

SKRIPSI

ANALISIS EFEKTIVITAS *WATER MIST SPRAY* DALAM PENGENDALIAN DEBU DI AREA PRODUKSI DMLZ PT FREEPORT INDONESIA

Disusun dan diajukan oleh:

REZA HILMI FADHLURAHMAN
D111 19 1047



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS EFEKTIVITAS *WATER MIST SPRAY* DALAM PENGENDALIAN DEBU DI AREA PRODUKSI DMLZ PT FREEPORT INDONESIA

Disusun dan diajukan oleh

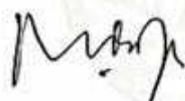
REZA HILMI FADHLURAHMAN
D111191047

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 2 Februari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

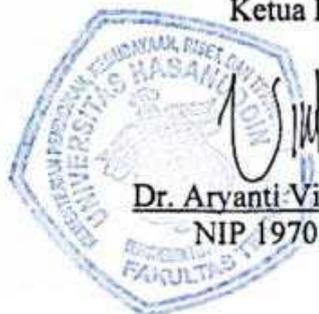


Dr. Eng. Ir Muhammad Ramli, MT
NIP 196807181993091001



Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT
NIP 199511262022043001

Ketua Program Studi,



Dr. Aryanti-Virtanti Anas, S.T., M.T
NIP 197010052008012026



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Reza Hilmi Fadhlurahman
NIM : D111191047
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis efektivitas water mist spray dalam pengendalian debu di area produksi DMLZ PT Freeport Indonesia

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti dapat dibuktikan bahwa sebagian keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 2 Feburari 2024

Menyatakan



Reza Hilmi Fadhlurahman



ABSTRAK

REZA HILMI FADHLURAHMAN. ANALISIS EFEKTIVITAS WATER MIST SPRAY DALAM PENGENDALIAN DEBU DI AREA PRODUKSI DMLZ PT FREEPORT INDONESIA (dibimbing oleh Muhammad Ramli dan Asta Arjunoarwan Hatta)

Tambang bawah tanah memiliki salah satu aspek terpenting bagi berlangsung produktivitas kegiatan penambangan, yaitu sistem ventilasi. Pada tambang bawah tanah, sistem ventilasi diperlukan untuk menyediakan oksigen guna memenuhi kebutuhan pernapasan manusia atau pekerja tambang dan juga dibutuhkan untuk mendilusi gas-gas beracun, mengurangi konsentrasi debu yang berada di dalam udara tambang dan untuk menurunkan temperatur udara tambang, sehingga memungkinkan tercipta kondisi kerja yang aman dan nyaman. Sumber utama debu berasal dari peledakan, pemuatan (*loading*), pembongkaran (*dumping*), penghancuran (*grizzly*), crushing, mucking, dan transportasi bijih. *Mucking* adalah proses pengangkutan material dengan menggunakan *louder* ke *grizzly*, *louder* pada tambang bawah adalah alat yang digunakan untuk memindahkan material dari *drop point* ke *grizzly* yang dimana material hasil penghancuran akan langsung jatuh ke bawah melalui *ore pass* setinggi 50 meter dan kemudian akan ditampung pada tempat penampungan (*loading point*). *Exhaust vent raise* adalah alat yang digunakan untuk menghisap udara kotor yang ada pada tiap panel area, setiap *louder* memerlukan *airflow* (aliran udara) sebesar $13.4 \text{ m}^3/\text{s}$ per unit. Total *dust sampling* yang dilakukan di area DMLZ PT Freeport Indonesia dilakukan sebanyak 41 kali. Hal ini bertujuan untuk mengetahui lokasi-lokasi di mana nilai konsentrasi debu melebihi nilai ambang batas sesuai dengan ketentuan yang telah diterapkan oleh PTFI sebesar $2.966 \text{ mg}/\text{m}^3$. Penelitian ini difokuskan pada area panel 22, hasil nilai konsentrasi debu pada titik *exhaust vent raise* sebelum mengaktifkan *water mist spray* mendapatkan nilai sebesar $7.97 \text{ mg}/\text{m}^3$, dengan mengaktifkan *water mist spray* maka nilai tersebut turun menjadi $0.77 \text{ mg}/\text{m}^3$, nilai tersebut dapat menunjukkan efektivitas penurunan sebesar 90%.

Kata Kunci: s



ABSTRACT

REZA HILMI FADHLURAHMAN. ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF WATER MIST SPRAY IN CONTROLLING DUST IN THE DMLZ PRODUCTION AREA PT FREEPORT INDONESIA (supervised by Muhammad Ramli and Asta Arjunoarwan Hatta)

Underground mines have one of the most important aspects for the ongoing productivity of mining activities, which is the ventilation system. In underground mines, the ventilation system is required to provide oxygen to meet the respiratory needs of humans or mine workers and is also needed to dilute toxic gases, reduce the concentration of dust in the mine air and to reduce the temperature of the mine air, thus enabling safe and comfortable working conditions. The main sources of dust are from blasting, loading, dumping, crushing, crushing and ore transportation. Mucking is the process of transporting material using a loader to the grizzly. The loader in the lower mine is a tool used to move material from the drop point to the grizzly, where the crushed material will immediately fall down through an ore pass as high as 50 meters and will then be accommodated loading point. Exhaust vent raise is a tool used to inhale dirty air in each panel area, each loader requires an airflow of 13.4 m³/s per unit. The total dust sampling carried out in the PT Freeport Indonesia DMLZ area was carried out 41 times. This aims to identify locations where the dust concentration value exceeds the threshold value in accordance with the provisions implemented by PTFI of 2.966 mg/m³. This research focuses on panel area 22, the results of the dust concentration value at the exhaust vent raise point before activating the water mist spray get a value of 7.97 mg/m³, by activating the water mist spray the value drops to 0.77 mg/m³, the value This can show a reduction effectiveness of 90%.

Keywords: Ventilation; Dust; Water mist spray; Airflow; Panel 22; Loader; Mucking; Grizzly.



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	12
1.1 Latar Belakang.....	12
1.2 Rumusan Masalah.....	13
1.3 Tujuan Penelitian.....	13
1.4 Manfaat Penelitian.....	13
1.5 Ruang Lingkup.....	14
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	15
2.1 Ventilasi Tambang Bawah Tanah.....	15
2.2 Kondisi Udara.....	21
2.3 <i>Mine Fan</i>	23
2.4 <i>Mine Ventilation Control</i>	24
2.5 Ventsim.....	27
2.6 <i>Leakage</i>	28
2.6 Kebutuhan <i>Airflow</i> Pada Tambang Bawah Tanah.....	28
2.7 Pengendalian debu.....	29
2.8 <i>Water mist sprays</i>	31
BAB III METODE PENELITIAN.....	33
3.1 Lokasi Penelitian.....	33
3.2 Metode Penelitian.....	35
3.3 Sumber Data.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1 Data produksi di area <i>extraction</i>	51
4.2 <i>Dust Profile Loop</i> di DMLZ.....	53
4.2 Debu di panel 22 <i>extraxtion</i>	59
4.3 <i>Airflow Airflow budget</i> in panel 21-25.....	63
4.4 Persen Efektivitas Menggunakan <i>Water mist spray</i> di panel 22.....	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....	68
DAFTAR LAMPIRAN.....	69



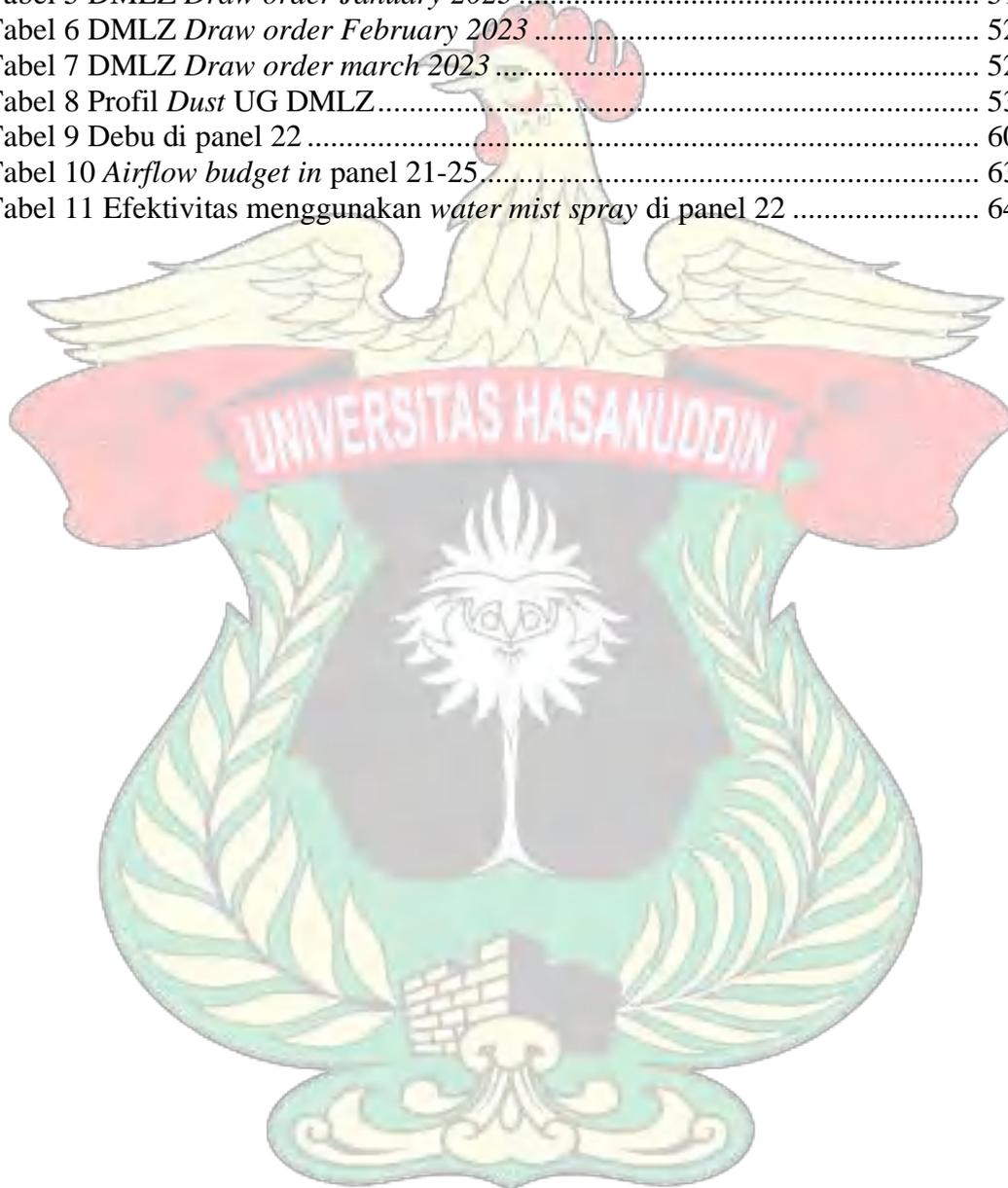
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Rangkaian jaringan ventilasi seri	17
Gambar 2 Saluran aliran udara.....	17
Gambar 3 Jalur udara untuk mencari panjang <i>airways</i> ekuivalen	20
Gambar 4 Tampilan dari <i>Software Ventsim</i>	27
Gambar 5 <i>Water mist spray</i>	32
Gambar 6 Peta tunjuk lokasi penelitian.....	34
Gambar 7 Peta DMLZ <i>Level 2590</i> di <i>Extraction</i>	34
Gambar 8 Sistem Ventilasi Tambang DMLZ	36
Gambar 9 Tampilan Pengukuran panel loop di setiap level	37
Gambar 10 <i>Vane Anemometer</i>	37
Gambar 11 <i>Smoke Tube</i>	38
Gambar 12 <i>Distometer</i>	38
Gambar 13 Arah penggunaan <i>vane anemometer</i>	38
Gambar 14 <i>Filter</i>	39
Gambar 15 <i>Cassette</i>	39
Gambar 16 <i>Balance sartorius</i>	40
Gambar 17 Kerangka pompa	40
Gambar 18 Kerangka <i>cyclone</i>	41
Gambar 19 kerangka kalibrator pompa.....	41
Gambar 20 Kerangka <i>desicator</i>	42
Gambar 21 Bentuk konstruksi <i>water mist spray</i> di panel produksi	45
Gambar 22 <i>Water mist spray</i> secara aktual.....	46
Gambar 23 Ilustrasi sistem konstruksi <i>water mist spray</i> di NFD - SFD.....	47
Gambar 24 Ilustrasi sistem konstruksi <i>water mist spray</i> di panel <i>drift</i>	47
Gambar 25 Bagan Alir Penelitian	50
Gambar 26 Grafik area <i>extraction</i>	55
Gambar 27 Grafik DMLZ Area Perkantoran	56
Gambar 28 Grafik DMLZ <i>service conveyor</i>	57
Gambar 29 DMLZ <i>service exhaust</i>	58
Gambar 30 <i>Mobile rock breaker</i>	59
Gambar 31 Grafik konsentrasi debu panel 22 dengan kondisi <i>water mist spray</i> aktif pada tanggal 10 Maret 2023.....	61
Gambar 32 Grafik konsentrasi debu panel 22 dengan kondisi <i>water mist spray</i> non – aktif pada tanggal 13 Maret 2023.....	61
Gambar 33 Grafik konsentrasi debu panel 22 dengan kondisi <i>water mist spray</i> non – aktif pada tanggal 17 Maret 2023.....	62
Gambar 34 Grafik konsentrasi debu panel 22 dengan kondisi <i>water mist spray</i> aktif pada tanggal 24 Maret 2023.....	62



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Panjang ekuivalen untuk berbagai sumber <i>shock loss</i>	19
Tabel 2 Kondisi kandungan udara untuk waktu kerja rata – rata 8 jam.....	21
Tabel 3 Sumber debu tambang bawah tanah logam dan non logam.....	48
Tabel 4 Sumber debu pada area <i>deep mill level zone</i> (DMLZ).....	49
Tabel 5 DMLZ <i>Draw order January 2023</i>	51
Tabel 6 DMLZ <i>Draw order February 2023</i>	52
Tabel 7 DMLZ <i>Draw order march 2023</i>	52
Tabel 8 Profil <i>Dust UG DMLZ</i>	53
Tabel 9 Debu di panel 22	60
Tabel 10 <i>Airflow budget in panel 21-25</i>	63
Tabel 11 Efektivitas menggunakan <i>water mist spray</i> di panel 22	64



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
DMLZ	<i>Deep mill level zone</i>
PTFI	PT Freeport Indonesia
DOZ	<i>Deep ore zone</i>
XC	<i>Xross cut</i>



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A PETA LOKASI PENELITIAN	70
LAMPIRAN B PETA DMLZ LEVEL 2590 DI EXTRACTION	72
LAMPIRAN C Profil debu di tambang bawah tanah DMLZ.....	62



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Puji syukur kita panjatkan kepada Allah *Subhanahu Wata'ala*, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, kesehatan dan kesempatan dari-Nya kita masih diberikan kesehatan sehingga skripsi dengan judul “Analisis metode pengurangan masalah Debu Pada Area Produksi Ttmbang *DMLZ*’ dapat terselesaikan.

Penulis mengucapkan terima kasih pada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan baik secara moril maupun materil sehingga laporan ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Rudy Arif Prasajo selaku *Engineering Ventilation Monitoring* yang telah menjadi pembimbing selama penulis melakukan penelitian di PT Freeport Indonesia. Terima kasih juga penulis haturkan kepada Bapak Riza Zainuriska Sani selaku *General Superintakeendent* dan Bapak Dedy Nurul Iryanto selaku *Chief Engineering DMLZ Ventilation* yang selalu siap membantu dan juga banyak memberikan arahan dan masukan selama penelitian di PT Freeport Indonesia.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen dari Departemen Teknik Pertambangan, Bapak Dr. Eng. Ir Muhammad Ramli. MT dan Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, ST., MT yang senantiasa meluangkan waktu untuk membimbing, memberi masukan, serta memberi semangat dan motivasi kepada penulis selama menyusun laporan tugas akhir, kepada Bapak dan Ibu selaku dosen penguji. Terima kasih untuk seluruh dosen dan staf Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari mengenai penulisan ini tidak bisa terselesaikan tanpa pihak-pihak yang mendukung baik secara moril dan juga materil. Maka, penulis menyampaikan banyak-banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini terutama kepada kedua orang tua, ayahanda tersayang Dikdik Hasanuddin S.T dan ibunda tercinta Makkarennu, S.Hut, M.Si, Ph.D yang memberikan dukungan moril dan materil serta doa yang dipanjatkan



ALLAH SWT untuk penulis. Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, MT. dan Bapak at. Sri Widodo, ST., MT. selaku dosen LBE Eksplorasi yang senantiasa ing serta selalu memberi arahan kepada penulis dalam proses penyusunan

Skripsi ini. Bapak Dr. Eng. Purwanto, ST., MT selaku dosen LBE Geomekanik dan Rekayasa batuan yang senantiasa membimbing serta selalu memberi arahan kepada penulis dalam proses penyusunan Skripsi ini. Sahabat saya Ahmad Taufaman Faluti syarif, Muhammad Firjatullah, Aldi Fauzan, Farhan Arlansyah yang selalu memberi semangat dan menghibur saya ketika lelah dan selalu mendukung saya dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini dan teman-teman seperjuangan di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin; Armin Nur Fajar, Aliya Magfirah, Nur Khofifah Mamonto yang merupakan bukti perjuangan saya dalam menyelesaikan Skripsi ini dan seluruh saudara seperjuangan IGNEOUZ 2019 yang selalu ada dan kawan-kawan anggota Laboratorium Lingkungan, Explorasi mineral dan Geomekanik yang telah memberikan masukan dan semangat dalam kegiatan penelitian maupun dalam penyusunan laporan Tugas Akhir.

Rasa hormat dan ucapan terima kasih kepada semua pihak atas segala doa dan dukungannya semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala, membalas semua kebaikan yang sudah mereka berikan kepada penulis. Aamiin.

Akhir kata penyusun ucapkan banyak terima kasih banyak kepada seluruh pihak yang membantu dan semoga Allah SWT melimpahkan rahmat, taufik dan karunianya dalam setiap kebaikan kita serta diberikan balasan oleh-Nya. Aamiin.

Gowa, 5 Oktober 2023

Reza Hilmi Fadhlurahman



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Freeport Indonesia (PTFI) merupakan perusahaan tambang emas yang beroperasi di daerah Pegunungan Jayawijaya, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua Tengah, Indonesia. Material yang ditambang oleh PT Freeport Indonesia meliputi bijih tembaga (Cu), dan emas (Au). PT Freeport Indonesia memiliki sistem penambangan tambang terbuka dan juga tambang bawah tanah. PT Freeport Indonesia beroperasi dengan menggunakan sistem tambang bawah tanah yang meliputi GBC (*grassberg block caving*), big gossan, DMLZ (*deep mill level zone*), kucing liar dan PB4 (*production block 4*). Tambang bawah tanah DMLZ menggunakan metode *block caving*, yaitu metode dengan memanfaatkan gaya gravitasi bumi untuk meruntuhkan material ke bawah (Haney, 2013).

Ventilasi tambang merupakan usaha pengendalian terhadap pergerakan udara atau aliran udara tambang. Parameter yang harus dipenuhi dalam ventilasi meliputi jumlah, mutu, dan arah aliran udara. Tujuan utama dari ventilasi tambang adalah menyediakan udara segar dengan kuantitas dan kualitas yang memadai. Udara segar tersebut dialirkan dan dibagikan ke dalam tambang, untuk menciptakan kondisi kerja yang aman dan nyaman bagi para pekerja tambang serta memfasilitasi proses penambangan. Pengendalian kuantitas udara melibatkan aspek perpindahan udara, arah aliran, dan jumlah aliran udara. Pengendalian kualitas udara tambang, baik secara kimia maupun fisik, melibatkan penyediaan udara segar dan pengeluaran zat pencemar seperti debu, gas, panas, dan udara lembab oleh sistem ventilasi. Saat ini, banyak tambang bawah tanah menyediakan aliran udara dengan rasio sekitar 10–20 ton udara segar per ton mineral yang ditambang. (Howard, 1997).

Konsentrasi debu di area *extraction* menunjukkan nilai yang tinggi di beberapa lokasi panel produksi. Keadaan ini berpotensi mengganggu kualitas dan kuantitas udara di tambang bawah tanah. Penelitian ini dilaksanakan untuk



luasi tingkat konsentrasi debu di area tersebut. Fokus penelitian juga in penilaian terhadap efektivitas *water mist spray* sebagai alat ulian debu, khususnya dalam mendukung aktivitas *mucking* di area

extraction. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kebutuhan udara yang diperlukan agar masalah debu di area penelitian dapat diatasi secara efisien. Analisis mendalam terhadap faktor-faktor yang memengaruhi konsentrasi debu dan evaluasi terhadap performa *water mist spray* diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif. Dengan demikian, solusi ventilasi yang optimal dapat dirancang untuk memastikan bahwa kondisi udara di tambang bawah tanah sesuai dengan standar kesehatan dan keselamatan kerja (Litton, 1993).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang dapat dijabarkan adalah sebagai berikut

1. Analisis total kebutuhan udara pada area penelitian.
2. Analisis tingkat konsentrasi debu pada area kerja tambang DMLZ.
3. Analisis proses dan tingkat efektifitas *water mist spray* sebagai alat pengurangan debu di panel produksi.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis kondisi total kebutuhan udara pada area panel 20 – 25 *extraction*.
2. Menganalisis konsentrasi debu pada tambang DMLZ.
3. Menganalisis tingkat efektivitas *water mist spray* sebagai alat pengurangan debu di panel *extraction*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Menyediakan dan mengalirkan udara bersih pada sebuah tambang bawah tanah untuk keperluan pernapasan dan kenyamanan para pekerja tambang.
2. Mengetahui bahaya debu dan mengetahui cara mengurangi konsentrasi debu.
3. Memberikan masukan kepada perusahaan mengenai penanganan debu, sus penggunaan *water mist spray* pada area produksi.



1.5 Ruang Lingkup

Penelitian dilakukan di tambang bawah tanah DMLZ PT Freeport Indonesia Kabupaten Mimika, Provinsi Papua. Lokasi penelitian ini terletak pada area *extraction* level tambang bawah tanah DMLZ pada panel 20 sampai panel 25. Penelitian ini dilakukan selama 3 bulan terhitung sejak bulan Februari – Mei 2023. Pengumpulan data dilakukan secara langsung dilapangan, meliputi data konsentrasi debu, aliran udara dan data produksi di area *extraction*. Penelitian ini menggunakan metode observasi dan komparatif yaitu metode penelitian tentang sebab akibat dengan menganalisis faktor – faktor yang mempengaruhi standar debu. Data yang dikumpulkan akan dijadikan sebagai aspek untuk menganalisis efektivitas *water mist spray* dalam pengendalian debu di area penambangan.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ventilasi Tambang Bawah Tanah

Sistem pengaliran udara bersih ke dalam tambang dikenal dengan istilah ventilasi tambang. Ventilasi tambang bawah tanah bertujuan untuk menyediakan aliran udara segar yang memadai bagi pekerja di tambang tersebut, sehingga dapat mengeluarkan udara kotor, seperti debu dan gas berbahaya. Kualitas dan kuantitas udara di tambang bawah tanah merupakan faktor kritis untuk memastikan bahwa semua pekerja dapat bekerja dalam lingkungan yang aman dan nyaman. Hal ini juga berlaku untuk alat-alat yang digunakan di tambang bawah tanah. Persyaratan terkait standar kuantitas dan kualitas udara tambang diatur oleh negara yang bersangkutan, bergantung pada sejarah pertambangan, jenis gas polutan yang dominan, serta risiko yang terkait dengan gas-gas beracun tersebut. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa lingkungan kerja di tambang bawah tanah memenuhi standar keselamatan dan kesehatan yang telah ditetapkan. (McPherson, 1993).

Standar untuk kuantitas dan kualitas udara pada tambang bawah tanah sudah diatur dalam Keputusan Menteri Pertambangan Energi No. 555.K/26/M.PE/1995. Ventilasi Tambang Pasal 369 ayat 1, 2, 3, 4 dan 5 Ketentuan Umum :

1. Pada tambang bawah tanah:
 - a. Kepala Teknik Tambang harus menjamin tersedianya aliran udara bersih yang cukup untuk semua tempat kerja dengan ketentuan volume oksigennya tidak kurang dari 19,5% dan volume karbon dioksida nya tidak lebih dari 0,5%
 - b. Dilarang memperkerjakan karyawan pada tempat kerja yang mengandung debu, asap atau uap yang konsentrasinya dapat mengganggu kesehatan
 - c. Aliran udara harus cukup untuk mengurangi atau menyingkirkan konsentrasi asap peledakan secepat mungkin.

pabila dalam sistem ventilasi tambang harus terdeteksi adanya gas yang mudah terbakar dan meledak maka kepala teknik tambang harus melakukan tindakan pengamanan khusus untuk memperbaiki kondisi tersebut.



3. Volume udara bersih yang dialirkan dalam sistem ventilasi harus:
 - a. Diperhitungkan berdasarkan jumlah pekerja terbanyak pada suatu lokasi kerja dengan ketentuan untuk setiap orang tidak kurang dari $2m^3/menit$ selama pekerjaan berlangsung
 - b. Ditambah sebanyak $3m^3/menit$ untuk setiap tenaga kuda, apabila mesin diesel dioperasikan.
4. Pelaksana Inspeksi Tambang dapat memerintahkan Kepala Teknik Tambang untuk meningkatkan mutu dan volume aliran udara bersih pada suatu bagian dari tambang.
5. Pada sistem ventilasi dilarang menerapkan sistem sirkulasi balik udara.

Ventilasi Tambang Pasal 370 ayat 1 dan 2, Standar Ventilasi

1. Temperatur udara di dalam tambang bawah tanah harus dipertahankan antara $18^{\circ}C-24^{\circ}C$ dengan kelembaban relatif maksimum 85%.
2. Selain ketentuan sebagaimana dimaksud dalam ayat (1) huruf a, kondisi ventilasi ditempat kerja harus:
 - a. Untuk rata-rata 8 jam
 - 1) Karbon Monoksida (CO) volumenya tidak lebih dari 0,005%
 - 2) Methan (CH₄) volumenya tidak lebih dari 0,25%
 - 3) Hidrogen sulfida (H₂S) volumenya tidak lebih dari 0,001% dan
 - 4) Nitrogen dioksida (NO₂) tidak lebih dari 0,0003%
 - b. Dalam tenggang waktu 15 menit
 - 1) Co tidak boleh lebih dari 0,04% dan
 - 2) NO₂ tidak boleh lebih dari 0,0005%

2.1.1 Jaringan udara

Dalam sistem jaringan ventilasi, terdapat dua kombinasi sambungan lubang bawah tanah (*airways*), yaitu seri dan paralel. Ada kemungkinan kedua rangkaian tersebut dapat digabungkan menjadi rangkaian yang kompleks. Penetapan jaringan udara berperan dalam menentukan total headloss pada sistem ventilasi tambang.

1. Jaringan Ventilasi Tambang Rangkaian Seri

Volume aliran udara pada jaringan ventilasi seri (Gambar 1 dan Gambar 2) melalui masing-masing saluran; hal ini dapat dilihat pada persamaan di Gambar 1 dan Gambar 2.



$$Q=Q_1=Q_2=Q_n \quad (1)$$

Sedangkan tahanan equivalen hubungan seri adalah:

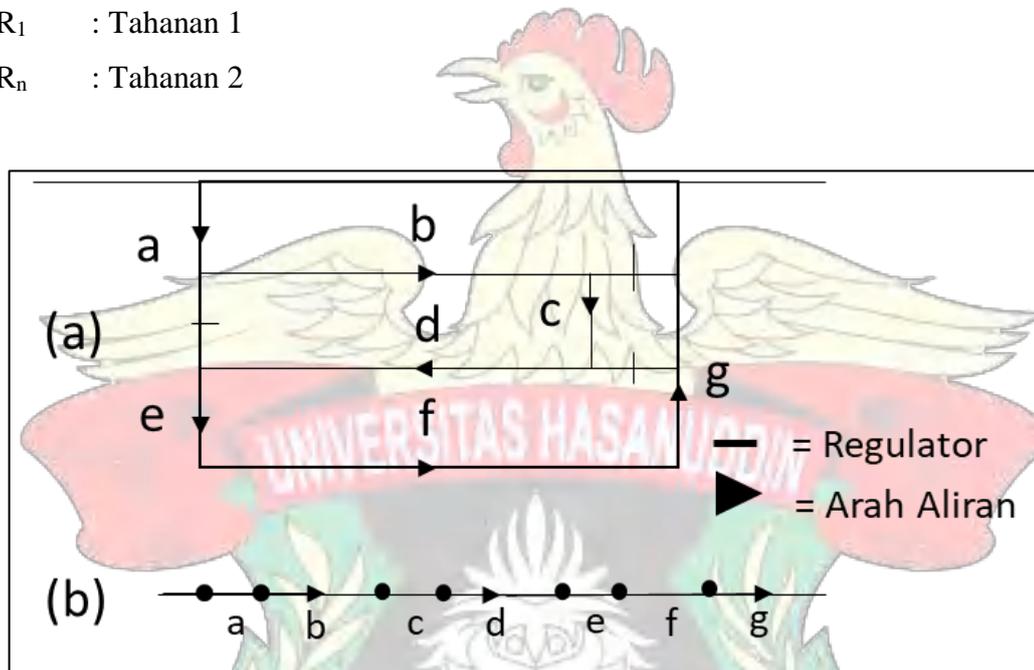
$$R_{eq}=R_1 + R_n \quad (2)$$

Keterangan:

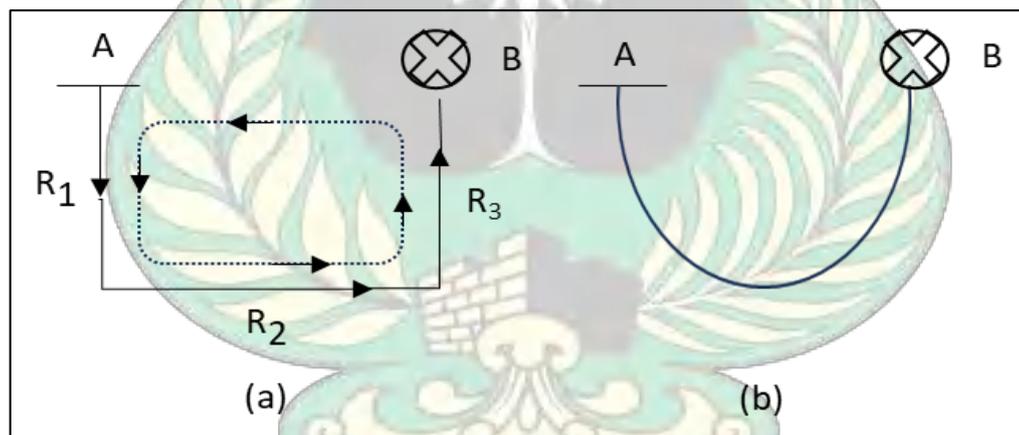
R_{eq} : Tahanan ekivalen Ns^{-2}/m^8

R_1 : Tahanan 1

R_n : Tahanan 2



Gambar 1 Rangkaian jaringan ventilasi seri (Wiyono, 2003)



Gambar 2 Saluran aliran udara (Elroy, 1935)

2. Jaringan ventilasi tambang rangkaian paralel



Jika jaringan ventilasi dihubungkan secara paralel, maka aliran udara menurut jumlah cabang paralel yang besarnya masing-masing tergantung tahanan salurannya. Pada ventilasi tambang percabangan seperti ini disebut split, sedangkan cabangnya sendiri disebut split.

2.1.2 Mine Head

Mine head adalah menentukan jumlah aliran udara yang harus disediakan untuk mengatasi kehilangan *head* (*head losses*) dan menghasilkan aliran yang diinginkan, diperlukan penjumlahan dari semua kehilangan energi aliran. Pada suatu sistem ventilasi tambang dengan satu mesin angin dan satu saluran keluar, komulatif pemakaian energi disebut *mine head* (Howard, 1997)

Aliran udara dalam ventilasi tambang yang baik adalah contoh aliran tunak (*steady*), yang dihasilkan oleh perbedaan tekanan antara dua titik dalam sistem. Hal ini diasumsikan tanpa mempertimbangkan faktor-faktor seperti perpotongan aliran udara, perubahan aliran udara, tekstur permukaan jalur udara, dan ledakan. Namun, kegiatan penambangan seperti peledakan membuat ventilasi tambang menjadi non-steady, mengakibatkan variasi dalam aliran udara yang tidak teratur. (Haney, 2013)

2.1.3 Head Loss

Sistem ventilasi tambang yang didasarkan pada mekanika fluida, aliran udara terjadi karena adanya perbedaan tekanan antara dua titik dalam sistem. Energi yang dimasukkan ke dalam sistem, baik melalui cara alami maupun mekanis dalam kondisi tunak (*steady*), menimbulkan tekanan yang akan hilang atau dikonsumsi oleh sistem. Hilangnya tekanan ini disebut sebagai *head loss*. *Head loss* disebabkan oleh dua komponen utama, yaitu *friction loss* (H_f) dan *shock loss* (H_x) (Howard, 1997).

$$H_l = H_f + H_x \quad (3)$$

Keterangan:

H_l : *Headloss* (Pa)

H_f : *Friction loss* (Pa)

H_x : *Shock loss* (Pa)

2.1.4 Shock Loss

Kehilangan tekanan udara yang disebabkan oleh perubahan arah, bentuk, dan ukuran saluran aliran udara dikenal sebagai kehilangan akibat guncangan. Kehilangan ini umumnya mencakup sekitar 10–30% dari total *head loss*. (Howard,



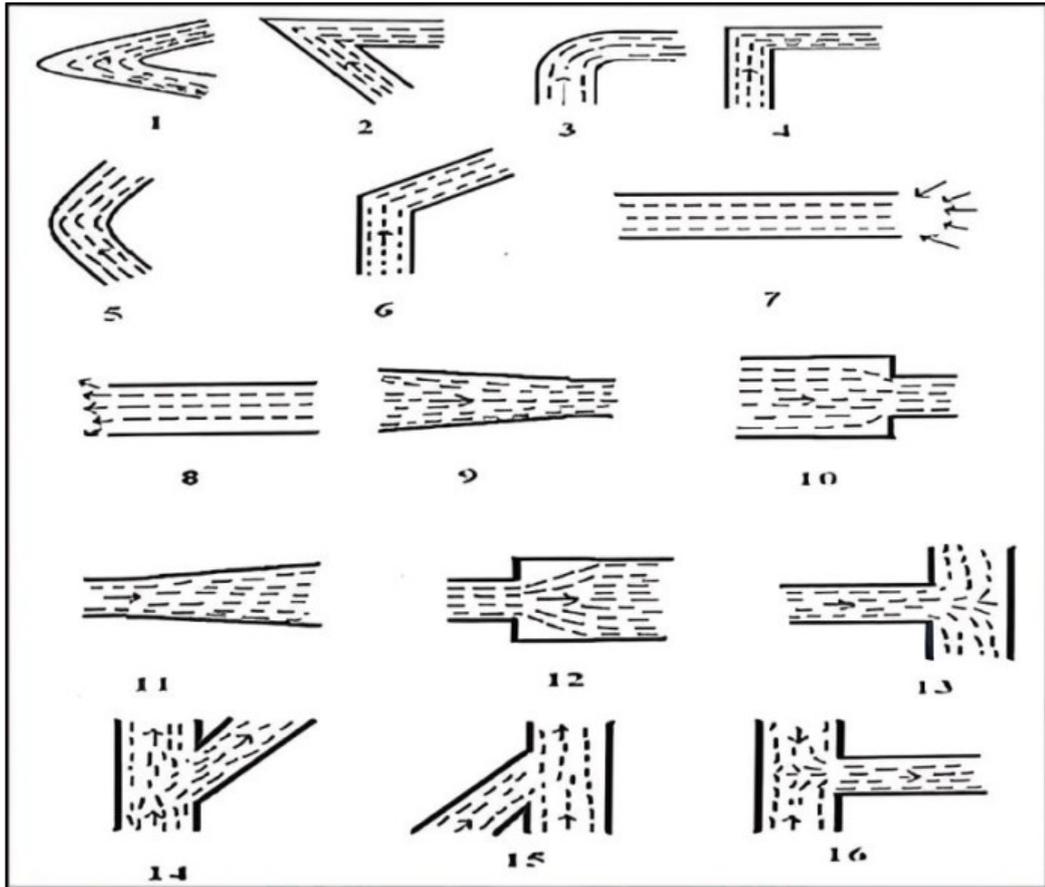
hitungannya *shock loss* dapat dilakukan dengan menghubungkan *shock loss* dan menggunakan metode panjang ekuivalen dengan memanfaatkan faktor

K pada *friction loss* (Elroy, 1935). Panjang ekuivalen dapat ditemukan dalam Tabel 1 dan Gambar 3.

Tabel 1 Panjang ekuivalen untuk berbagai sumber *shock loss*

No	Tipe Jalur Udara	Panjang <i>airways</i> ekuivalen (m)
1	Belokan, sudut tajam, membulat	1
2	Belokan, sudut tajam, meruncing	45
3	Belokan, sudut 90°, membulat	1
4	Belokan, sudut 90°, meruncing	20
5	Belokan, sudut tumpul, membulat	1
6	Belokan, sudut tumpul, meruncing	5
7	Jalur udara masuk	6
8	Jalur udara keluar	20
9	Jalur menyempit secara bertahap	1
10	Jalur menyempit secara langsung	3
11	Jalur meluas bertahap	1
12	Jalur meluas langsung	6
13	<i>Splitting</i> lurus	10
14	<i>Splitting</i> 90°	60
15	<i>Junction</i> lurus	20
16	<i>Junction</i> 90°	10





Gambar 3 Jalur udara untuk mencari panjang *airways* ekuivalen (Elroy, 1935).

$$H_f = \frac{K \cdot O \cdot L_e \cdot Q^2}{A^3} \quad (6)$$

Keterangan:

H_f : *Friction loss* (Pa)

V : Kecepatan aliran (m/s^2)

K : Faktor gesekan untuk densitas udara standar (kg/m^3)

A : Luas penampang saluran (m^2)

O : Keliling saluran (m)

Q : Debit udara (m^3/s)

2.1.5 Hubungan antara resistansi, *friction loss*, dan *shock loss*

Hilang tekanan dalam sebuah saluran udara berbanding lurus dengan kuadrat jumlah udara yang mengalir melaluinya. Dengan demikian, persamaan Atkinson

ditulis sebagai Persamaan 7.

$$R = \frac{K \cdot O \cdot (L + L_e)}{A^3} \quad (7)$$

an:



- H_f : Friction loss (Pa)
 V : Kecepatan aliran (m/s²)
 K : Faktor gesekan untuk densitas udara standar (kg/m³)
 A : Luas penampang saluran (m²)
 O : Keliling saluran (m)
 Le : Panjang *airways* ekuivalen (m)
 L : Panjang *airways* (m)
 Q : Debit udara (m³/s)

Maka dapat dirumuskan untuk mencari *head loss* sebuah sistem dengan Persamaan 8.

$$Hl = \frac{K.O.(L+Le).Q^2}{A^3} \quad (8)$$

Energi yang diberikan untuk mencapai aliran yang stabil digunakan untuk menciptakan perbedaan tekanan dan mengatasi kehilangan *head*. Kehilangan *head* dalam aliran fluida terbagi menjadi dua komponen, yaitu *friction loss* dan *shock loss*.

2.2 Kondisi Udara

Udara segar normal yang disalurkan ke tambang bawah tanah memiliki komposisi sebanyak 78% nitrogen, 21% oksigen, dan 1% gas lainnya. Sesuai dengan Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No. 555 K/M.PE/1995 Pasal 369 Ayat 1 poin a, aliran udara bersih diharuskan memenuhi ketentuan tertentu, yaitu dengan volume oksigen tidak kurang dari 19,5% dan volume karbon dioksida tidak lebih dari 0,5%. Selain ketentuan tersebut, kondisi kualitas udara di tempat kerja selama waktu kerja rata-rata 8 jam diatur dalam Tabel 2.

Tabel 2 Kondisi kandungan udara untuk waktu kerja rata – rata 8 jam

Unsur	Batasan, kerja rata rata 8 jam (%)
Karbon Monoksida (CO)	<0,0005
Methana (CH ₂)	<0,25
Hidrogen Sulfida (H ₂ S)	<0,001
Oksida Nitrat (NO ₂)	<0,003



it Psikometrik Udara

trik adalah ilmu yang mempelajari sifat-sifat *psychrometric*, yaitu sifat dalam kondisi tertentu selama proses pengendalian kelembaban dan

temperatur. Ilmu psikrometri juga memerinci termodinamika campuran udara dan uap air. Udara normal merupakan campuran dari udara kering dan uap air. Perubahan kondisi pada udara berpengaruh pada jumlah uap air di dalamnya. Penentuan campuran udara dan uap air selama proses air *conditioning* menerapkan prinsip-prinsip termodinamika. (Litton, 1993).

Penentuan sifat psikrometrik udara pada kondisi tertentu merupakan persyaratan penting untuk memecahkan permasalahan terkait dengan proses air *conditioning*. Ada dua metode umum untuk menentukan sifat psikrometrik ini, yaitu dengan menggunakan tabel psikrometri dan grafik psikrometri. Pada tekanan barometrik, dua sifat psikrometrik udara menentukan kondisi udara. Sifat psikrometrik yang paling mudah diukur meliputi suhu bola kering (*dry bulb temperature*) dan suhu bola basah (*wet bulb temperature*). Meskipun ada berbagai sifat psikrometrik lain yang dapat diukur, yang paling penting adalah suhu bola kering dan suhu bola basah.

1. Suhu Bola Kering: Suhu ini diukur menggunakan termometer kering dan memberikan indikasi kandungan panas yang ada pada udara dalam satuan *Celcius* dan *Fahrenheit*.
2. Suhu Bola Basah: Suhu ini menunjukkan suhu di mana air mengalami penguapan di udara yang membawa udara dalam keadaan jenuh secara adiabatik pada suhu tersebut. Suhu bola basah diukur dengan termometer yang dibasahi dan dinyatakan dalam satuan *Celcius* dan *Fahrenheit*.

Pengetahuan mengenai sifat-sifat psikrometri ini penting untuk merancang dan mengoperasikan sistem *air conditioning* dengan efisien serta menjaga kondisi udara yang sesuai dengan kebutuhan.

2.2.2 Kuantitas udara

Kuantitas udara memiliki dampak signifikan terhadap kualitas udara di dalam tambang bawah tanah, dengan harapan bahwa udara dari permukaan dapat mencapai lokasi kegiatan penambangan. Pengendalian kuantitas udara melibatkan aspek-aspek seperti perpindahan udara, arah aliran, dan total aliran udara.



an kualitas udara di tambang melibatkan langkah-langkah baik secara upun fisik, dengan menyuplai udara segar dan mengeluarkan pengotor bu, gas, panas, dan udara lembab melalui sistem ventilasi. Memperhatikan

faktor-faktor tersebut, kebutuhan akan udara segar di tambang bawah tanah kadang-kadang melebihi 200 cfm/orang, bahkan mencapai 2,000 cfm/orang. Saat ini, kondisi tambang bawah tanah banyak yang sudah menyediakan aliran udara hingga 10–20 ton udara segar per ton mineral yang ditambang. Upaya ini bertujuan untuk menciptakan kondisi kerja yang aman, nyaman, dan memenuhi standar kesehatan bagi para pekerja tambang serta mendukung proses penambangan dengan efisien (Howard, 1997).

Pengumpulan data kecepatan udara dan luas jalan udara di titik stasiun memiliki tujuan untuk menentukan kebutuhan udara yang optimal dan distribusi yang sesuai untuk setiap jalur yang memerlukan pasokan udara di dalam tambang bawah tanah. Data ini sangat penting untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai jumlah udara yang harus disediakan, sehingga kondisi udara di area kerja tambang dapat dijaga dengan aman dan efisien. Dengan memiliki informasi ini, sistem ventilasi dapat diatur dengan cermat sehingga memberikan aliran udara yang memadai di setiap titik yang membutuhkan, menciptakan lingkungan kerja yang nyaman, dan memenuhi standar keselamatan yang ditetapkan.

$$Q = V \cdot A \quad (9)$$

Keterangan:

Q= Kuantitas aliran udara (m^3/s)

V= Kecepatan aliran udara (m/s)

A= Luas penampang yang dilewati (m^2)

2.3 Mine Fan

Metode yang menggunakan kipas (*fan*) untuk melakukan ventilasi bertujuan menciptakan tekanan ventilasi (positif atau negatif) di mulut tambang. Pendekatan ini diperlukan karena ventilasi alamiah tidak mampu menjangkau area dalam tambang bawah tanah. *Mine fan* digunakan untuk menciptakan kondisi dinamis, mengingat aliran udara dan tekanan yang terus berubah selama operasional tambang. Metode yang menggunakan kipas (*fan*) untuk melakukan ventilasi menciptakan tekanan ventilasi (positif atau negatif) di mulut tambang. an ini diperlukan karena ventilasi alamiah tidak mampu menjangkau area mbang bawah tanah. *Mine fan* digunakan untuk menciptakan kondisi



dinamis, mengingat aliran udara dan tekanan yang terus berubah selama operasional tambang (Mario, 2015).

a. *Auxiliary Fan*

Auxiliary fan bertujuan untuk mengalirkan udara bersih yang dialirkan oleh *main fan* ke area produksi. Sistem *auxiliary fan* membuat *airways* dalam tambang bertambah melalui *duct* yang dihubungkan melalui *auxiliary fan*. *Auxiliary fan* dapat digunakan untuk menghembuskan udara bersih ke area *heading* atau menarik udara kotor ke arah jalur udara keluar (McPherson, 1993).

2.4 Mine Ventilation Control

Selain dari *main* dan *auxiliary ventilation system*, ada juga beberapa kontrol sistem ventilasi dibawah ini.

2.4.1 Bulkhead

Bulkhead berfungsi sebagai penghalang untuk menghentikan aliran udara dan mencegah terjadinya perputaran aliran udara. Pemasangan *bulkhead* dilakukan di lubang bukaan yang dianggap sudah tidak akan digunakan lagi untuk kegiatan produksi dan bukan merupakan jalur udara dari rencana ventilasi yang akan dilaksanakan. Agar aliran udara tidak mengalami kehilangan, *bulkhead* harus dirancang agar kedap udara dan bebas dari segala kebocoran. Pemastian bahwa *bulkhead* benar-benar rapat dan tidak memiliki kebocoran penting untuk memastikan efektivitas sistem ventilasi dan menjaga kondisi udara di area tambang.

2.4.2 Vent door

Vent door digunakan di dalam *drift* yang memerlukan kontrol ventilasi dan hanya dilewati oleh kendaraan. *Vent door* ventilasi berfungsi sebagai *intake* yang dirancang untuk mencegah aliran udara masuk atau memisahkan aliran udara bersih dari aliran udara keluar. PT Freeport Indonesia menggunakan beberapa jenis ventilasi sesuai dengan kegunaannya, antara lain:

- a. *Single pneumatic door* adalah sistem ini dioperasikan menggunakan sebuah linder udara bertekanan (*compressed air cylinder*) dan dilengkapi dengan kelar tarik listrik (*electric pull switch*). Mekanisme kerja dari pintu ini memanfaatkan tekanan udara untuk membuka atau menutup daun pintu



secara otomatis. Keistimewaan dari *single pneumatic door* ventilasi adalah kemampuannya untuk berfungsi baik sebagai unit tunggal yang berdiri sendiri maupun sebagai bagian dari suatu rangkaian yang terdiri dari dua atau lebih unit. Sistem ini memanfaatkan tekanan udara sebagai kekuatan penggerak utama dan sakelar tarik listrik untuk pengoperasian manual jika diperlukan. Hal ini memastikan kontrol yang efisien terhadap aliran udara sesuai dengan kebutuhan dan kondisi lingkungan tambang

- b. *Double pneumatic doors*, sistem yang menggunakan silinder udara bertekanan (*compressed air cylinder*) untuk mengoperasikan pintu-pintu tersebut. Mekanisme kerjanya melibatkan tekanan udara yang mengatur pembukaan dan penutupan pintu secara otomatis. Keistimewaan dari *double pneumatic doors* terletak pada kemampuannya untuk digunakan di daerah yang memiliki perbedaan tekanan udara yang tinggi. Sistem ini memungkinkan kontrol yang lebih efektif terhadap aliran udara, terutama di area di mana perbedaan tekanan antara dua sisi pintu signifikan. Penggunaan *double pneumatic doors* memberikan fleksibilitas dalam mengelola sistem ventilasi di lingkungan tambang, sehingga kondisi udara dapat diatur secara optimal sesuai dengan kebutuhan dan standar keselamatan yang berlaku. Ini adalah salah satu solusi yang efisien untuk menjaga kualitas udara di area kerja tambang
- c. *Standard manual door* ventilasi adalah jenis pintu ventilasi yang dioperasikan secara manual. Pintu ini tidak menggunakan sistem pneumatik atau otomatisasi, melainkan dibuka dan ditutup dengan bantuan tenaga manusia. Ukurannya standar, biasanya 3 x 3m atau 3 x 4m, dan dapat disesuaikan sesuai dengan kebutuhan spesifik.
- d. *Single man door* jenis pintu ventilasi yang dirancang khusus untuk memberikan akses bagi orang. Pintu ini terdiri dari satu daun pintu yang dipasang pada *intake* ventilasi, sekat pemisah (*bulkhead*), atau *regulator* lainnya. Fungsinya adalah memfasilitasi pergerakan pekerja atau *personel* melalui jalur ventilasi dengan memberikan jalan bagi orang yang melewati area tersebut. Contoh ukuran dari *single man door* ventilasi adalah 0.7m x 75 m. Pintu ini sering ditempatkan di lokasi strategis di dalam tambang



untuk memastikan akses yang aman dan efisien bagi pekerja yang memerlukan masuk atau keluar dari area kerja tertentu. Penggunaan *single man door* ventilasi membantu memenuhi kebutuhan keselamatan dan aksesibilitas di lingkungan tambang, sambil tetap memastikan kontrol yang tepat terhadap aliran udara di area tersebut .

2.4.3 Regulator

Regulator adalah perlengkapan yang digunakan untuk menciptakan *shock loss* atau kehilangan udara buatan. Kehilangan ini disebabkan oleh adanya belokan, pembesaran, atau pengecilan penampang yang dipasang secara seri dengan tahanan sebenarnya yang terdapat pada lubang bukaan jalan udara. Tujuannya adalah untuk membatasi kuantitas aliran udara dalam suatu sirkuit.

Pada prinsip pengoperasian *regulator*, proses tersebut tergantung pada tahanan pada jalur aliran udara dan jumlah tekanan yang dihasilkan dari masukan udara ke keluaran udara. *Regulator* dipasang pada jalur jalan udara yang memiliki resistansi lebih kecil dibandingkan dengan jalur lainnya. Dengan pemasangan *regulator*, kehilangan tekanan pada setiap jalur jalan udara menjadi sama, dan *head statis fan* dapat diatur untuk mengatasi kehilangan tekanan pada setiap jalur, baik yang bercabang maupun yang terbagi bebas, sehingga kuantitas udara pada setiap jalur jalan udara dapat dipertahankan sesuai dengan kebutuhan yang telah direncanakan.

2.4.4 Booster

Booster fan digunakan untuk menambah atau meningkatkan jumlah udara pada sistem ventilasi utama yang menuju ke bagian tambang. Fungsi utama *booster fan* adalah membantu kinerja main *fan*. Penting untuk merawat *booster fan* dengan hati-hati, karena penggunaannya dapat mengurangi jumlah udara ventilasi yang mencapai bagian tambang lainnya, berpotensi menyebabkan penurunan kualitas udara secara keseluruhan. Pemasangan *booster fan* harus dilakukan dengan cermat, karena jika ditempatkan di lokasi yang tidak tepat, dapat menyebabkan sirkulasi udara yang tidak diinginkan. Hal ini dapat mengakibatkan penurunan kualitas udara



tambang tersebut, mempengaruhi kondisi kerja dan keselamatan pekerja. Lokasi dan perawatan *booster fan* perlu diperhatikan agar dapat memberikan kontribusi positif pada sistem ventilasi secara keseluruhan.

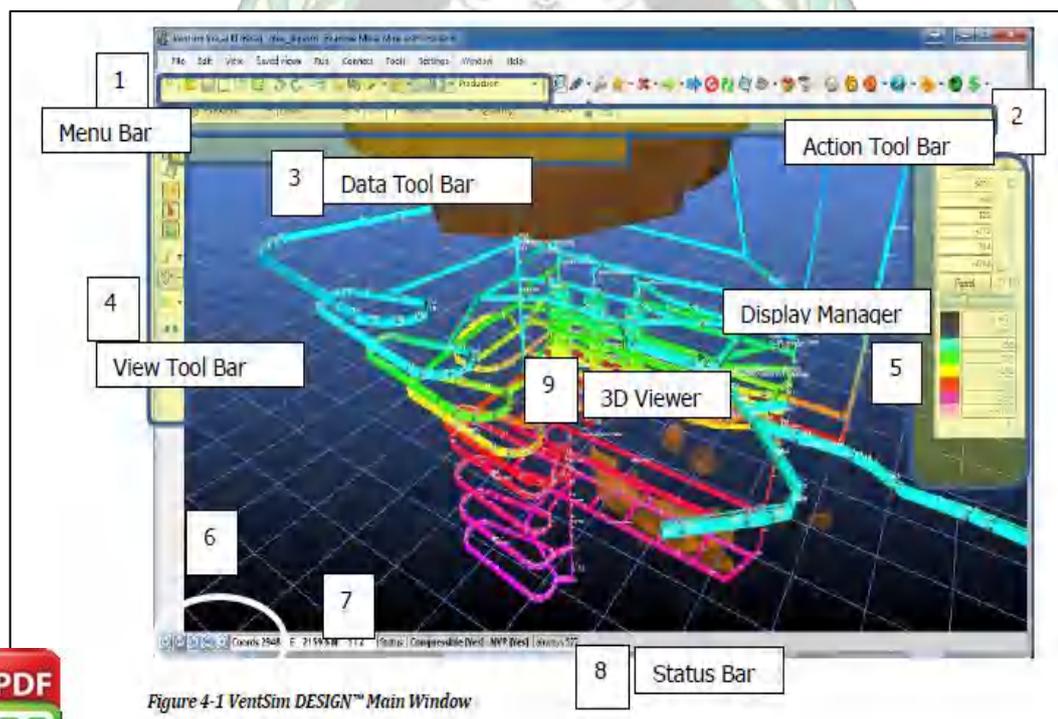
2.5 Ventsim

Ventsim adalah sebuah aplikasi yang memungkinkan kita untuk mensimulasikan sistem ventilasi. Dalam mensimulasikan sistem ventilasi, ventsim memiliki fungsi – fungsi sebagai berikut :

– fungsi sebagai berikut :

1. Menyediakan informasi aliran udara dalam tambang.
2. Melakukan simulasi untuk perencanaan baru.
3. Membantu dalam perencanaan kebutuhan ventilasi jangka pendek dan jangka panjang.
4. Membantu pada pemilihan tipe sirkuit kipas untuk ventilasi tambang.
5. Membantu dalam pemilihan pengembangan ukuran kipas.
6. Membantu dalam analisis finansial untuk pilihan – pilihan ventilasi.
7. Mensimulasikan alur dan konsentrasi asap, debu, atau gas untuk situasi perancangan dan darurat.

Dalam pembuatan simulasi jaringan ventilasi menggunakan *software* ventsim ini diperlukan beberapa input data berupa resistansi udara, panjang jalur udara, luas jalur udara dan data dari *fan*. Tampilan *software* ventsim diperhatikan pada Gambar 4



Gambar 4 Tampilan dari *Software* Ventsim



2.6 Leakage

Tambang bawah tanah menggunakan *stoppings*, *doors*, dan beberapa kontrol ventilasi lainnya untuk memisahkan dua jalur udara, yaitu *intake* dan *exhaust*. Dalam tambang yang kompleks, sistem ventilasi memerlukan ratusan struktur kontrol ventilasi. Perbedaan tekanan udara yang melewati struktur tersebut dapat menyebabkan kehilangan sejumlah udara yang tidak dapat diabaikan, seperti beberapa bagian kuantitas udara yang seharusnya mencapai area kerja. Kehilangan udara semacam ini disebut sebagai *leakage*. Para ahli ventilasi telah memperkirakan bahwa pada tambang batubara, *leakage* dapat mencapai rentang 30 sampai 60 persen dari total kuantitas udara yang dipompa oleh *surface fans*. *Leakage* dapat menjadi perhatian serius karena dapat mengurangi efisiensi sistem ventilasi dan mempengaruhi kondisi udara di area kerja tambang bawah tanah. Manajemen *leakage* perlu dikelola dengan cermat untuk memastikan distribusi udara yang optimal di seluruh tambang (Litton, 1993).

a. persen Aliran *Leakage* (%L)

Persentase ini menggambarkan fraksi antara total kuantitas udara sirkuit pendek yang melewati *main fans* sebelum sampai ke area kerja. Dapat dilihat sesuai dengan rumus:

$$\%L = \frac{(Q_T - Q_E)}{Q_T} \times 100 \quad (10)$$

Keterangan

Q_T = Total kuantitas udara yang melewati *main fan* (m^3/s)

Q_E = Total kuantitas udara yang sampai ke area kerja (m^3/s)

2.6 Kebutuhan *Airflow* Pada Tambang Bawah Tanah

Kebutuhan aliran udara bersih dalam ventilasi tambang bawah tanah didasarkan pada jumlah pekerja tambang dan alat yang digunakan di dalam tambang tersebut. Aliran udara yang bersih memiliki dampak signifikan pada kesejahteraan pekerja tambang serta kinerja alat dan mesin yang beroperasi di lingkungan tambang bawah

enurut Keputusan Menteri Nomor 555 tahun 1995, Pasal 369 Ayat 4, aliran udara bersih yang harus dialirkan ke dalam tambang bawah tanah berdasarkan jumlah pekerja terbanyak pada suatu lokasi kerja. Dengan



ketentuan setiap pekerja membutuhkan $2 \text{ m}^3/\text{menit}$, dan tambahan $3 \text{ m}^3/\text{menit}$ untuk setiap *horse power* (tenaga kuda) bila mesin diesel atau alat dioperasikan. Rumus untuk menghitung kebutuhan aliran udara pada tambang bawah tanah, sesuai dengan regulasi pemerintah Indonesia, dapat dinyatakan sebagai berikut :

- a. Jumlah kebutuhan udara untuk pekerja jumlah pekerja adalah jumlah pekerja terbanyak yang berada pada suatu area di dalam tambang bawah tanah.
 - b. Jumlah kebutuhan udara untuk alat mekanis jumlah HP total yang digunakan $\times (3 \text{ m}^3/\text{minute})/ \text{BHP HP}$, total mesin adalah HP total terbanyak dari semua HP mesin atau alat yang digunakan di dalam suatu area di dalam tambang bawah tanah, $\text{HP} = \text{horse power}$ (*power* atau daya mesin).
 - c. Jumlah kebutuhan udara total (pekerja dan mesin atau alat mekanik)
- PT Freeport Indonesia juga memiliki kriteria desain (*PTFI ventilation design criteria*) tersendiri dalam menyuplai aliran udara yang dibutuhkan mesin diesel atau alat berat yang bekerja dalam tambang bawah tanah, yaitu sebesar $0,08 \text{ (m}^3/\text{s)/kW}$ didasarkan atas rekomendasi dari jasa ventilasi tambang (PTFI konsultan ventilasi independen).

2.7 Pengendalian debu

Pengendalian debu pada operasi penambangan dengan menggunakan berbagai macam metode yaitu (Robert, 2010):

1. Sistem Ventilasi

Ventilasi adalah kontrol utama terhadap debu di lingkungan pertambangan. Fungsinya melibatkan penggunaan sistem untuk mendilusi dan mengalirkan debu selama proses penambangan. Selain efektif dalam menangkap kandungan debu atau mengurangi debu pada sumbernya, sistem ventilasi juga harus mampu mengalirkan debu yang masuk ke dalam tambang. Beberapa kriteria ventilasi yang diterapkan untuk pengendalian debu antara lain :

- a) Kecepatan udara yang masuk 1 m/s .
- b) Pembersihan gas-gas hasil peledakan.

Pergantian udara pada tambang bawah tanah seperti *crusher* (10 pergantian/jam).

Peningkatan udara pada sistem ventilasi.



- e) Mendilusi aliran udara untuk pengendalian debu.
- f) Mendilusi aliran udara untuk gas mesin diesel dan partikulat matter ($3 \text{ m}^3/\text{min}$, $100 \text{ cfm}/\text{hp}$ ($0,0357 \text{ m}^3/\text{s} - \text{kW}$).

2. *Water application*

Penanganan debu dengan menggunakan air merupakan suatu metode yang efektif dan ekonomis. Penggunaan air dapat memberikan solusi yang efektif untuk mengurangi debu di area tersebut. Selain metode pengendalian debu dengan menggunakan air, terdapat pula metode lain yang dapat digunakan, seperti 6 cara berikut :

- a. *Dust knock down.*
- b. *Dust suppression.*
- c. *Dust blocking.*
- d. *Directing airflow.*
- e. *Providing airflow.*
- f. *Cleanup.*

3. *Avoidance*

Avoidance (pencegahan) merupakan cara untuk mengontrol pekerja yang akan masuk ke area dengan tingkat debu tinggi. Ini dapat dilakukan dengan memasang peringatan di daerah terlarang dan menetapkan bahwa pekerja yang akan memasuki area tersebut harus menggunakan alat perlindungan pernapasan. Rotasi pekerja bukan bagian dari konsep *avoidance*, melainkan merupakan suatu strategi atau taktik manajemen yang dapat digunakan untuk mengurangi paparan pekerja terhadap debu dengan membatasi waktu kerja mereka di area tertentu.

4. *Control monitoring*

Control monitoring lebih mudah digunakan untuk memastikan sistem pengumpulan debu bekerja dengan baik. Jika peralatan pengukur dipasang maka pengontrolan harian dapat dilakukan.

5. *Respiratory protection*

Respiratory protection merupakan peralatan pengendalian debu tambahan. Alatan ini hanya didesain untuk penggunaan dalam waktu yang singkat. Ini disebabkan respirator mudah terkontaminasi, dan dapat menyebabkan



iritasi pada kulit dikarenakan sering tidak digunakan oleh para pekerja. Jika digunakan dengan benar, respirator dapat secara efektif mengurangi pekerja dari paparan debu, dan pekerja harus dilatih mengenai pemasangan respirator yang benar. Ketika rekayasa pengendalian debu (*respiratory protection*) telah dikembangkan maka pekerja dapat bekerja dalam waktu yang wajar, walaupun udara terkontaminasi debu yang melebihi batas yang diizinkan. Apabila *respiratory protection* akan digunakan maka harus memenuhi persyaratan berikut :

- a. Respirator telah disetujui oleh NIOSH *under* 42 CFR bagian 84 yang berlaku dan digunakan sesuai dengan pelatihan dan instruksi.
- b. Tambang harus mengembangkan sebuah program respirator tertulis yang konsisten dengan syarat ANSIZ88.2-1969 yang dipublikasikan oleh *American National standart Institute*.

2.8 *Water mist sprays*

Tujuan utama adalah untuk mengendalikan dan mengurangi debu yang dihasilkan selama proses penambangan di lingkungan terowongan. Sistem ini terdiri dari pipa-pipa dengan *nozzle* khusus yang dirancang untuk menghasilkan partikel air sangat kecil, menciptakan lapisan kabut yang efektif menangkap dan menetralsisir partikel debu di udara. Keberadaan water mist spray tidak hanya meningkatkan keamanan pekerja dalam menghindari potensi bahaya debu, tetapi juga berkontribusi pada menjaga kualitas udara di tambang bawah tanah, memberikan dampak positif terhadap kesehatan manusia dan mengurangi risiko kerusakan peralatan akibat akumulasi debu yang berlebihan, Dapat diperhatikan pada Gambar 5 (Smith, 2020).





Gambar 5 Water mist spray

