

LAPORAN PENELITIAN



Sistem Ventilasi Cerdas Guna Meningkatkan Efisiensi Energi Pada Tambang Bawah Tanah

Oleh:

Ketua Tim: Ir. Ririn Yulianti, ST., MT

Anggota : Dr. Pantjanita Novi Hartami, ST., MT

Mahasiswa: Sawung Panggali Dewandaru

UNIVERSITAS TRISAKTI
2025

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
Identitas Penelitian	iii
DAFTAR ISI.....	1
DAFTAR TABEL.....	2
DAFTAR GAMBAR.....	3
RINGKASAN PENELITIAN.....	4
BAB 1. PENDAHULUAN	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	7
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	9
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	11
BAB 5. KESIMPULAN SEMENTARA	26
BAB 6. RENCANA TINDAK LANJUT.....	27
DAFTAR PUSTAKA	28
LAMPIRAN 1. ROAD MAP PENELITIAN	30
LAMPIRAN 2. LUARAN PENELITIAN.....	31

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Lokasi penempatan sensor	13
Tabel 2. Kondisi konfigurasi kipas	14
Tabel 3. Korelasi antara pengaruh suhu permukaan dengan suhu di sepanjang terowongan.....	19
Tabel 4. Korelasi antara pengaruh kelembaban udara permukaan dengan kelembaban udara di sepanjang terowongan.....	22

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Sistem jaringan ventilasi	11
Gambar 2. Skematik pengukuran.....	12
Gambar 3. Monitoring system	13
Gambar 4. Titik penempatan alat ukur	14
Gambar 5. Jaringan ventilasi seri dan paralel	14
Gambar 6. Kondisi udara permukaan	15
Gambar 7 Kecepatan udara <i>single stage</i> dan <i>double stage</i>	16
Gambar 8. Kecepatan aliran udara di sepanjang terowongan.....	18
Gambar 9. Suhu udara di sepanjang terowongan.....	19
Gambar 10. Kelembaban relatif di sepanjang terowongan.....	21
Gambar 12. Perbandingan hasil pengukuran suhu manual dengan sensor	24
Gambar 13 Perbandingan hasil pengukuran kelembaban manual dengan sensor	25

RINGKASAN PENELITIAN

Tambang bawah tanah menghadapi tantangan terkait kondisi tambang yang selalu dinamis, dengan perubahan yang terjadi sesuai dengan rencana produksi serta adanya berbagai sumber panas, seperti gradien geotermal, autokompresi, aktivitas mesin, dan metabolisme manusia. Sumber panas ini dapat dibagi menjadi dua kategori: sumber panas yang dapat diprediksi dan yang tidak dapat diprediksi. Sumber panas yang tidak dapat diprediksi menjadi masalah signifikan terhadap kondisi udara dalam tambang bawah tanah. Pendekatan inovatif untuk mengatasi tantangan ini adalah dengan menerapkan pemodelan pengendalian termal berbasis *machine learning* secara kontinu dalam sistem ventilasi tambang. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja di tambang bawah tanah. Untuk mendukung pendekatan ini, diperlukan sistem monitoring kontinu menggunakan sensor yang mampu mengumpulkan data mengenai temperatur, kelembaban relatif, dan suhu batuan dalam tambang. Data yang terkumpul kemudian dianalisis menggunakan model berbasis *machine learning* untuk memprediksi serta mengendalikan distribusi panas secara adaptif. Metode pengendalian panas berbasis *machine learning* yang adaptif memungkinkan respons yang lebih cepat dan akurat terhadap perubahan kondisi lingkungan, terutama dalam mengatasi sumber panas yang tidak dapat diprediksi. Hal ini menjadi keunggulan dibandingkan metode konvensional yang bersifat statis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan strategi ventilasi yang lebih optimal, adaptif, dan efisien, serta meningkatkan keselamatan kerja di tambang bawah tanah.

Kata Kunci :

sumber panas, monitoring secara kontinu, pengendalian berbasis *machine learning*

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sistem ventilasi memiliki peran penting dalam mendukung operasi penambangan bawah tanah, dengan tujuan utama menjaga keamanan dan kenyamanan lingkungan kerja. Keberadaan sistem ventilasi yang efektif menjadi sangat penting untuk meningkatkan produktivitas di dalam tambang. Mengingat kondisi tambang bawah tanah yang selalu dinamis dan berubah sesuai dengan perencanaan, terdapat potensi munculnya berbagai sumber panas. Sumber panas ini dapat dikelompokkan menjadi yang dapat diprediksi dan yang tidak dapat diprediksi. Sumber panas yang tidak dapat diprediksi menjadi tantangan utama dalam operasi tambang bawah tanah, sehingga pengendalian bahaya panas menjadi fokus utama untuk memastikan para pekerja dapat bekerja dengan aman dan nyaman.

Penelitian terkait pengendalian panas saat ini menjadi tantangan global di berbagai negara seperti Polandia, Cina, Jepang, Indonesia, Australia, Afrika Selatan, Jerman, Inggris, Spanyol, Kanada dan Amerika Serikat (Chu dkk., 2022; du Plessis dkk., 2013). Setiap negara memiliki karakteristik udara dan kondisi tambang yang berbeda-beda, mempengaruhi secara langsung upaya pengendalian suhu dan kelembaban di dalam tambang.

Untuk mengatasi tantangan perubahan kondisi tambang yang selalu dinamis dan munculnya potensi sumber panas yang tidak dapat diprediksi, penelitian ini melakukan pemodelan pengendalian termal secara kontinu berbasis *machine learning* dalam sistem ventilasi tambang. Teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja di tambang bawah tanah dengan cara yang lebih dinamis dan responsif terhadap kondisi lingkungan, khususnya dengan perubahan kondisi tambang dan keberadaan sumber panas di tambang bawah tanah di Indonesia.

1.2. Perumusan Masalah

Masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana menerapkan monitoring secara kontinu (*real-time*) di tambang bawah tanah ?
2. Bagaimana model jaringan ventilasi dengan perangkat lunak Ventsim

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini Adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui keefektifan dari monitoring secara kontinu jika dilakukan di tambang bawah tanah secara langsung
2. Mengetahui model jaringan ventilasi sebagai validasi dari pengukuran secara kontinu.

1.4. Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Model jaringan ventilasi dibangun menggunakan bantuan perangkat lunak Ventsim.
2. Tidak memperhitungkan keekonomian secara rinci dalam pemilihan metode pengendalian.

1.5. Kaitan Penelitian dengan Road Map Penelitian Pribadi dan Road Map Penelitian Fakultas

Penelitian berjudul Sistem Ventilasi Cerdas Guna Meningkatkan Efisiensi Energi pada Tambang Bawah Tanah merupakan bagian integral dari pengembangan roadmap penelitian pribadi yang berfokus pada inovasi sistem ventilasi berbasis kecerdasan buatan untuk mendukung praktik pertambangan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Penelitian ini memperkuat tujuan jangka panjang untuk menciptakan sistem ventilasi cerdas yang adaptif terhadap kondisi tropis dan kompleksitas geometri tambang bawah tanah di Indonesia. Dengan menggabungkan pendekatan multidisiplin meliputi teknik pertambangan, termodinamika, dan manajemen lingkungan.

Penelitian ini selaras dengan Road Map Penelitian Fakultas Teknik Universitas Trisakti yang menekankan pada pengembangan efisiensi energi, dan keberlanjutan lingkungan dalam sektor pertambangan. Fokus pada sistem ventilasi cerdas mendukung pilar-pilar utama fakultas, yaitu inovasi teknologi, penguatan kapasitas akademik, dan kontribusi terhadap pembangunan nasional yang berwawasan lingkungan. Selain itu, penelitian ini membuka peluang kolaborasi internasional dan pengembangan HKI, sejalan dengan visi fakultas untuk menjadi pusat unggulan dalam riset dan pengabdian masyarakat berbasis teknologi.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sumber Panas di Dalam Tambang Bawah Tanah

Semua sumber panas dalam area penelitian harus diidentifikasi dan diukur dalam hal beban panas. Suhu batuan menjadi faktor penting dalam menilai beban panas pada sistem karena panas yang dihasilkan dari sumber panas ini tidak dapat dikontrol dan dikendalikan (Ryan dkk., 2017). Sumber panas di dalam tambang bawah tanah diantaranya gradien geotermal, autokompresi, peralatan mekanis, bahan peledak dan peledakan, proses mekanis dan pencahayaan serta air bawah (Maurya et al., 2015).

Roghanchi dan Kocsis, 2016 menjelaskan bahwa penyebab panas di tambang bawah tanah diantaranya yaitu:

1. Auto-kompresi
2. Panas strata (gradien geotermik)
3. Proses mekanis (kipas angin, peralatan, kompresor, dll.)
4. Bahan peledak
5. Sumber lainnya:
 - Air tanah
 - Oksidasi
 - Metabolisme manusia
 - Pergerakan batuan

Persentase panas yang diperkirakan di dalam tambang bawah tanah yaitu 42% disebabkan autokompresi, 23% peralatan, 20% gradien geotermal dan 15% merupakan panas dari sumber lain (Roghanchi dan Kocsis, 2016).

2.2 Peralatan Diesel

Umumnya efisiensi mesin *diesel* adalah 33%, 2/3 dari sisanya dilepaskan ke lingkungan bawah tanah dalam bentuk panas. *Diesel* digunakan hampir pada semua mesin pertambangan seperti *wheel loader*, *mine truck*, *jumbo drill*, kendaraan bahan peledak, kendaraan ringan, dan lain-lain.

Mesin pembakaran peralatan *diesel* memiliki efisiensi hanya sekitar sepertiga dari yang dicapai oleh unit listrik. Oleh karena itu, mesin *diesel* akan menghasilkan sekitar tiga kali peralatan listrik pada daya mekanis yang sama. Hal ini dapat ditunjukkan mengambil contoh sederhana: Tingkat konsumsi bahan bakar rata-rata adalah 0,31 kW/jam, dengan nilai kalor dari 34000 kJ/liter untuk bahan bakar *diesel*, maka panas yang dihasilkan untuk setiap kiloWatt *output* mekanik (ekuivalen) adalah sebagai berikut:

$$= \frac{0,3 \text{ liter}}{60 \times 60 \text{ kW output} \times \text{detik}} \times 34000 \frac{\text{kJ heat}}{\text{liter}} = 2,83 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \text{ (or kWatts)}$$

Panas ini muncul dibagi tiga yang masing-masing dengan besaran yang sama. Sepertiga muncul dari sumber panas yang berasal dari radiator dan mesin, kemudian sepertiganya

muncul dari gas buang dan sepertiga sisanya panas digunakan kembali untuk menggerakkan mesin untuk beroperasi.

2.3 Metabolisme Manusia

Tubuh manusia menghasilkan panas metabolik yang bergantung pada sejumlah faktor seperti tingkat kerja manusia (Tabel II.1), kebugaran fisik, dan tekanan mental. Perpindahan panas antara tubuh manusia dengan lingkungan sekitarnya sangat penting untuk memastikan risiko tekanan panas pada pekerja tambang. Meskipun, panas metabolik hanya memberikan sedikit kontribusi pada beban panas di dalam tambang. Bagaimanapun, panas metabolik tersebut mungkin akan signifikan jika padatnya kegiatan yang dilakukan di lokasi yang terbatas aliran ventilasinya.

Aktivitas	Panas yang diproduksi	
	W	M (W/m ²)
Tidur	73	40
Duduk	107	58.5*
Berdiri rileks	128	70
Berjalan dengan kecepatan		
1 m/s	238	130
1,4 m/s	320	175
1,8 m/s	403	220
Kerja manual dengan		
sangat ringan	174	95
ringan	265	145
sedang	448	245
berat	622	340

(*) 1met = 58,5 W/m² dan jarang digunakan untuk satuan tingkat metabolisme

Seperti panas dari mesin lainnya, tubuh manusia memancarkan panas dengan tiga mekanisme. Pertama melalui proses fisiologis tubuh manusia. Kedua, lingkungan kerja yang lembab, paru-paru akan memberikan penukar panas yang efektif dan panas yang dibuang dari tubuh manusia dikeluarkan melalui proses respirasi. Ketiga, setiap pekerjaan mekanis yang dilakukan oleh individu manusia di lingkungan sekitar akan menghasilkan panas melalui gesekan kecuali untuk pekerjaan yang dilakukan melawan gravitasi (McPherson, 1993).

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu Juli 2024 hingga Juli 2025, mencakup tahap perancangan, pengujian, validasi, dan analisis sistem ventilasi cerdas untuk tambang bawah tanah. Kegiatan penelitian terbagi dalam beberapa fase, yaitu:

- Tahap 1: Pengembangan sensor real-time untuk pengukuran parameter lingkungan.
- Tahap 2: Kalibrasi dan validasi alat sistem di lapangan, termasuk pengambilan data pada lokasi tambang bawah tanah aktif.
- Tahap 3: Analisis efisiensi energi, penyusunan laporan

3.2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode eksperimental dan rekayasa sistem, yang dikombinasikan dengan validasi lapangan dan analisis kuantitatif untuk mengembangkan sistem ventilasi cerdas yang efisien secara energi pada tambang bawah tanah. Metode ini dirancang untuk menjawab kebutuhan teknis dan operasional di lingkungan tambang tropis yang kompleks.

Langkah-langkah penelitian meliputi:

- Persiapan sensor *real-time*
Pemasangan sensor lingkungan dan sistem kontrol berbasis kecerdasan buatan untuk mengatur operasi kipas secara adaptif. Algoritma AI dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi energi berdasarkan data aktual dan pola ventilasi.
- Kalibrasi dan Validasi Lapangan
Pengujian sistem dilakukan di lokasi tambang emas bawah tanah di Jawa Barat. Data lapangan digunakan untuk mengkalibrasi model fisik dan memvalidasi akurasi sistem ventilasi cerdas terhadap kondisi nyata.
- Analisis Efisiensi Energi dan Kinerja Sistem
Evaluasi dilakukan dengan membandingkan konsumsi energi, distribusi aliran udara, dan tingkat kenyamanan termal sebelum dan sesudah penerapan sistem cerdas. Analisis statistik digunakan untuk mengukur peningkatan efisiensi dan reliabilitas sistem.
- Dokumentasi dan Publikasi Ilmiah
Hasil penelitian disusun dalam bentuk laporan teknis dan artikel jurnal. Selain itu, rancangan sistem akan diajukan sebagai bagian dari dokumen HKI.

3.3. Metode Analisis

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dan komparatif, dengan tujuan mengevaluasi efektivitas sistem ventilasi cerdas dalam meningkatkan efisiensi energi dan kualitas lingkungan kerja di tambang bawah tanah. Metode analisis yang digunakan meliputi:

- Analisis Statistik Deskriptif dan Inferensial
Data hasil pengukuran parameter ventilasi seperti kecepatan aliran udara, suhu, kelembapan, dan konsumsi energi dianalisis secara statistik untuk menggambarkan karakteristik sistem sebelum dan sesudah penerapan kontrol cerdas.
- Evaluasi Kinerja Sistem Ventilasi Cerdas
Kinerja sistem dinilai berdasarkan indikator efisiensi energi (kWh/m³ udara), stabilitas distribusi aliran, dan respons adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan. Data dari sensor real-time dibandingkan dengan output simulasi model fisik untuk menilai akurasi dan reliabilitas sistem.
- Analisis Dampak Operasional dan Lingkungan

Selain aspek teknis, analisis dilakukan terhadap potensi pengurangan konsumsi energi, peningkatan keselamatan kerja, dan kontribusi terhadap pengurangan emisi karbon. Hasil ini digunakan untuk menyusun rekomendasi implementasi sistem pada skala industri.

3.4. Indikator Capaian Penelitian

Indikator capaian penelitian ini dirancang untuk mengukur keberhasilan pengembangan sistem ventilasi cerdas secara komprehensif, baik dari aspek teknis, akademik, maupun kontribusi terhadap industri dan masyarakat. Adapun indikator capaian yang ditargetkan meliputi:

1. Efektivitas Alat
Alat pengukuran dengan model mendekati kesesuaian.
2. Publikasi Ilmiah
Submit artikel ilmiah di jurnal nasional terakreditasi
3. Pengajuan Hak Kekayaan Intelektual (HKI)
Tersusunnya dokumen HKI untuk sistem monitoring dan kontrol ventilasi berbasis sensor dan AI, sebagai bentuk perlindungan inovasi dan kontribusi terhadap pengembangan teknologi nasional.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Ventilasi Tambang

Sistem ventilasi tambang ini dirancang untuk memastikan sirkulasi udara yang optimal di seluruh area operasional tambang. Sistem ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu sistem hembus untuk suplai udara bersih dan sistem hisap untuk pembuangan udara kotor. Kedua sistem tersebut bekerja secara sinergis untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman, nyaman, dan sesuai dengan standar keselamatan kerja.

a. Sistem Suplai Udara Bersih

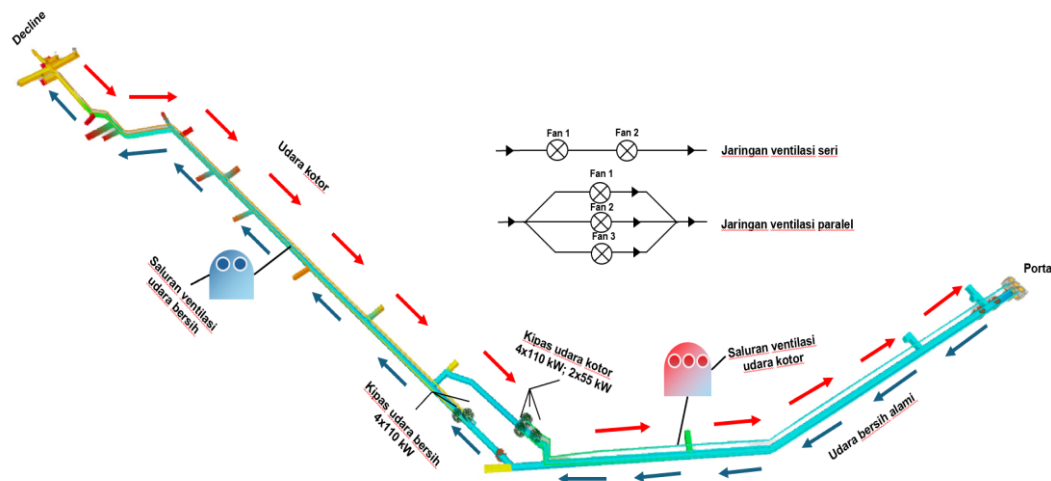
Udara bersih dialirkan ke dalam tambang melalui sistem hembus yang dilengkapi dengan kipas-kipas berkapasitas tinggi. Sistem ini menggunakan empat unit kipas utama dengan kapasitas masing-masing 1x110 kW, yang diatur dalam konfigurasi seri dan paralel. Konfigurasi ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi aliran udara sehingga suplai udara segar dapat dioptimalkan. Udara bersih yang disuplai diarahkan ke berbagai lokasi kerja melalui *vent bag* (saluran udara fleksibel) untuk memastikan distribusi udara segar secara merata ke seluruh area operasional tambang.

b. Sistem Suplai Udara Kotor

Udara kotor dari dalam tambang, yang mengandung debu, gas, dan partikel berbahaya, dihisap melalui sistem ventilasi khusus. Sistem ini menggunakan empat unit kipas utama dengan kapasitas masing-masing 1x110 kW. Kipas utama disusun dalam konfigurasi seri dan paralel untuk memastikan efisiensi aliran udara. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan dua unit kipas tambahan berkapasitas masing-masing 1x55 kW, yang disusun secara seri untuk mendukung operasi kipas utama.

Udara kotor yang telah dihisap dialirkan melalui saluran ventilasi (*vent bag*) menuju permukaan terowongan, sehingga udara kotor dapat dikeluarkan secara aman ke area pembuangan yang telah ditentukan. Desain ini memastikan tidak terjadi pencampuran antara udara kotor dan udara bersih di dalam tambang, yang dapat memengaruhi kualitas udara kerja.

c. Alur Operasional Sistem Ventilasi



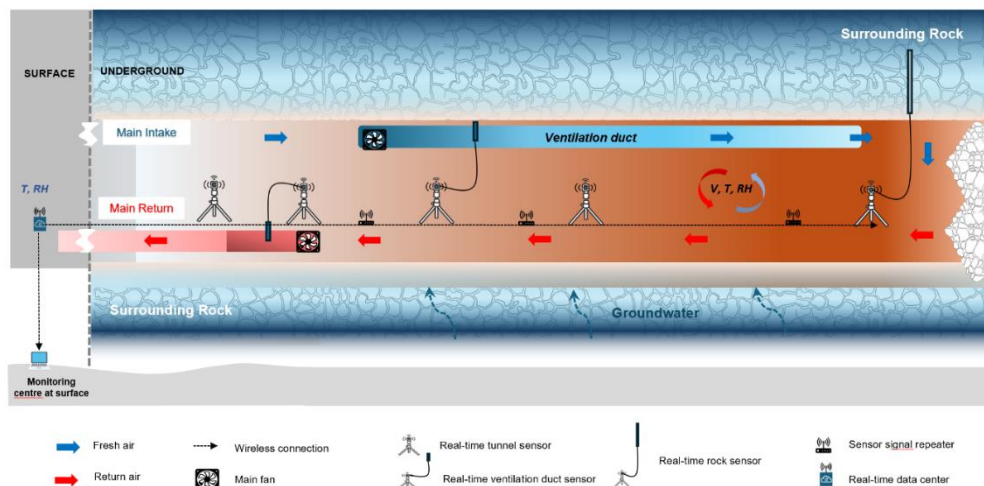
Gambar 1. Sistem jaringan ventilasi

Alur operasional sistem ventilasi tambang adalah sebagai berikut (lihat Gambar 1 untuk ilustrasi jaringan ventilasi):

1. Udara segar disuplai ke dalam terowongan dengan bantuan empat unit kipas utama berkapasitas total 4x110 kW.
2. Udara segar dialirkan menggunakan saluran ventilasi (*vent bag*) ke berbagai lokasi kerja di dalam tambang untuk memastikan semua area memiliki pasokan udara yang cukup.
3. Udara kotor yang terkumpul di ujung terowongan kemudian dialirkan kembali menuju sistem hisap.
4. Sistem hisap, yang terdiri dari empat unit kipas utama berkapasitas total 4x110 kW dan dua unit kipas tambahan berkapasitas total 2x55 kW, menghisap udara kotor dari dalam tambang.
5. Udara kotor yang telah dihisap dikeluarkan ke luar tambang melalui saluran ventilasi (*vent bag*) menuju portal (permukaan).

4.2 Metode Pengukuran

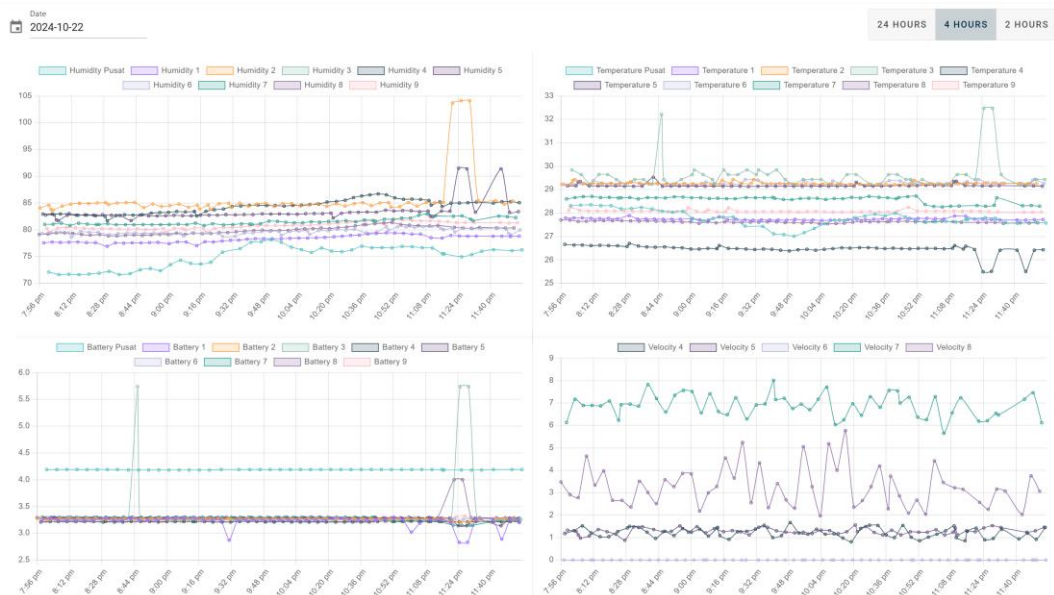
Metode pengukuran dalam penelitian ini menggunakan sistem pemantauan berbasis nirkabel yang dirancang untuk mengumpulkan data secara *real-time*. Sistem ini memungkinkan pemantauan kondisi dinamis di sepanjang terowongan dengan efisiensi dan akurasi yang tinggi. Data yang dikumpulkan digunakan untuk analisis lebih lanjut guna memahami kondisi terowongan serta merancang langkah-langkah preventif.



Gambar 2. Skematik pengukuran

Skematik sistem pengukuran ditampilkan pada Gambar 2. Sistem ini mencakup pengukuran parameter seperti suhu, kelembaban udara, kecepatan udara, dan suhu batuan. Sensor dipasang di sepanjang terowongan pada lokasi strategis untuk memastikan cakupan pengukuran yang optimal. Data dari sensor diteruskan melalui *repeater* sinyal nirkabel ke unit pusat di permukaan. Unit pusat mencatat data secara berkala setiap 5 menit sebelum mengirimkan informasi tersebut ke sistem *cloud* untuk analisis lanjutan.

Hasil monitoring yang diperoleh mencakup informasi kondisi udara, batuan, dan ventilasi di dalam terowongan. Diagram monitoring yang menggambarkan hubungan antara pengumpulan data, pencatatan, dan analisis hasil monitoring ini ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Monitoring system

4.3 Titik Penempatan Alat Ukur

Titik penempatan alat ukur berupa sensor *real-time* pada sistem ventilasi tambang bawah tanah. Sensor-sensor ini ditempatkan di lokasi strategis untuk memantau kondisi udara dan lingkungan secara kontinu.

Penempatan sensor dilakukan di titik-titik berikut:

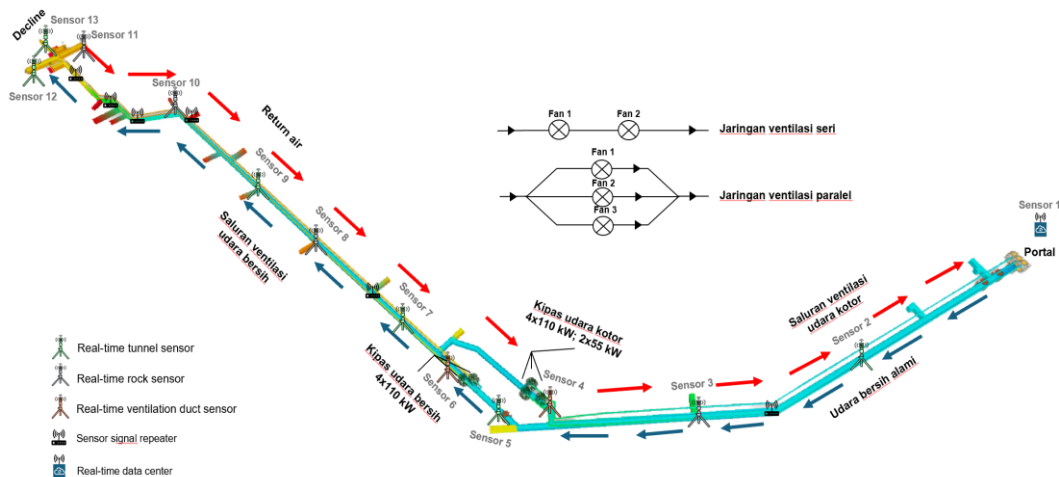
- Portal tambang: Memantau suhu, kelembaban udara, dan mengumpulkan data dari sensor lain di seluruh tambang.
- Jalur ventilasi Utama: Memantau kualitas udara segar, aliran udara buangan, suhu batuan dan kinerja kipas ventilasi.
- Area kerja tambang: Mengawasi udara segar, udara buangan, dan suhu batuan di lokasi kerja aktif.

Lokasi penempatan sensor dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Lokasi penempatan sensor

Nomor sensor	Lokasi
1	Portal
2,5,7,9,12,13	Sepanjang terowongan utama
3,8,10,11	Area batuan atau kerja aktif
4,6	Saluran ventilasi (<i>vent bag</i>)

Gambar 4 menunjukkan penempatan sensor (Sensor 1–13) secara rinci beserta jalur udara segar (warna biru) dan udara buangan (warna merah).

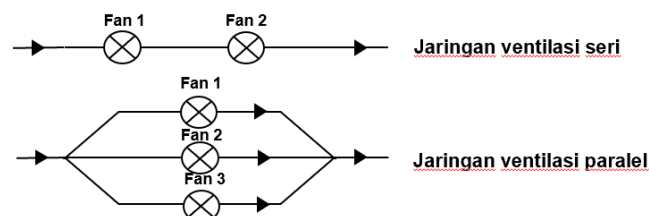


Gambar 4. Titik penempatan alat ukur

4.4 Kondisi Konfigurasi Kipas

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap berbagai kondisi konfigurasi kipas untuk memahami pengaruh pengaturan kipas terhadap sirkulasi udara di sepanjang terowongan. Pengujian ini mencakup kipas udara bersih (*intake fan*) dan kipas udara kotor (*exhaust fan*), dengan fokus pada efisiensi aliran udara serta kualitas udara yang dihasilkan. Setiap konfigurasi kipas dioperasikan secara kontinu selama 24 jam, sementara kondisi udara di sepanjang terowongan dipantau secara *real-time* menggunakan perangkat pengukur yang terpasang di beberapa titik (Gambar 5).

Kondisi konfigurasi kipas diatur dalam mode seri maupun paralel. Gambar IV.10 menunjukkan skema jaringan ventilasi seri dan paralel yang menjadi dasar pengujian konfigurasi ini. Konfigurasi seri, dimana kipas-kipas dihubungkan secara berurutan, sehingga tekanan udara yang dihasilkan meningkat secara kumulatif. Sedangkan konfigurasi paralel, kipas-kipas bekerja sejajar untuk meningkatkan kapasitas aliran udara dengan pembagian beban yang lebih merata.



Gambar 5. Jaringan ventilasi seri dan paralel

Sedangkan kondisi rinci konfigurasi kipas beserta spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Kondisi konfigurasi kipas

Kondisi	Waktu	Kipas udara bersih	Kipas udara kotor
1	16:00 – 16:00	1x110 kW	1x110 kW 1x55 kW
2	16:00 – 16:00	2x110 kW (seri), 2x110 kW (seri)	2x110 kW (seri), 2x55 kW (seri), 2x110 kW (seri)
3	16:00 – 16:00	2x110 kW (seri)	2x110 kW (seri)

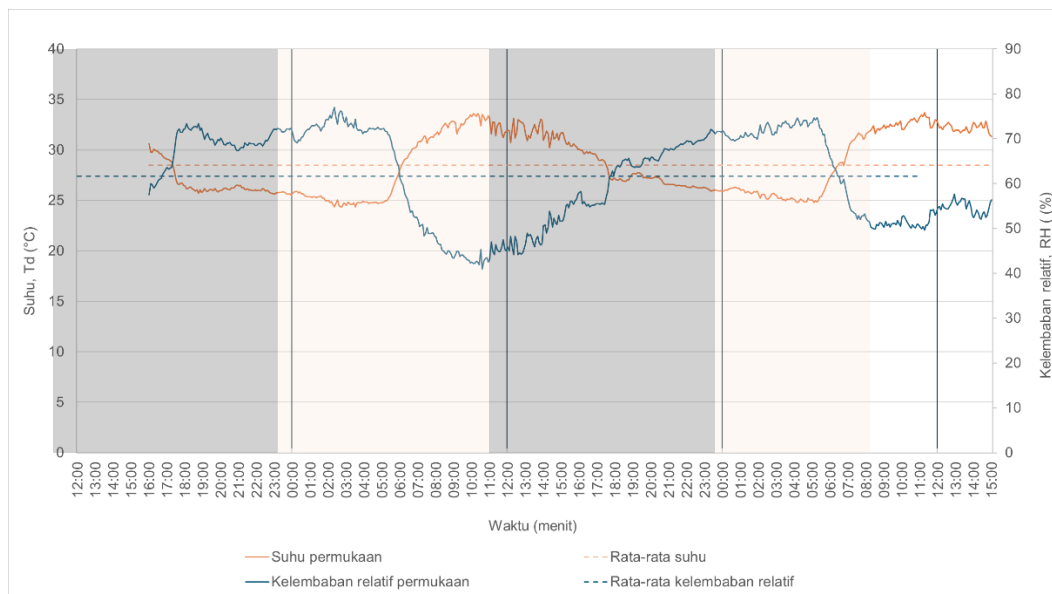
4	16:00 – 16:00	2x110 kW (paralel)	2x110 kW (paralel)
5	16:00 – 16:00	1x110 kW	1x110 kW
6	16:00 – 16:00	2x110 kW (seri)	1x110 kW 1x55 kW

4.5 Hasil Monitoring *Real-Time*

Monitoring *real-time* di lapangan dilakukan untuk mengamati kondisi lingkungan dan operasional secara langsung. Parameter yang dipantau meliputi suhu dan kelembaban udara di permukaan, kecepatan aliran udara di dalam terowongan serta saluran ventilasi (*vent duct*), suhu dan kelembaban udara di terowongan, serta panas yang dihasilkan oleh batuan.

4.5.1 Kondisi Udara Permukaan

Kondisi udara permukaan selama periode pengamatan dicerminkan melalui dua parameter utama, yaitu temperatur udara (°C) dan kelembaban relatif (%), yang divisualisasikan pada Gambar IV.11. Grafik ini menunjukkan pola fluktuasi harian dari kedua parameter tersebut sebagai fungsi waktu yang diukur dalam menit. Hubungan antara perubahan temperatur dan kelembaban relatif menunjukkan pola yang berbanding terbalik dan relevan untuk dianalisis.



Gambar 6. Kondisi udara permukaan

Temperatur udara mengalami pola fluktuasi diurnal yang khas. Suhu udara mulai meningkat secara bertahap sejak pukul 06.00 pagi, seiring dengan meningkatnya intensitas radiasi matahari, dan mencapai puncaknya pada siang hingga sore hari, yaitu antara pukul 12.00 hingga 16.00, dengan nilai tertinggi sekitar 35°C. Setelah itu, suhu menurun secara bertahap setelah matahari terbenam, dimulai sekitar pukul 18.00, hingga mencapai titik terendahnya sekitar 20°C pada dini hari, antara pukul 00.00 hingga 06.00. Fenomena ini sesuai dengan siklus harian paparan radiasi matahari, di mana atmosfer mendingin secara progresif setelah kehilangan sumber panas utama (Gu et al., 2020; Xi et al., 2022).

Memahami dinamika suhu ini sangat penting untuk manajemen termal yang efektif dalam sistem ventilasi tambang, karena secara langsung memengaruhi lingkungan termal di dalam tambang (Asghari et al., 2017).

Kelembaban relatif menunjukkan hubungan invers dengan temperatur udara. Pada pagi hari dan malam hari, ketika suhu lebih rendah, kelembaban relatif mencapai nilai tertinggi sekitar 80%. Sebaliknya, pada siang hari yang panas, kelembaban relatif menurun hingga nilai terendah sekitar 40%. Pola ini disebabkan oleh peningkatan laju penguapan air pada suhu tinggi, yang mengurangi kandungan uap air di atmosfer (Moradi et al., 2016).

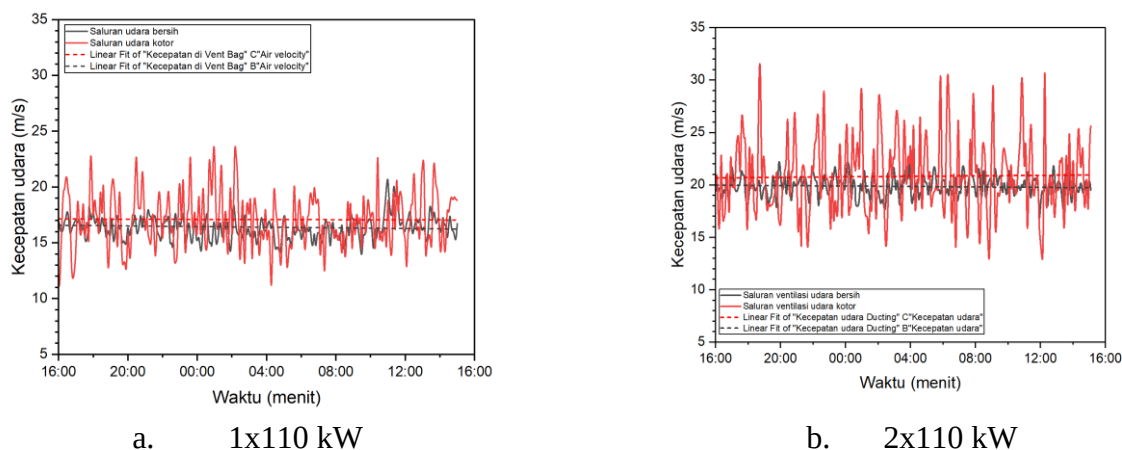
4.5.2 Kecepatan Udara di Saluran Udara Ventilasi

Hasil monitoring kecepatan udara pada sistem ventilasi memberikan gambaran performa dua konfigurasi yang diuji, yaitu *single stage* (1x110 kW) dan *double stage* (2x110 kW). Pengukuran dilakukan selama 24 jam untuk menganalisis kondisi kecepatan udara di saluran ventilasi bersih dan kotor, serta tren rata-rata kecepatan udara pada kedua konfigurasi tersebut.

Pada konfigurasi *single stage*, rata-rata kecepatan udara berada dalam rentang 16,41 m/s hingga 17,08 m/s. Rentang ini menunjukkan fluktuasi yang minimal, dengan grafik menggambarkan kestabilan aliran udara baik pada saluran bersih maupun kotor. Kondisi kecepatan yang terkendali ini menandakan bahwa sistem *single stage* cenderung memberikan aliran udara yang stabil sepanjang waktu pengujian.

Sebaliknya, konfigurasi *double stage* menunjukkan rata-rata kecepatan udara yang lebih tinggi, yaitu antara 19,90 m/s hingga 20,81 m/s. Kenaikan ini menandakan kemampuan *double stage* untuk meningkatkan kapasitas aliran udara secara signifikan. Namun, fluktuasi kecepatan pada konfigurasi ini lebih besar dibandingkan dengan *single stage*, terutama pada saluran udara kotor. Grafik mencatat adanya puncak kecepatan yang mencapai lebih dari 30 m/s, mengindikasikan ketidakstabilan aliran udara dalam beberapa periode tertentu.

Dibandingkan dengan *single stage*, rata-rata kecepatan udara pada *double stage* mengalami peningkatan sebesar 31,76%. Peningkatan ini memberikan manfaat dalam meningkatkan kapasitas aliran udara, yang sangat penting untuk sistem ventilasi dengan kebutuhan aliran tinggi. Namun, fluktuasi yang lebih besar pada konfigurasi *double stage* menjadi perhatian karena dapat memengaruhi stabilitas aliran dan efisiensi sistem secara keseluruhan.



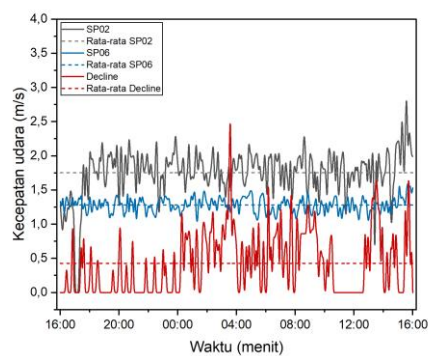
Gambar 7. Kecepatan udara *single stage* dan *double stage*

4.5.3 Kecepatan Udara di Terowongan

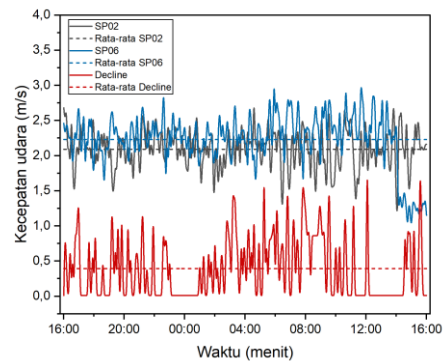
Analisis kecepatan aliran udara di dalam terowongan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV.13, menunjukkan perbedaan signifikan dalam distribusi aliran udara berdasarkan kondisi operasional kipas. Kondisi operasional kipas 2 menghasilkan kecepatan aliran udara tertinggi serta distribusi aliran

udara yang lebih merata di seluruh terowongan, dengan rata-rata kecepatan udara melebihi 2 m/s. Distribusi aliran udara yang merata ini menunjukkan bahwa konfigurasi ini secara efektif mengatasi kondisi dinamis, memastikan pasokan udara yang memadai bahkan di area buntu. Temuan tersebut sejalan dengan literatur yang ada yang menggarisbawahi peran penting konfigurasi kipas dan pengaturan operasional dalam mencapai kinerja ventilasi yang optimal di lingkungan bawah tanah (Karagianni & Benardos, 2021; Szlázak & Korzec, 2022).

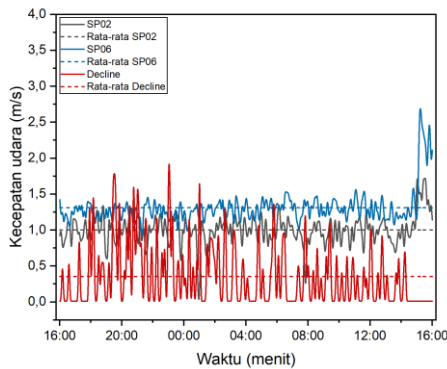
Sebaliknya, kondisi kipas 1, 3, 4, 5, dan 6 menunjukkan kecepatan aliran udara keseluruhan yang lebih rendah dari kondisi 2. Umumnya dari berbagai kondisi konfigurasi kipas yang dilakukan, memperlihatkan kecepatan udara yang lebih tinggi berada di dekat kipas. Namun, kondisi ini berkurang secara signifikan seiring bertambahnya jarak dari kipas. Pengamatan ini menunjukkan bahwa hanya memiliki kipas yang kuat tidak cukup tanpa konfigurasi yang efektif untuk mendukung distribusi aliran udara. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penempatan kipas yang tidak tepat dan arah aliran udara yang salah dapat menyebabkan ventilasi yang tidak memadai di area kritis, yang pada akhirnya membahayakan keselamatan dan kualitas udara (Qin dkk., 2023; Roghanchi dan Kocsis, 2018).



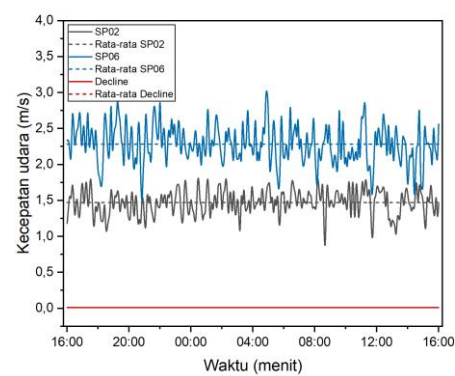
a. Kondisi 1



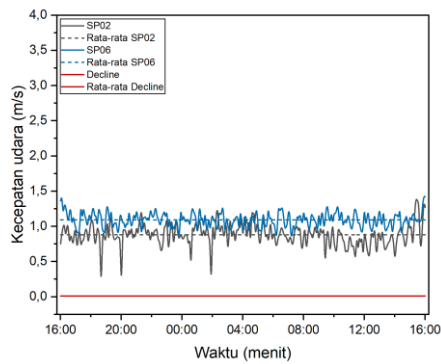
b. Kondisi 2



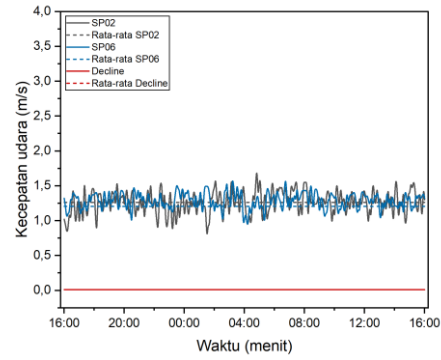
c. Kondisi 3



d. Kondisi 4



e. Kondisi 5



f. Kondisi 6

Gambar 8. Kecepatan aliran udara di sepanjang terowongan

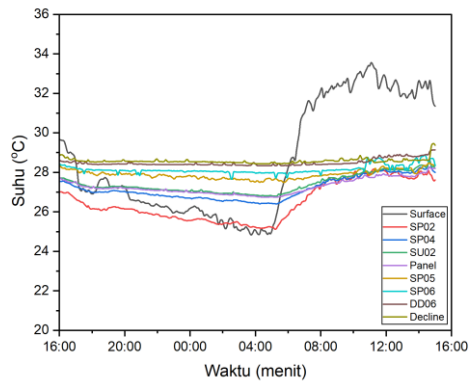
Pada kondisi 4, 5, dan 6, terdapat beberapa bagian terowongan yang mengalami aliran udara minimal atau bahkan tidak terdeteksi sama sekali (0 m/s). Namun, kondisi ini bukan disebabkan oleh ketiadaan angin secara keseluruhan, melainkan karena keterbatasan sensor yang hanya membaca kecepatan udara pada satu titik. Posisi pengukuran tersebut berada di area terdalam terowongan, di mana kecepatan udara cenderung tidak stabil, sehingga menghasilkan pembacaan yang fluktuatif atau hilang-timbul.

Jika dilakukan pengukuran manual pada area terdalam, kecepatan udara pada kondisi 4, 5, dan 6 berkisar antara 0 hingga 1,87 m/s. Ketidakefisienan ini menunjukkan perlunya evaluasi mendalam terhadap penempatan kipas dan konfigurasi operasional, terutama pada sistem terowongan yang lebih panjang atau memiliki tingkat kompleksitas yang lebih tinggi. Penelitian sebelumnya telah menjelaskan bahwa optimalisasi konfigurasi kipas dan penerapan teknologi canggih dapat secara signifikan meningkatkan distribusi aliran udara serta efisiensi energi (An et al., 2017; Obracaj et al., 2021).

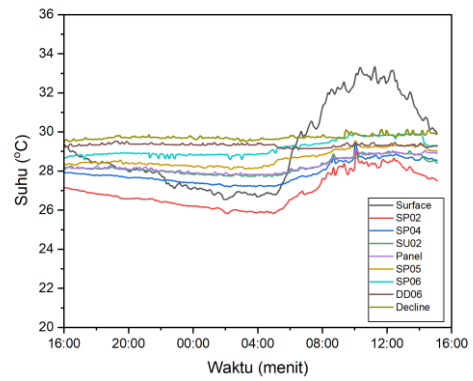
4.5.4 Suhu Udara

Pengamatan suhu udara di dalam terowongan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, menunjukkan bahwa distribusi suhu relatif stabil di seluruh kondisi operasional kipas (1 hingga 6). Suhu rata-rata berada pada kisaran 25°C hingga 30°C, tanpa perbedaan signifikan yang terlihat antara lokasi atau konfigurasi kipas. Pengamatan ini menunjukkan bahwa kipas, meskipun efektif dalam meningkatkan aliran udara, tidak secara langsung memengaruhi kondisi termal di dalam terowongan. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan fungsi utama sistem ventilasi sebagai fasilitator sirkulasi udara daripada pengontrol suhu langsung (Cheng et al., 2015; Nel et al., 2018).

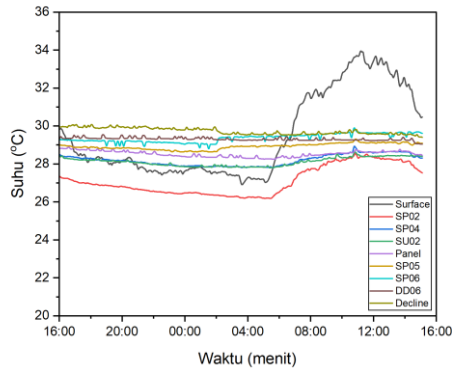
Gambar 9 menunjukkan bahwa suhu udara permukaan memiliki pengaruh signifikan terhadap suhu aliran udara di bagian jalur masuk bawah tanah. Namun, pengaruh ini berkurang seiring bertambahnya panjang jalur ventilasi (Yi et al., 2019). Hubungan korelasi ini dapat dilihat pada Tabel 3.



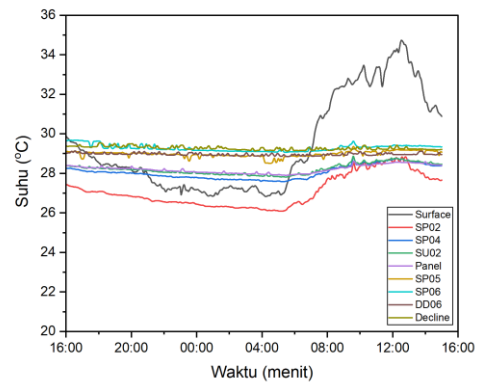
a. Kondisi 1



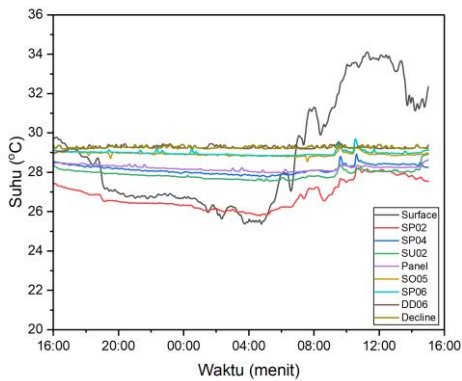
b. Kondisi 2



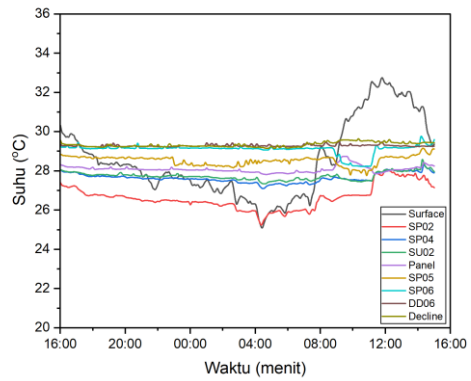
c. Kondisi 3



d. Kondisi 4



e. Kondisi 5



f. Kondisi 6

Gambar 9. Suhu udara di sepanjang terowongan

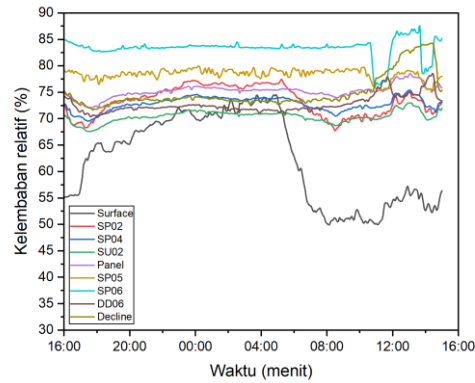
Tabel 3. Korelasi antara pengaruh suhu permukaan dengan suhu di sepanjang terowongan

Kondisi	Lokasi jarak (m)	Koefisien Korelasi (Pearson)	Korelasi
1	200	0,9680	Berkorelasi
	500	0,9081	Berkorelasi
	600	0,8795	Berkorelasi
	650	0,8225	Berkorelasi
	750	0,6315	Berkorelasi
	850	0,5922	Berkorelasi
	1800	0,6313	Berkorelasi

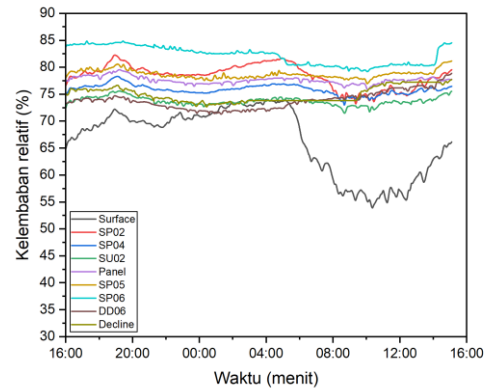
	2000	0,3758	Berkorelasi
2	200	0,9760	Berkorelasi
	500	0,9444	Berkorelasi
	600	0,9513	Berkorelasi
	650	0,9204	Berkorelasi
	750	0,9403	Berkorelasi
	850	0,8995	Berkorelasi
	1800	-0,2241	Tidak berkorelasi
	2000	0,5892	Berkorelasi
3	200	0,9805	Berkorelasi
	500	0,8977	Berkorelasi
	600	0,8327	Berkorelasi
	650	0,3637	Berkorelasi
	750	0,8345	Berkorelasi
	850	0,7360	Berkorelasi
	1800	-0,3484	Tidak berkorelasi
	2000	-0,4249	Berkorelasi
4	200	0,9742	Berkorelasi
	500	0,9324	Berkorelasi
	600	0,9104	Berkorelasi
	650	0,8202	Berkorelasi
	750	0,6264	Berkorelasi
	850	0,4505	Berkorelasi
	1800	0,1154	Tidak berkorelasi
	2000	-0,0990	Tidak berkorelasi
5	200	0,9562	Berkorelasi
	500	0,7649	Berkorelasi
	600	0,6333	Berkorelasi
	650	0,3607	Berkorelasi
	750	0,2203	Tidak berkorelasi
	850	0,4131	Berkorelasi
	1800	-0,1293	Tidak berkorelasi
	2000	0,0326	Tidak berkorelasi
6	200	0,9143	Berkorelasi
	500	0,7624	Berkorelasi
	600	0,5788	Berkorelasi
	650	0,4621	Berkorelasi
	750	0,0851	Tidak berkorelasi

	850	-0,2682	Tidak berkorelasi
	1800	0,1052	Tidak berkorelasi
	2000	0,7470	Berkorelasi

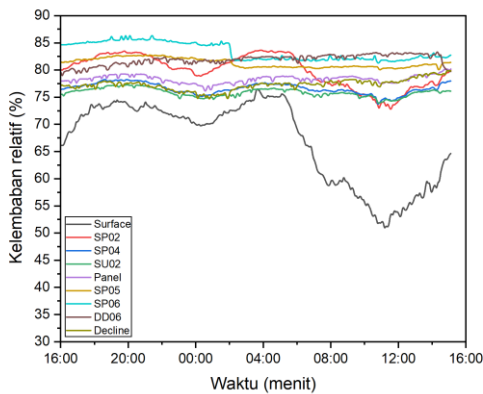
4.5.5 Kelembaban Relatif



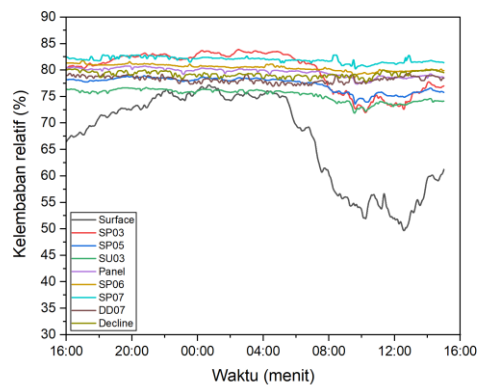
a. Kondisi 1



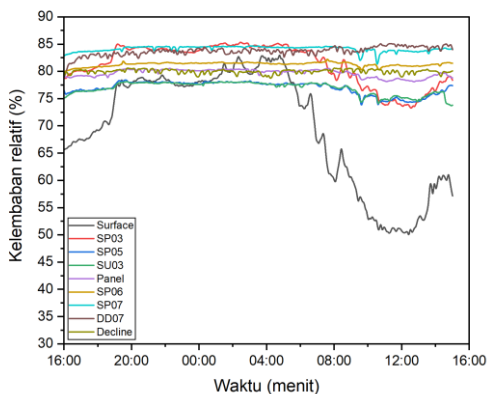
b. Kondisi 2



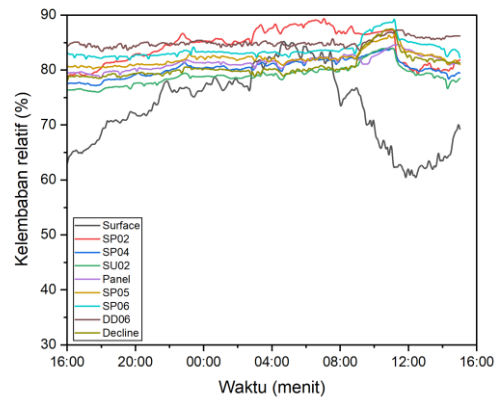
c. Kondisi 3



d. Kondisi 4



e. Kondisi 5



f. Kondisi 6

Gambar 10. Kelembaban relatif di sepanjang terowongan

Kondisi kelembaban relatif di dalam terowongan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10, menunjukkan pola yang serupa dengan distribusi aliran udara. Kelembaban relatif menunjukkan

distribusi kelembaban yang lebih stabil di sepanjang terowongan, dengan nilai kelembaban relatif berkisar antara 65% hingga 85%. Kurangnya perubahan signifikan dalam kelembaban relatif memperkuat gagasan bahwa kipas angin terutama berfungsi untuk meningkatkan sirkulasi udara daripada secara langsung mengendalikan tingkat kelembaban (Zhao et al., 2021).

Gambar 10 menunjukkan bahwa kelembaban udara permukaan memiliki pengaruh signifikan terhadap kelembaban aliran udara di bagian jalur masuk bawah tanah. Namun, pengaruh ini berkurang seiring bertambahnya panjang jalur ventilasi (Yi et al., 2019). Hubungan korelasi ini dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Korelasi antara pengaruh kelembaban udara permukaan dengan kelembaban udara di sepanjang terowongan

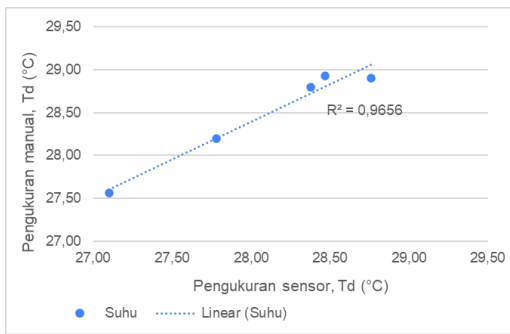
Kondisi	Lokasi jarak (m)	Koefisien Korelasi (Pearson)	Korelasi
1	200	0,8290	Berkorelasi
	500	0,4509	Berkorelasi
	600	0,2731	Tidak berkorelasi
	650	0,0102	Tidak berkorelasi
	750	0,1970	Tidak berkorelasi
	850	0,1073	Tidak berkorelasi
	1800	-0,5487	Berkorelasi
	2000	-0,4751	Berkorelasi
2	200	0,9229	Berkorelasi
	500	0,7005	Berkorelasi
	600	0,4254	Berkorelasi
	650	0,3395	Tidak berkorelasi
	750	0,0976	Tidak berkorelasi
	850	0,6930	Berkorelasi
	1800	-0,6989	Berkorelasi
	2000	-0,5188	Berkorelasi
3	200	0,9618	Berkorelasi
	500	0,6966	Berkorelasi
	600	0,6064	Berkorelasi
	650	-0,0379	Tidak berkorelasi
	750	0,5633	Berkorelasi
	850	0,5608	Berkorelasi
	1800	-0,5227	Berkorelasi
	2000	-0,4933	Berkorelasi
4	200	0,9798	Berkorelasi

	500	0,9442	Berkorelasi
	600	0,9117	Berkorelasi
	650	0,8433	Berkorelasi
	750	0,7748	Berkorelasi
	850	0,6546	Berkorelasi
	1800	-0,1399	Tidak berkorelasi
	2000	-0,0412	Tidak berkorelasi
5	200	0,9747	Berkorelasi
	500	0,9111	Berkorelasi
	600	0,8714	Berkorelasi
	650	0,8217	Berkorelasi
	750	0,4381	Berkorelasi
	850	0,5959	Berkorelasi
	1800	-0,3653	Tidak berkorelasi
6	2000	-0,0738	Tidak berkorelasi
	200	0,7988	Berkorelasi
	500	0,2881	Tidak berkorelasi
	600	0,0423	Tidak berkorelasi
	650	-0,1240	Tidak berkorelasi
	750	-0,2257	Tidak berkorelasi
	850	-0,3746	Tidak berkorelasi
	1800	-0,5072	Berkorelasi
	2000	-0,3963	Tidak berkorelasi

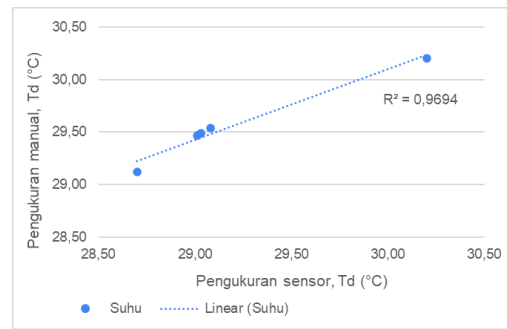
4.6 Validasi Data

Untuk memastikan keakuratan data yang diperoleh melalui pemantauan secara *real-time*, dilakukan pengukuran manual sebagai metode validasi. Hasil validasi yang ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13 bahwa data yang diperoleh dari sensor memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik dengan data hasil pengukuran manual. Hal ini dibuktikan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati 1 (Sheldon M. Ross, 2021).

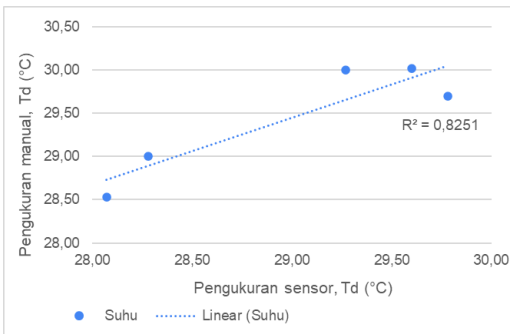
Melakukan validasi ini juga menunjukkan bahwa sensor dapat menghasilkan pengukuran yang konsisten dan sesuai dengan standar keakuratan yang diperlukan, sebagaimana direkomendasikan dalam literatur yang ada (Ottosen, 2021). Dengan data yang valid dan akurat, penelitian ini memiliki dasar yang kuat untuk menarik kesimpulan serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data yang terpercaya (Seno et al., 2016).



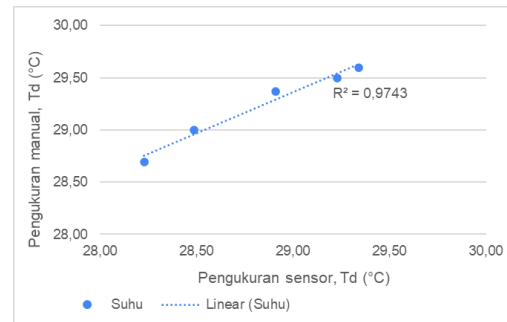
a. Kondisi 1



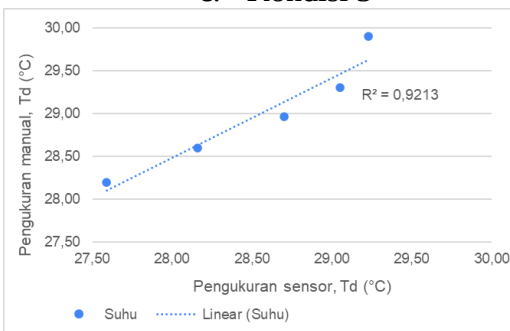
b. Kondisi 2



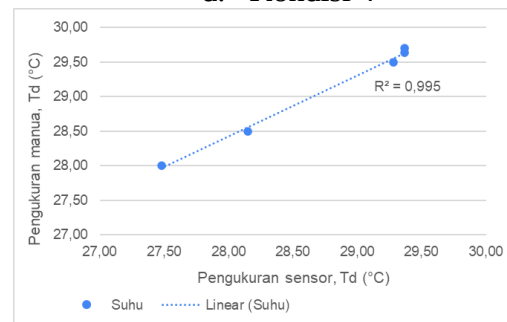
c. Kondisi 3



d. Kondisi 4

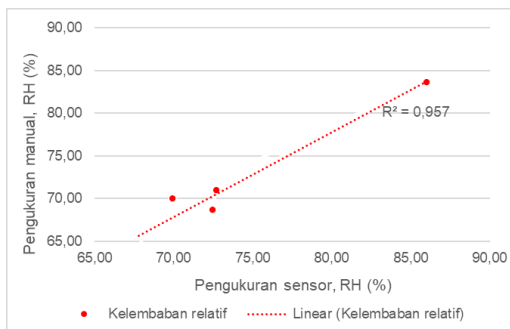


e. Kondisi 5

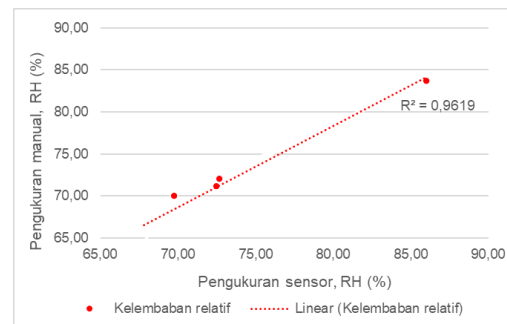


f. Kondisi 6

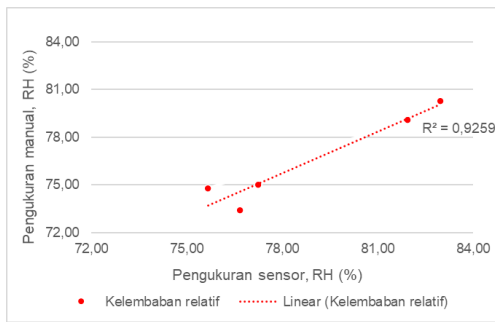
Gambar 11. Perbandingan hasil pengukuran suhu manual dengan sensor



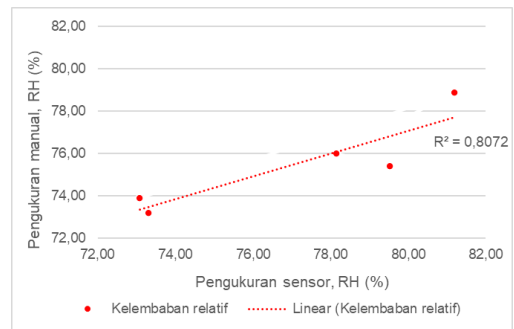
a. Kondisi 1



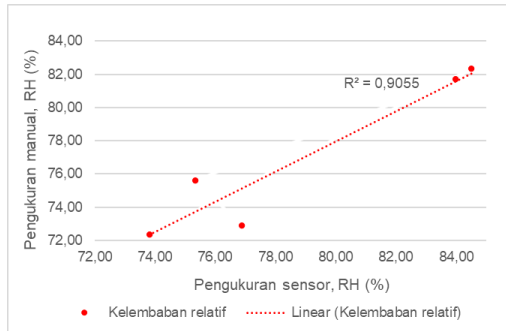
b. Kondisi 2



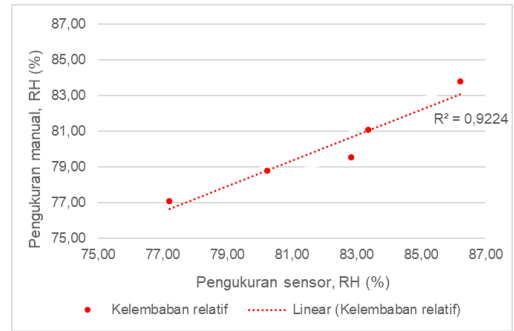
c. Kondisi 3



d. Kondisi 4



e. Kondisi 5



f. Kondisi 6

Gambar 12 Perbandingan hasil pengukuran kelembaban manual dengan sensor

BAB 5. KESIMPULAN SEMENTARA

1. Sistem ventilasi maksimum tidak selalu menghasilkan suhu udara yang optimal. Integrasi ventilasi dengan teknologi pendinginan diperlukan untuk mengatasi beban panas yang tinggi.
2. Validasi data sensor melalui pengukuran manual menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi, dibuktikan dengan nilai koefisien determinasi (R^2) mendekati 1. Hasil ini menegaskan bahwa sistem sensor mampu menghasilkan data yang konsisten dan akurat sesuai standar literatur. Dengan demikian, penelitian memiliki landasan data yang kuat untuk mendukung analisis dan pengambilan keputusan berbasis bukti yang terpercaya.

BAB 6. RENCANA TINDAK LANJUT

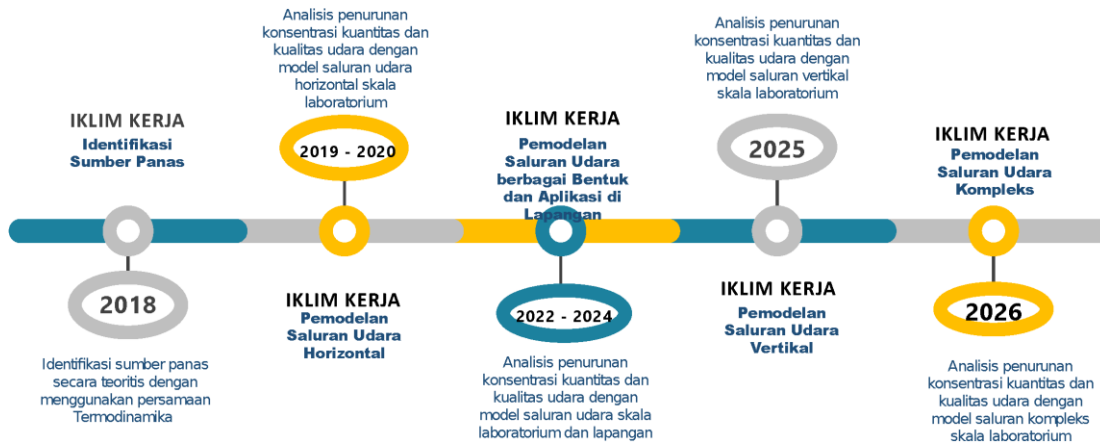
Peneliti akan melakukan pemodelan lanjutan menggunakan perangkat lunak Ventsim Visual untuk mensimulasikan aliran udara, distribusi termal, dan konsumsi energi dalam konfigurasi tambang bawah tanah yang lebih kompleks. Simulasi ini bertujuan untuk menguji efektivitas sistem ventilasi cerdas dalam berbagai skenario operasional, serta mengidentifikasi potensi optimasi tambahan berdasarkan data validasi sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- An, H., Shi, J., Wang, X., & Lyu, L. (2017). Application of Depth-First Search Method in Finding Recirculation in Mine Ventilation System. *Stavební Obzor-Civil Engineering Journal*, 26(3).
- Asghari, M., Nassiri, P., Monazzam, M. R., Golbabaie, F., Arabalibeik, H., Shamsipour, A., & Allahverdy, A. (2017). Weighting Criteria and Prioritizing of Heat stress indices in surface mining using a Delphi Technique and Fuzzy AHP-TOPSIS Method. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40201-016-0264-9>
- Cheng, J., Wu, Y., Xu, H., Liu, J., Yang, Y., Deng, H., & Wang, Y. (2015). Comprehensive and Integrated Mine Ventilation Consultation Model – CIMVCM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 45, 166–180. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.09.004>
- Chu, Z., Zhou, G., Rao, Z., Wang, Y., & Zhao, X. (2022). Field measurement and assessment on airflow thermodynamic parameters in hot and humid underground tunnelling: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104341>
- du Plessis, G. E., Liebenberg, L., & Mathews, E. H. (2013). Case study: The effects of a variable flow energy saving strategy on a deep-mine cooling system. *Applied Energy*, 102, 700–709. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.024>
- Gao, J., Uchino, K., & Inoue, M. (2002). Simulation of Thermal Environmental Conditions in Heading Face with Forcing Auxiliary Ventilation *-Control of thermal environmental conditions in locally ventilated working place (1st Report). In *資源と素材 (Shigen-to-Sozai)* (Vol. 118).
- Gu, J., Zhang, Y., Yang, N., & Wang, R. (2020). Diurnal variability of the planetary boundary layer height estimated from radiosonde data. *Earth and Planetary Physics*, 4(5), 1–14. <https://doi.org/10.26464/epp2020042>
- Ihsan, A., Cheng, J., Widodo, N. P., Wang, E., Waly, F. Z., Syachran, S. R., Fadillah, T., & Khamidah, H. N. (2024). Hybrid method for analyzing air thermal conditions in underground mines. *Expert Systems with Applications*, 245, 123026. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123026>
- Imgrund, T., Bischoff, A., & Spürk, S. (n.d.). *COMPARISON OF MINE VENTILATION SOFTWARE TOOLS FOR UNDERGROUND COAL MINES IN HARSH CONDITIONS*.
- Kamrar, A., Mostafa Aminossadati, S., Leonardi, C., & Sasmito, A. (n.d.). *Developments and Challenges of Underground Mine Ventilation and Cooling Methods*. <https://ro.uow.edu.au/coal><https://ro.uow.edu.au/coal/615>
- Karagianni, M., & Benardos, A. (2021). Ventilation design modeling and optimization for an underground bauxite mine. *Materials Proceedings*, 5(1), 29.
- Lowndes, I. S., Yang, Z. Y., Jobling, S., & Yates, C. (2006). A parametric analysis of a tunnel climatic prediction and planning model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(5), 520–532. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.08.012>

- Maurya, T., Karena, K., Vardhan, H., Aruna, M., & Raj, M. G. (2015). Potential Sources of Heat in Underground Mines – A Review. *Procedia Earth and Planetary Science*. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.046>
- McPherson, M. J. (1993). Subsurface Ventilation and Environmental Engineering. In *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1550-6>
- Moradi, I., Arkin, P., Ferraro, R., Eriksson, P., & Fetzner, E. (2016). Diurnal variation of tropospheric relative humidity in tropical regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(11), 6913–6929. <https://doi.org/10.5194/acp-16-6913-2016>
- Nel, A. J. H., Vosloo, J. C., & Mathews, M. J. (2018). Evaluating complex mine ventilation operational changes through simulations. *Journal of Energy in Southern Africa*, 29(3), 22–32. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2018/v29i3a4445>
- Obracaj, D., Korzec, M., & Deszcz, P. (2021). Study on Methane Distribution in the Face Zone of the Fully Mechanized Roadway with Overlap Auxiliary Ventilation System. *Energies*, 14(19), 6379. <https://doi.org/10.3390/en14196379>
- Obracaj, D., Szlązak, N., & Korzec, M. (2022). Using a Mine Dewatering System to Increase Cooling Capacity and Energy Recovery of Underground Refrigeration Plant: A Case Study. *Energies*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/en15249481>
- Ottosen, T.-B. (2021). Perspectives on the Calibration and Validation of Low-Cost Air Quality Sensors. *Environmental Science & Technology*, 55(19), 12773–12775.

LAMPIRAN 1. ROAD MAP PENELITIAN



PETA JALAN PENELITIAN <RIRIN YULIANTI>



PETA JALAN PENELITIAN < Pantjanita Novi Hartami>

LAMPIRAN 2. LUARAN PENELITIAN

LUARAN 1 :

Kategori Luaran : Artikel Ilmiah

Status : Draft

Jenis Publikasi Jurnal : Jurnal Nasional Terakreditasi

Nama Jurnal : Jurnal Teknologi Pertambangan

ISSN :

EISSN :

Lembaga Pengindek :

Url Jurnal : <https://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/jtp>

Judul Artikel : OPTIMALISASI SISTEM VENTILASI DENGAN PEMANTAUAN REAL-TIME UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI ENERGI DAN KESELAMATAN

Penulis (Tim Peneliti) :

1. Ririn Yulianti, S.T., M.T. (Corresponding Author)
2. Dr. Ir. Pantjanita Novi Hartami, S.T., M.T. (Other Author)
3. Sawung Panggali Dewandaru (Other Author)

Penulis (Di Luar Tim Peneliti) :

1. Dr. Ir. Danu Putra, S.T., M.T. (Other Author)
2. Yuga Maulana, S.T., M.T. (Other Author)
3. Dr. Edy Jamal Tuheteru, S.T., M.T. (Other Author)

LUARAN 2 :

Kategori Luaran : Hak Kekayaan Intelektual

Status : Tercatat/Tersedia

Jenis HKI : Hak Cipta

Nama HKI : ANALISIS MONITORING VENTILASI TAMBANG UNTUK VALIDASI KORELASI PARAMETER LINGKUNGAN

No. Pendaftaran : EC002025126057

Tanggal Pendaftaran : 2025-09-08

No. Pencatatan : 000966318

Penulis (Tim Peneliti) :

1. Ririn Yulianti, S.T., M.T.
2. Dr. Ir. Pantjanita Novi Hartami, S.T., M.T.
3. Sawung Panggali Dewandaru