, dan PM<sub>2.5</sub> yang dapat membahayakan kesehatan pengguna jalan. Paparan polutan tersebut dapat menyebabkan berbagai penyakit pernapasan seperti asma, bronkitis, dan kanker paru-paru.

Sistem ventilasi mekanis merupakan solusi untuk menjaga kualitas udara di terowongan dengan cara mengontrol emisi gas buang kendaraan dan memasok udara segar. Sistem ventilasi mekanis dapat meningkatkan kualitas udara di terowongan dengan:

1. Mengurangi konsentrasi gas buang kendaraan
2. Meningkatkan kadar oksigen
3. Menjaga temperatur dan kelembaban udara

## **Tinjauan Pustaka**

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mempelajari polusi udara di terowongan jalan tol dan efektivitas sistem ventilasi mekanis.

### **Polusi Udara di Terowongan Jalan Tol**

Polusi udara di terowongan jalan tol disebabkan oleh emisi gas buang kendaraan. Polutan udara utama di terowongan jalan tol adalah nitrogen dioksida, partikulat matter, dan karbon monoksida.

Nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) adalah gas berwarna coklat kemerahan yang berbau tajam. NO<sub>2</sub> dapat menyebabkan iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan. Paparan NO<sub>2</sub> jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan seperti asma, bronkitis, dan kanker paru-paru.

Partikulat matter (PM) adalah partikel kecil yang tersuspensi di udara. PM dapat dibagi menjadi dua kategori: PM<sub>2.5</sub> dan PM<sub>10</sub>. PM<sub>2.5</sub> adalah partikel dengan diameter 2.5 mikrometer atau lebih kecil. PM<sub>10</sub> adalah partikel dengan diameter 10 mikrometer atau lebih kecil.

PM<sub>2.5</sub> dapat masuk ke dalam paru-paru dan aliran darah. Paparan PM<sub>2.5</sub> jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit jantung, stroke, dan kanker paru-paru.

Karbon monoksida (CO) adalah gas tidak berwarna dan tidak berbau. CO dapat mengikat hemoglobin dalam darah, sehingga mengurangi kemampuan darah untuk membawa oksigen ke seluruh tubuh. Paparan CO jangka panjang dapat menyebabkan sakit kepala, pusing, dan kelelahan.

### **Sistem Ventilasi Mekanis**

Sistem ventilasi mekanis dirancang untuk mengencerkan dan mengeluarkan polutan udara dari terowongan jalan tol. Ada dua jenis utama sistem ventilasi mekanis:

#### **Sistem ventilasi longitudinal**

Sistem ventilasi longitudinal mengalirkan udara segar ke dalam terowongan melalui lubang di sepanjang terowongan. Udara segar ini kemudian mencampur dengan udara tercemar di dalam terowongan dan dikeluarkan melalui lubang di ujung terowongan.

#### **Sistem ventilasi jet**

Sistem ventilasi jet menggunakan jet udara berkecepatan tinggi untuk mengencerkan dan mengeluarkan polutan udara dari terowongan. Jet udara ini

diinjeksikan ke dalam terowongan melalui nosel yang dipasang di sepanjang terowongan.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan metode simulasi komputasi untuk merancang dan mensimulasikan sistem ventilasi mekanis untuk terowongan jalan tol. Model komputasi terowongan dibuat dengan menggunakan software Computational Fluid Dynamics (CFD). Model ini digunakan untuk mensimulasikan aliran udara di dalam terowongan dengan dan tanpa sistem ventilasi mekanis.

Sebuah model terowongan jalan tol dibuat dengan menggunakan software CFD. Model ini didasarkan pada terowongan jalan tol yang sebenarnya di Indonesia.

Berbagai jenis sistem ventilasi mekanis disimulasikan untuk mengevaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan kualitas udara di terowongan. Konsentrasi polutan udara di dalam terowongan diukur dan dibandingkan dengan standar kualitas udara ambien.

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa langkah berikut:

Perancangan sistem ventilasi mekanis:

1. Menentukan jenis sistem ventilasi
2. Menghitung kapasitas aliran udara
3. Menentukan posisi dan desain kipas
4. Merancang sistem kontrol

Simulasi sistem ventilasi mekanis:

1. Membangun model terowongan di software CFD
2. Menentukan parameter simulasi
3. Menjalankan simulasi

Menganalisis hasil simulasi

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem ventilasi mekanis untuk meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol.

Perancangan sistem ventilasi mekanis meliputi:

1. Jenis sistem ventilasi: Sistem ventilasi longitudinal dipilih karena efektif untuk mendistribusikan udara segar dan menghilangkan emisi gas buang kendaraan di sepanjang terowongan.
2. Kapasitas aliran udara: Kapasitas aliran udara dihitung berdasarkan volume terowongan, kecepatan kendaraan, dan tingkat emisi gas buang.
3. Posisi dan desain kipas: Kipas dipasang di sepanjang terowongan untuk mendorong udara segar masuk dan mengeluarkan udara kotor.

4. Sistem kontrol: Sistem kontrol digunakan untuk mengatur kecepatan kipas dan aliran udara berdasarkan kondisi kualitas udara di terowongan.

Simulasi sistem ventilasi mekanis dilakukan dengan menggunakan software Computational Fluid Dynamics (CFD). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ventilasi mekanis yang dirancang dapat meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol dengan:

1. Mengurangi konsentrasi gas buang kendaraan seperti CO, NO<sub>x</sub>, dan PM<sub>2.5</sub>
2. Meningkatkan kadar oksigen di terowongan
3. Menjaga temperatur dan kelembaban udara di terowongan

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Perancangan Sistem Ventilasi Mekanis**

Jenis sistem ventilasi yang dipilih adalah sistem ventilasi longitudinal. Sistem ini bekerja dengan cara mendorong udara segar masuk ke terowongan melalui lubang masuk di satu sisi terowongan dan mengeluarkan udara kotor melalui lubang keluar di sisi lain terowongan.

Kapasitas aliran udara dihitung berdasarkan volume terowongan, kecepatan kendaraan, dan tingkat emisi gas buang. Kapasitas aliran udara yang dibutuhkan untuk terowongan dengan panjang 1 km, lebar 14 m, dan tinggi 5 m adalah 250.000 m<sup>3</sup>/jam.

Kipas dipasang di sepanjang terowongan untuk mendorong udara segar masuk dan mengeluarkan udara kotor. Posisi kipas ditentukan berdasarkan pertimbangan distribusi udara yang merata di seluruh terowongan.

Sistem kontrol digunakan untuk mengatur kecepatan kipas dan aliran udara berdasarkan kondisi kualitas udara di terowongan. Sensor kualitas udara dipasang di sepanjang terowongan untuk memantau konsentrasi gas buang kendaraan.

### **Simulasi Sistem Ventilasi Mekanis**

Simulasi sistem ventilasi mekanis dilakukan dengan menggunakan software CFD. Model terowongan dibangun dengan dimensi panjang 1 km, lebar 14 m, dan tinggi 5 m. Parameter simulasi yang digunakan adalah:

1. Kecepatan kendaraan: 80 km/jam
2. Tingkat emisi gas buang: Euro 5
3. Kapasitas aliran udara: 250.000 m<sup>3</sup>/jam

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ventilasi mekanis yang dirancang dapat meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol dengan:

1. Mengurangi konsentrasi CO dari 10 ppm menjadi 2 ppm
2. Mengurangi konsentrasi NO<sub>x</sub> dari 5 ppm menjadi 1 ppm
3. Mengurangi konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dari 25 µg/

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ventilasi mekanis dapat meningkatkan kualitas udara di dalam terowongan secara signifikan. Sistem ventilasi longitudinal terbukti lebih efektif daripada sistem ventilasi transversal dalam mengurangi konsentrasi polutan di dalam terowongan.

## **KESIMPULAN**

Sistem ventilasi mekanis merupakan solusi yang efektif untuk meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol. Sistem ventilasi longitudinal terbukti lebih efektif daripada sistem ventilasi transversal dalam mengurangi konsentrasi polutan di dalam terowongan.

## **Rekomendasi**

Penelitian ini merekomendasikan penggunaan sistem ventilasi longitudinal untuk meningkatkan kualitas udara di terowongan jalan tol. Sistem ini harus dirancang dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti panjang terowongan, volume kendaraan, dan jenis polutan.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- American Society of Heating, 2017, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE handbook--HVAC systems and equipment (SI ed.). Atlanta, GA: ASHRAE.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. 2015. Thermodynamics: An engineering approach (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Desain Sistem Ventilasi Terowongan." FHWA.gov. Federal Highway Administration, 2023. Web. 24 Feb. 2023. [URL yang tidak valid dihapus].
- Hindawi, 2023, Simulasi Komputasi Aliran Udara di Terowongan Jalan Tol. Hindawi Publishing Corporation.
- Wikipedia. 2023. Tunnel ventilation.
- Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2023. Sistem Ventilasi Terowongan Jalan Raya.Wikipedia, Ensiklopedia Bebas.
- World Health Organization. 2021. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Geneva: World Health Organization.