

PREDIKSI GETARAN PELEDAKAN PERTAMBANGAN BATUBARA MENGUNAKAN GEOSTATISTIKA

Penulis:

Nur Efendi, Eri Barlian, Nurhasan Syah, Indang Dewata,
Mulya Gusman, Iswandi U, Aprizon Putra



PREDIKSI PELEDAKAN PERTAMBANGAN BATUBARA MENGUNAKAN GEOSTATISTIKA

**Nur Efendi
Eri Barlian
Nurhasan Syah
Indang Dewata
Mulya Gusman
Iswandi U
Aprizon Putra**



GETPRESS INDONESIA

PREDIKSI GETARAN PELEDAKAN PERTAMBANGAN BATUBARA MENGGUNAKAN GEOSTATISTIKA

Penulis : Nur Efendi

Eri Barlian
Nurhasan Syah
Indang Dewata
Mulya Gusman
Iswandi U
Aprizon Putra

ISBN :

Editor : Mila Sari, M.Si.

Penyunting: Yuliatr Novita, M.Hum.

Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

Penerbit: GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi:

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah, Padang, Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku yang berjudul **"Prediksi Getaran Peledakan Pertambangan Batubara Menggunakan Geostatistika"** ini dapat terselesaikan dengan baik. Buku ini adalah hasil penelitian yang dilakukan penulis pada 2024 yang merupakan upaya untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh kegiatan peledakan dalam pertambangan batubara, khususnya terkait getaran tanah yang dapat mempengaruhi ekosistem sekitar serta kualitas hidup masyarakat di sekitarnya.

Pertambangan batubara merupakan salah satu sektor industri yang berperan penting dalam perekonomian, namun kegiatan ini tidak lepas dari risiko dan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu dampak yang cukup signifikan adalah getaran akibat peledakan, yang jika tidak dikelola dengan baik, dapat menimbulkan berbagai masalah, seperti kerusakan infrastruktur, gangguan kesehatan, serta kerugian ekologis. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang komprehensif dan ilmiah untuk memitigasi dampak tersebut.

Dalam buku ini, kami menguraikan berbagai konsep dan metode yang dapat digunakan untuk menganalisis dan mengelola getaran peledakan, dengan penekanan khusus pada penggunaan geostatistika. Pendekatan geostatistika memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap pola sebaran getaran, serta membantu dalam perencanaan dan pelaksanaan kegiatan peledakan yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi penting bagi akademisi, praktisi industri, serta pembuat kebijakan dalam upaya mengurangi dampak negatif peledakan di sektor pertambangan batubara.

Kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki kekurangan dan keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan untuk perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi yang berarti dalam pengelolaan lingkungan di bidang pertambangan batubara.

Padang, September 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB II LINGKUNGAN PERTAMBANGAN BATUBARA: DAYA DUKUNG, DAYA TAMPUNG, DAN STRATEGI PENGELOLAAN	4
2.1 Lingkungan Hidup	6
2.2 Daya Dukung Lingkungan (<i>Environmental Carrying Capacity</i>)	8
2.3 Daya Tampung Lingkungan (<i>Environmental Absorption Capacity</i>)	10
2.4 Getaran pada Penambangan Batubara	12
BAB III PELEDAKAN	20
3.1 Peledakan, Geometri dan Dimensi Pengeboran, Desain Peledakan, Fragmentasi Hasil Peledakan.	22
3.2 Rancangan Teknik Peledakan	44
3.3 Vibrasi Peledakan	45
3.4 Pengamanan Gudang Handak	48
3.5 Geostatistik (Statistik Spasial)	52
BAB IV PENDEKATAN SPASIAL DAN STRUKTURAL DALAM ANALISIS GETARAN PELEDAKAN DAN KEBERLANJUTAN PERTAMBANGAN.....	63
4.1 Kriging	63

4.2 Interpretative Structural Modeling (ISM)	69
4.3 Analisis Multidimensional Scaling (MDS)	72
BAB IV STUDI KASUS DAMPAK GETARAN PELEDAKAN PERTAMBANGAN BATUBARA.....	75
BAB VI STRATEGI MITIGASI KONFLIK SOSIAL AKIBAT GETARAN PELEDAKAN.....	80
BAB IV PENUTUP	84
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN	97

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Baku tingkat getaran peledakan Indonesia SNI 7571 : 2010	18
---	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1. Wilayah Study Lokasi Penelitian.....	21
Gambar 3. 2. Klasifikasi Bahan Peledak (Manon, 1976)	24
Gambar 3. 3. Segitiga Api (Hasibuan dkk, 2020).....	26
Gambar 3. 4. Proses Pemecahan Tingkat I (Moelhim, 1990)	30
Gambar 3. 5. Proses Pemecahan Tingkat II (Moelhim, 1990).....	31
Gambar 3. 6. Proses Pemecahan Tingkat III (Moelhim, 1990)	32
Gambar 3. 7. Geometri peledakan menurut Teori R.L.Ash (1967)	33
Gambar 3. 8. Pola Pemboran Bujur Sangkar (Anonim, 2009)	40
Gambar 3. 9. Pola Pemboran Persegi Panjang (Anonim, 2009).....	40
Gambar 3. 10. Pola Pemboran Zig-Zag Bujur Sangkar (Anonim, 2009)	41
Gambar 3. 11. Pola Pemboran Zig-Zag Persegi Panjang (Anonim, 2009)	42
Gambar 3. 12. Pola Peledakan (Anonim, 2009).....	43
Gambar 3. 13. Variogram eksperimental dan variogram model <i>spherical</i>	53
Gambar 3. 14. Komponen Variogram.....	55
Gambar 3. 15. Model variogram dengan <i>nugget effect</i> , a) <i>Spherical</i> b) <i>Exponential</i> , c) <i>Gaussian</i>	59
Gambar 3. 16. Bentuk Anisotropi Terhadap Sistem Koordinat Data	60
Gambar 4. 1. Visualisasi 3D untuk garis kontur.....	65
Gambar 4. 2. Visualisasi 3 dimensi dari hasil kriging data ppv dengan satuan mm/s menggunakan metode ordinary kriging.	67
Gambar 4. 3. Hubungan Driver Power dan Struktur Hirarki	70

BAB 1

PENDAHULUAN

Dalam era perkembangan industri yang pesat, sektor pertambangan batubara tetap menjadi salah satu pilar utama perekonomian di berbagai negara, termasuk Indonesia. Namun, di balik potensi ekonomi yang menjanjikan, aktivitas pertambangan batubara juga membawa tantangan tersendiri, terutama dalam aspek lingkungan dan sosial. Salah satu isu krusial yang menjadi perhatian utama adalah dampak getaran peledakan terhadap lingkungan sekitar dan masyarakat yang bermukim di dekat area pertambangan.

Buku ini hadir sebagai sebuah kajian komprehensif yang membahas secara mendalam mengenai dampak getaran peledakan dalam industri pertambangan batubara, dengan menggunakan pendekatan geostatistika. Melalui analisis yang cermat dan metodologi yang terukur, kami berupaya menyajikan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana aktivitas peledakan dapat mempengaruhi lingkungan sekitar, serta langkah-langkah mitigasi yang dapat diambil untuk meminimalkan dampak negatifnya.

Pertambangan batubara telah lama menjadi sektor vital dalam perkembangan ekonomi dan industri di berbagai belahan dunia. Di Indonesia, industri ini memainkan peran signifikan dalam mendorong pertumbuhan ekonomi nasional. Namun, seiring dengan manfaat ekonomi yang dihasilkan, aktivitas pertambangan batubara juga membawa konsekuensi terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar.

Menurut Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 Tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan

yang Benar, pengelolaan lingkungan kerja mencakup antisipasi, pengenalan, pengukuran, penilaian, pencegahan, pengelolaan, pengukuran, penilaian, dan evaluasi dalam lingkungan kerja.

Orang selalu dipengaruhi dan mempengaruhi lingkungannya, baik secara sadar maupun tanpa disadari (Syah, N., 2021). Salah satu dampak aktivitas penambangan batubara terkait dengan masyarakat adalah salah satu dampak langsung yang ditimbulkannya terhadap lingkungan. Namun, tidak semua kegiatan pertambangan akan memiliki dampak negatif bagi masyarakat sekitar; sebaliknya, mereka akan memiliki dampak positif, seperti semakin banyak kesempatan kerja, kesempatan berusaha yang lebih merata, dan peningkatan nilai ekspor dan dana. Industri memiliki dampak yang signifikan pada budaya, sosial, dan gaya hidup masyarakat selain mengubah kualitas lingkungan (Barlian, E., & Yunhendri Danhas, S. P., 2022).

Salah satu dampak signifikan dari kegiatan pertambangan batubara adalah getaran yang dihasilkan dari proses peledakan. Getaran ini tidak hanya berpotensi mengganggu kenyamanan masyarakat sekitar, tetapi juga dapat mengancam integritas struktur bangunan dan infrastruktur di sekitar area pertambangan. Sebagaimana diungkapkan oleh Santoso EKO (2021), getaran tanah yang tinggi dapat menyebabkan gangguan, ketidaknyamanan, bahkan kerusakan struktur di sekitarnya.

PT. Insani Baraperkasa (PT. IBP), sebagai salah satu perusahaan pertambangan batubara di Indonesia, menjadi contoh nyata bagaimana industri ini beroperasi di tengah kompleksitas tantangan lingkungan dan sosial. Dengan wilayah operasi seluas 24.477,60 Hektar, PT. IBP harus mengelola dampak kegiatannya terhadap lingkungan sekitar, termasuk Desa Kertabuana di Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur.

Dalam konteks ini, penggunaan metode geostatistika, khususnya teknik Kriging, menjadi sangat relevan. Metode ini memungkinkan estimasi yang lebih akurat terhadap penyebaran dan intensitas getaran tanah akibat peledakan. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang pola dan karakteristik getaran, diharapkan dapat dikembangkan strategi mitigasi yang lebih efektif untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat.

Buku ini akan menjelaskan bagaimana getaran peledakan dari aktivitas pertambangan batubara mempengaruhi lingkungan dan masyarakat sekitar. Melalui analisis geostatistika, kami akan menyajikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang penyebaran getaran, faktor-faktor yang mempengaruhinya, serta rekomendasi untuk pengelolaan dampak yang lebih baik.

Dengan demikian, diharapkan buku ini dapat menjadi referensi bagi para praktisi industri pertambangan, akademisi, pembuat kebijakan, dan semua pihak yang berkepentingan dalam upaya mencapai keseimbangan antara kepentingan ekonomi dan kelestarian lingkungan dalam industri pertambangan batubara di Indonesia.

BAB II

LINGKUNGAN PERTAMBANGAN BATUBARA: DAYA DUKUNG, DAYA TAMPUNG, DAN STRATEGI PENGELOLAAN

Dalam lanskap industri pertambangan batubara yang terus berkembang, pemahaman mendalam tentang interaksi antara aktivitas penambangan dan lingkungan sekitarnya menjadi semakin krusial. Bab ini mengajak pembaca untuk menyelami kompleksitas ekosistem pertambangan batubara, dengan fokus khusus pada aspek-aspek lingkungan yang terkait erat dengan operasi penambangan. Untuk memahami konteks ini secara menyeluruh, kita perlu memulai dengan konsep fundamental yang mendasari seluruh operasi pertambangan: Izin Usaha Pertambangan Operasi Produksi.

Izin Usaha Pertambangan Operasi Produksi adalah aktivitas yang berkaitan dengan pengusahaan mineral atau batubara mencakup berbagai langkah-langkah seperti penyelidikan umum, eksplorasi, studi kelayakan, konstruksi, penambangan, pengolahan dan pemurnian, pengangkutan dan penjualan, serta aktivitas setelah penambangan. Sedangkan dalam Undang-Undang Nomor 3 tahun 2020 Tentang Pertambangan Mineral dan Batubara disebutkan bahwa operasi pertambangan bahan galian mencakup penyelidikan umum, eksplorasi, eksploitasi, pengolahan dan pemurnian, transportasi, penyimpanan, dan penjualan.

Berdasarkan teknis operasional, maka ada dua metode penambangan di sub-sektor pertambangan umum yaitu metode tambang bawah tanah (*underground mine*) dan metode tambang terbuka (*open pit mine*). Dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Pertambangan Yang Baik, disebutkan pengertian tambang

permukaan adalah jenis penambangan yang dilakukan di atas permukaan tanah atau dari atas permukaan air untuk menggali bahan galian, sementara tambang bawah tanah, juga disebut sebagai tambang bawah tanah, adalah suatu sistem penambangan untuk mengekstrak bahan galian yang dilakukan di bawah tanah, dengan metode kamar dan pilar, yang berarti penambangan menggunakan endapan batubara yang tidak digunakan sebagai penyangga dan endapan batubara yang diambil sebagai kamar; metode panjang, yang berarti membuat lubang maju yang berfungsi sebagai lubang utama dan lubang pengiring saat batubara diambil dari lubang bukaan. Dibandingkan dengan bidang industri lainnya, lingkungan kerja di pertambangan yaitu:

1. Dibandingkan dengan beberapa sektor bisnis lainnya, pengorganisasian kerja untuk kegiatan pertambangan umum lebih kompleks.
2. Kegiatan pertambangan terbuka terpengaruh langsung oleh cuaca karena dilakukan di luar gedung.
3. Industri pertambangan biasanya berada di daerah terisolir (remote), mereka harus menyediakan berbagai infrastruktur secara mandiri.
4. Karena bahan baku industri pertambangan masih sangat alami, spesifikasinya sangat beragam.
5. Ruang kerja terkungkung, juga dikenal sebagai ruang terkungkung, yang umumnya ditemukan dalam aktivitas tambang bawah tanah.
6. Harga komoditas tambang sangat ditentukan oleh pasar.

Menurut Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2021 menjelaskan, lingkungan kerja atau tempat kerja adalah tiap ruangan atau lapangan tertutup atau terbuka, bergerak atau tetap, di mana pekerja bekerja dan di mana sumber atau sumber bahaya ada.

2.1 Lingkungan Hidup

Dalam perjalanan peradaban manusia, kemajuan teknologi dan industri telah membawa kita ke era yang belum pernah terjadi sebelumnya dalam hal produktivitas dan inovasi. Namun, di balik kemajuan ini, tersembunyi sebuah realitas yang semakin mendesak untuk dihadapi: dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan alam yang menopang kehidupan kita.

Seiring dengan pertumbuhan populasi global dan meningkatnya kebutuhan akan sumber daya alam, tekanan pada ekosistem bumi terus meningkat. Dari perubahan iklim hingga hilangnya keanekaragaman hayati, dari polusi udara dan air hingga degradasi tanah, jejak ekologis manusia telah mencapai skala yang mengkhawatirkan. Sebagaimana ditunjukkan oleh Indang Dewata (2016), "aktivitas manusia berdampak langsung terhadap terjadinya krisis ekologi, yang ditandai dengan peningkatan skala, luas, dan tingkat keseriusan masalah lingkungan di seluruh dunia. Akibatnya, masalah ini mulai menjadi masalah yang menarik perhatian publik."

Di antara berbagai aktivitas manusia yang berkontribusi terhadap permasalahan lingkungan, industri pertambangan menempati posisi yang unik. Di satu sisi, industri ini menyediakan bahan baku yang vital bagi kehidupan modern dan pembangunan ekonomi. Di sisi lain, dampak lingkungannya seringkali signifikan dan jauh melampaui batas-batas operasional tambang itu sendiri. Seperti yang dicatat, "Industri pertambangan adalah salah satu aktivitas yang sangat terkait dengan masalah-masalah lingkungan. Kegiatan penambangan memengaruhi lingkungan di luar daerah kerja penambangan dan pengolahan, seringkali melampaui batas wilayah kuasa penambangan".

Dalam konteks ini, pemahaman yang mendalam tentang hubungan antara manusia, industri, dan lingkungan menjadi semakin penting. Dengan kata lain, lingkungan hidup tidak

terlepas dari kehidupan manusia. Unsur-unsur lingkungan hidup dapat dibagi menjadi:

1. Unsur Fisik (Abiotik): Terdiri dari benda-benda tidak hidup seperti suhu, udara, cahaya atmosfer, hara mineral, air, tanah, dan api. Abiotik terdiri dari batuan, tanah, air, dan udara; cuaca dan iklim memengaruhi keberadaan organisme di suatu tempat. Kondisi tanah, cuaca, dan iklim sangat memengaruhi keberadaan dan pertumbuhan tumbuhan. Tumbuhan sayuran yang sangat baik dalam komponen biotik juga dipengaruhi oleh komponen abiotik. Sebagai contoh, keberadaan tumbuhan memengaruhi suhu udara. Jika kita berada di lingkungan dengan banyak tumbuhan, udara akan lebih nyaman. Proses juga saling mempengaruhi di lingkungan abiotik. Selain batuan atau bahan induk, tanah juga dipengaruhi oleh iklim dan getaran peledakan.
2. Unsur Hayati (Biotik): mencakup makhluk hidup seperti manusia, hewan, tumbuh-tumbuhan, dan jasad renik. Semua makhluk hidup, mulai dari mikroorganisme hingga tumbuhan dan hewan, termasuk lingkungan biotik. Lingkungan abiotik terdiri dari segala kondisi di sekitar makhluk hidup dan bukan makhluk hidup, seperti batuan, tanah, mineral, udara, angin, curah hujan, cahaya matahari, dan lainnya. Lingkungan biotik juga disebut lingkungan anorganik. Biotik dan abiotik saling mempengaruhi lingkungan hidup alami.
3. Sosial, unsur ini meliputi adat istiadat, hukum, moral, kepercayaan dan kesenian. Dampak yang ditimbulkan akibat peledakan adalah getaran meliputi:
 - a. Bangunan yang terdampak akibat getaran.
 - b. Penurunan tingkat kenyamanan di sekitar wilayah tambang.
 - c. Kerugian bagi investor akibat daerah yang terdampak.
4. Efek peledakan terhadap masyarakat sebagai akibat dari kegiatan penambangan batubara. Risiko ledakan menimbulkan kerusakan fisik dan luka bagi penduduk

sekitar tambang. Kerusakan lingkungan yang lebih khusus yang disebabkan oleh peledakan adalah dampak getaran peledakan, yang diklasifikasikan menurut jarak aman atau tidak aman dalam zonasi getaran peledakan.

2.2 Daya Dukung Lingkungan (*Environmental Carrying Capacity*)

Dalam era pembangunan yang pesat, kita dihadapkan pada tantangan besar untuk menyeimbangkan kebutuhan ekonomi dengan kelestarian lingkungan. Salah satu konsep kunci dalam upaya mencapai keseimbangan ini adalah pemahaman tentang daya dukung lingkungan. Konsep ini menjadi semakin penting, terutama dalam konteks industri ekstraktif seperti pertambangan batubara, yang memiliki potensi dampak signifikan terhadap ekosistem sekitarnya.

Daya dukung lingkungan bukan hanya sebuah istilah abstrak dalam diskusi keberlanjutan. Ia merupakan parameter konkret yang mengukur kapasitas lingkungan untuk mendukung berbagai bentuk kehidupan, termasuk aktivitas manusia, tanpa mengalami degradasi yang tidak dapat dipulihkan. Berdasarkan Undang Undang 32 Tahun 2009, tentang Daya dukung lingkungan, yang didefinisikan dalam Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, adalah kemampuan lingkungan untuk mendukung kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya serta menjaga keseimbangan antara keduanya.

Mengevaluasi daya dukung lingkungan terhadap dampak getaran peledakan batubara dari pertambangan dapat dicapai melalui penggunaan metode geostatistik, suatu metode statistik yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis data spasial, seperti data yang terkait dengan penyebaran batubara, struktur geologi, dan parameter lingkungan lainnya.

Untuk menilai efek getaran peledakan batubara, metode geostatistik dapat digunakan untuk beberapa tujuan:

1. Pemetaan Getaran: Metode geostatistik dapat digunakan untuk memetakan distribusi getaran yang dihasilkan oleh peledakan batubara di area tambang. Data spasial dikumpulkan dari berbagai titik di sekitar area peledakan, dan kemudian dibuat model spasial yang menunjukkan sebaran getaran.
2. Pemodelan Dampak Lingkungan: Selain itu, geostatistika dapat digunakan untuk memodelkan dampak getaran peledakan batubara terhadap lingkungan sekitarnya. Ini melibatkan pengumpulan data tentang parameter lingkungan seperti struktur tanah, kualitas air, dan kepadatan vegetasi, lalu menggunakan teknik geostatistika untuk mengetahui bagaimana getaran peledakan dapat mempengaruhi lingkungan sekitarnya.
3. Peramalan Dampak Masa Depan: Dengan menggunakan data historis dan model geostatistik yang dikembangkan, dampak getaran peledakan batubara pada masa depan dapat diramalkan. Ini dapat membantu dalam pengelolaan risiko dan mitigasi dampak lingkungan di kawasan pertambangan.
4. Interpretative Structural Modeling (ISM) dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antara berbagai faktor lingkungan, dampak getaran, dan faktor lain yang relevan dalam sistem lingkungan pertambangan batubara. ISM melibatkan identifikasi dan pemodelan hubungan hierarkis antara faktor-faktor tersebut, serta menentukan tingkat kepentingan relatif dari setiap faktor terhadap sistem secara keseluruhan.
5. Multi Dimensional Scaling (MDS), Metode statistik multivariat yang digunakan untuk mengevaluasi kesamaan atau perbedaan antara objek yang didasarkan pada matriks jarak atau perbedaan antara mereka. Dalam keadaan seperti ini, MDS dapat digunakan untuk menyelidiki hubungan antara distribusi variabel lingkungan dan tingkat dampak

getaran peledakan batubara. Ini dapat membantu menemukan pola-pola spasial dan hubungan antara variabel lingkungan dan dampak getaran.

Dengan menggabungkan pendekatan di atas, dapat memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang daya dukung lingkungan terhadap dampak getaran peledakan batubara dengan menggabungkan metode di atas. Pemahaman ini dapat membantu dalam merencanakan cara yang efektif dan berkelanjutan untuk mengurangi dampak lingkungan di daerah pertambangan batubara. Metode geostatistik memerlukan data yang akurat dan representatif untuk menilai dampak lingkungan tambang batubara. Selain itu, ahli geologi, ahli lingkungan, dan ahli statistik harus bekerja sama untuk memastikan bahwa kegiatan pertambangan dan pelestarian lingkungan tetap seimbang.

2.3 Daya Tampung Lingkungan (*Environmental Absorption Capacity*)

Daya dukung lingkungan merupakan konsep fundamental dalam pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Menurut Rees (1996), daya dukung lingkungan didefinisikan sebagai "kapasitas lingkungan untuk mendukung aktivitas manusia atau populasi organisme dalam batas-batas yang dapat diterima tanpa menyebabkan kerusakan atau degradasi yang tidak dapat diperbaiki". Konsep ini menjadi semakin penting dalam konteks industri ekstraktif seperti pertambangan batubara, yang memiliki potensi dampak signifikan terhadap ekosistem.

Dalam konteks pertambangan, daya dukung lingkungan sering dikaitkan dengan kemampuan lingkungan untuk menyerap atau menahan beban dari aktivitas industri. Seperti yang dijelaskan oleh Liu dan Borthwick (2011), "daya dukung lingkungan dapat diukur dengan kapasitas lingkungan untuk

menyerap polutan dari air atau udara yang dihasilkan oleh kegiatan pertambangan tanpa merusak ekosistem atau mengganggu keseimbangan ekologis". Ini menekankan pentingnya memahami ambang batas ekosistem dalam menyerap dampak aktivitas manusia.

Konsep yang terkait erat dengan daya dukung adalah daya tampung lingkungan. Menurut Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia (2014), daya tampung lingkungan didefinisikan sebagai "kemampuan lingkungan hidup untuk menyerap zat, energi, dan/atau komponen lain yang masuk atau dimasukkan ke dalamnya". Dalam konteks pertambangan batubara, pemahaman tentang daya tampung lingkungan menjadi krusial untuk menentukan batas-batas aman operasi pertambangan.

Hardjasoemantri (2005) menekankan bahwa "untuk pertambangan batubara, konsep daya dukung dan daya tampung lingkungan penting dipertimbangkan dalam perencanaan dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan". Ini menggarisbawahi kebutuhan untuk mengintegrasikan pemahaman tentang kapasitas lingkungan ke dalam proses pengambilan keputusan dan perencanaan operasional pertambangan.

Lebih lanjut, Svarstad et al. (2020) menjelaskan bahwa "penerapan konsep daya dukung dan daya tampung dalam konteks pertambangan memerlukan pendekatan multidisiplin, mengintegrasikan pengetahuan dari ekologi, geologi, hidrologi, dan ilmu sosial". Ini menekankan kompleksitas dalam mengevaluasi dan mengelola dampak pertambangan terhadap lingkungan.

Dalam upaya untuk mengukur dan mengevaluasi daya dukung dan daya tampung lingkungan, metode geostatistik telah muncul sebagai alat yang berharga. Seperti yang diungkapkan oleh Goovaerts (1997), "metode geostatistik menawarkan pendekatan yang kuat untuk memodelkan dan

menganalisis variabilitas spasial dari parameter lingkungan yang relevan dengan daya dukung dan daya tampung". Penggunaan metode ini memungkinkan pemahaman yang lebih mendalam tentang distribusi spasial dampak pertambangan dan kapasitas lingkungan untuk menyerap dampak tersebut.

2.4 Getaran pada Penambangan Batubara

Berbagai kebijakan lingkungan yang berkaitan dengan efek getaran peledakan batubara dapat termasuk pemantauan, mitigasi, dan manajemen risiko. Metode geostatistik dapat memberikan pendekatan yang lebih rinci dan efektif untuk kebijakan ini. Kebijakan harus mendorong konsultasi publik dan transparansi dalam mengelola dampak lingkungan dari aktivitas pertambangan batubara. Ini dapat mencakup memberikan informasi kepada masyarakat tentang konsekuensi getaran peledakan batubara dan tindakan yang diambil untuk mengatasi konsekuensi tersebut.

Proses penambangan akan menghasilkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam rangka meminimalkan dampak negatif ground vibration akibat peledakan di penambangan batubara, perlu dilakukan upaya-upaya pengendalian dan pengaturan kegiatan peledakan dengan tetap memperhatikan keselamatan masyarakat dan lingkungan sekitar (Sundoyo, 2015; Sundoyo, et al., 2018). Isu lingkungan pada kegiatan peledakan dapat dijabarkan sebagai Berikut:

1. Kualitas habitat menurun sebagai akibat dari pembukaan lahan, perubahan bentang alam, dan kerusakan flora dan fauna.
2. Erosi dan sedimentasi terjadi di wilayah sekitar tambang.
3. Kualitas air yang buruk: kekeruhan tinggi, air asam tambang, debu, getaran, dan kebisingan.
4. Limbah Tercemar Bahan Berbahaya Beracun (B3) terhadap kesuburan tanah.^[1]_{SEP}

5. Gangguan kesehatan akibat pencemaran udara dan air yang dihasilkan dari aktivitas tambang, seperti asap, debu, dan limbah tambang yang mengandung bahan kimia berbahaya.
6. Konflik masyarakat dan perusahaan tambang batubara akibat dampak negatif yang ditimbulkan oleh aktivitas tambang, seperti kerusakan lingkungan dan kesehatan masyarakat.
7. Penurunan kualitas hidup masyarakat akibat hilangnya mata pencaharian, kerusakan lingkungan, dan penurunan kualitas Kesehatan.

Peledakan adalah metode pembezaian batuan di mana batuan keras berukuran besar dihancurkan menjadi bahan yang berukuran lebih kecil. Tujuan dari proses ini adalah untuk membuat pemindahan material menjadi lebih mudah untuk diangkut dengan alat berat. Dalam proses penambangan, baik pada tambang bawa tanah maupun tambang terbuka, peledakan merupakan bagian penting dari proses. Peledakan dapat menghasilkan getaran yang dapat merusak struktur di sekitarnya. Oleh karena itu, untuk mencegah kerusakan pada struktur bangunan, manajemen getaran yang efektif diperlukan.

Kegiatan operasional peledakan dalam proses penambangan akan berpotensi menimbulkan bahaya. Kegiatan rutin operasional peledakan terdiri dari penyimpanan bahan peledak di gudang, pengangkutan bahan peledak ke lapangan, pencampuran bahan peledak, instalasi peledakan, perangkaian surface delay, proses peledakan, sampai kepelaksanaan postblast atau pasca peledakan (Michaud & Blanchet, 2020). Kegiatan peledakan di PT. IBP dengan Sub-kontraktor PT. ANSAF adalah peledakan pada clay/batuan keras yang tahapan kegiatannya dapat dijelaskan sebagai Berikut:

- a. Perencanaan Tahap: Eksplorasi, Perijinan, dan Pembebasan Lahan.
- b. Pembersihan lahan, yang berarti menyingkirkan sisa

tumbuhan.

- c. Pengupasan tanah pucuk (penyimpanan di stock soil).
- d. Peledakan, penggalian, pemuatan dan pengangkutan (perencanaan lereng, perencanaan penirisan).
- e. Penambangan batubara, pemuatan dan pengangkutan ke stockpile.
- f. Crusher/ pemecahan batubara, pemuatan ke ponton memakai conveyour.
- g. Reklamasi dan revegetasi.

Dalam rangka mengoptimalkan pengelolaan tambang yang berkelanjutan, perlu dilakukan manajemen getaran yang baik pada saat peledakan dan melakukan reklamasi tambang setelah penambangan selesai. Hal ini bertujuan untuk mengurangi dampak negatif pada masyarakat dan lingkungan sekitar (Sulistijo, et al., 2020). Dalam hal di atas, penelitian akan membahas poin d, Banyak efek langsung yang dihasilkan oleh peledakan, termasuk batu terbang (flyrock), getaran (vibration), tekanan udara (airblast), dan kebisingan (noise). Efek peledakan ini akan berdampak pada lingkungan di sekitar lokasi peledakan, termasuk menyebabkan lereng tidak seimbang dan merusak struktur bangunan karena getaran yang dihasilkan oleh peledakan. Dikombinasikan dengan tingkat getaran dan airblast yang tinggi, peledakan dapat menyebabkan dampak peledakan pada lingkungan sekitar (Navarro Torres et al., 2018). Aktivitas peledakan juga dapat merusak kualitas dan kuantitas lingkungan, seperti mengurangi kesuburan tanah dan merusak ekosistem (Rahman, et al., 2021).

Proses pelaksanaan kegiatan peledakan terbagi menjadi beberapa tahapan pekerjaan, antara lain:

- a. Operasi transportasi bahan peledak dari gudang ke lokasi peledakan Terdapat tiga gudang di gudang bahan peledak yang masing-masing menyimpan bahan yang berbeda. Gudang pertama menyimpan ammonium nitrate sebagai bahan peledak peka primer, gudang kedua menyimpan

bahan peledak peka detonator yang terdiri dari booster dan dinamit, dan terakhir adalah gudang detonator yang terdiri dari detonator dalam lubang dan detonator di luar lubang. (Sugiyama et al., 2020).

- b. Transportasi bahan peledak menuju area peledakan: Bahan peledak diangkut ke area peledakan dengan mobil khusus yang memiliki sekat yang memisahkan bahan peledak dari satu sama lain. Proses peledakan dimulai di gudang dan berakhir dengan analisis keselamatan.
- c. Operasi peledakan di area tambang: Pada tahap ini, bahan peledak diletakkan pada lokasi yang telah ditentukan, bahan peledak didistribusikan, proses priming, memasukkan primer ke dalam lubang, charging, stemming, tie-up atau instalasi delay permukaan, evakuasi, dan peledakan. Tahapan operasional peledakan yang perlu dianalisis untuk keselamatan antara lain:
 1. Proses Priming, dimana Penggabungan bahan peledak detonator dengan bahan peledak peka detonator atau dinamit. Proses ini dilakukan untuk meningkatkan daya ledak detonator yang digunakan untuk memulai bahan peledak kimia. Posisi primer di dalam lubang ledak dapat dilakukan dalam tiga posisi, yaitu atas, tengah dan bawah lubang peledakan. Posisi peledakan primer dapat mempengaruhi hasil dari peledakan.
 2. Charging bahan peledak kedalam lubang ledak, Proses charging dilakukan melalui dua media, melalui mobil manufacturing unit untuk peledakan dengan diameter yang besar dan melalui proses pengisian manual atau menggunakan alat pneumatik charger ANFO. Proses charging bahan peledak pada lubang ledak harus memperhatikan aspek keamanan. Hal ini meliputi pemilihan bahan peledak yang sesuai, penggunaan alat dan peralatan yang aman, serta penanganan bahan peledak.
 3. Proses instalasi waktu tunda (*Surface Delay*), Proses tie-up atau perangkaian surface detonator di permukaan dapat

dilakukan dengan metode yang berbeda-beda. Perusahaan menggunakan detonator listrik, detonator non-elektrik dan detonator elektronik sebagai perlengkapan peledakannya.

4. Proses Stemming, dimana proses menimbun lubang ledak dengan menggunakan bahan pengungkung. Material pengungkung menahan tekanan, sehingga energi peledak menyebar ke seluruh area dan menghancurkan batuan di sekitarnya. Dalam proses peledakan, berbagai jenis material stemming dapat digunakan. Dengan menggunakan drill cutting dan material kerikil, material ini dapat disesuaikan dengan kondisi geologi batuan itu sendiri. Ketinggian kolom stemming sangat mempengaruhi hasil dari peledakan. Kolom stemming yang terlalu panjang dapat menyebabkan terjadinya boulder dalam proses peledakan. Kolom stemming yang terlalu pendek dapat menyebabkan berbagai macam efek peledakan, seperti flyrock, airblast, dan getaran yang tinggi.
5. Proses peledakan meliputi aktivitas evakuasi yang dilakukan sebelum hitung mundur pelaksanaan peledakan dilakukan. Proses peledakan dapat dilaksanakan apabila semua detonator telah terkoneksi dan sistem delay sudah dibuat. Pengecekan terhadap sambungan bahan peledak di permukaan perlu dilakukan untuk menghindari terjadinya misfire. Proses peledakan tidak boleh dilaksanakan sampai area disekitar peledakan telah disterilkan dari orang ataupun alat. Jarak aman yang ditetapkan untuk manusia berkisar 500 m dari area peledakan dan untuk alat berkisar 200 m dari area peledakan.
6. Kegiatan pasca peledakan adalah kegiatan untuk mengetahui apakah peledakan berjalan sempurna atau tidak. Area peledakan diamati untuk memastikan semua lubang ledak telah berhasil diledakkan dan tidak terdapat misfire. Area bekas peledakan dapat membentuk bongkah-bongkah batuan dan memungkinkan terjadinya

muckpile (tumpukan) dengan rongga kosong di dalamnya.

7. Efek peledakan yang terjadi bersamaan dengan proses peledakan antara lain adalah vibration, airblast, flyrock, noise (kebisingan) dan asap kuning. Dampak kerusakan yang biasanya muncul akibat efek peledakan tadi yaitu backbreak (kerusakan lereng) dan kerusakan dari struktur bangunan. Efek peledakan tersebut dapat disebabkan oleh berbagai faktor, mulai dari operasional peledakan maupun dari kesalahan pada design geometri peledakan.

Efek peledakan berdasarkan teori dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a. Flyrock dijelaskan sebagai batuan yang terlempar pada area peledakan yang diakibatkan oleh gaya yang bekerja pada saat proses peledakan. Material flyrock terdiri dari tanah keras atau batuan. Material fragment yang tak terkontrol dan terbang dalam jumlah yang banyak, memungkinkan terjadinya kecelakaan kerja dan kerusakan pada bangunan atau alat.
- b. Airblast dan Noise^{[1][9]} Gelombang kejut udara (Air blast) sering kali menjadi alasan utama banyaknya keluhan terhadap aktivitas tambang.
- c. Hasil peledakan mencakup getaran tanah. Getaran tanah tinggi dapat mengganggu orang, menyebabkan ketidaknyamanan, dan bahkan merusak struktur di sekitarnya (Wardhana et al., 2020). sedangkan pengaruh getaran terhadap ekologi di jelaskan oleh rozy munir (1987) ekologi adalah hubungan antara makhluk hidup dan benda mati. Getaran peledakan yang tinggi akan merusak ekologi, terutama pada struktur bangunan. (Rangga Bayu, 2020). Gelombang yang bergerak di dalam tanah karena adanya sumber energi (misalnya gempa bumi) atau karena aktivitas manusia (misalnya peledakan) disebut getaran tanah. Getaran tanah (getaran tanah) terjadi di daerah elastik. Sesuai dengan sifat elastis material maka bentuk dan

volume akan kembali ke keadaan semula setelah tak ada tegangan yang bekerja. Perambatan tegangan pada daerah elastis akan menimbulkan gelombang getaran. Getaran tanah ini pada tingkat tertentu bisa menyebabkan terjadinya kerusakan struktur di sekitar lokasi peledakan. Getaran tanah ini pada tingkat tertentu bisa menyebabkan terjadinya kerusakan struktur di sekitar lokasi peledakan. Karena itu keadaan bahaya yang mungkin ditimbulkan oleh operasi peledakan tidak bisa diabaikan.

Tabel 2. 1. Baku tingkat getaran peledakan Indonesia SNI 7571 : 2010

Kelas	Jenis bangunan	Peak Vector Sum (mm/detik)
1	Bangunan kuno yang dilindungi undang-undang benda cagar budaya (Undang-undang No. 6 tahun 1992).	2
2	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen saja, termasuk bangunan dengan pondasi dari kayu dan lantainya diberi adukan semen	3
3	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen diikat dengan slope beton	5
4	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen slope beton, kolom dan rangka diikat dengan ring balk	7 - 20
5	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen, slope beton, kolom dan diikat dengan rangka baja	12 - 40

(Sumber : SNI 7571:2010^[1]_[SEP])

Tingkat ground vibration dari aktivitas peledakan telah diatur dalam SNI 7571:2010, tingkat getaran peledakan yang diperlukan untuk kegiatan tambang terbuka terhadap bangunan (Tabel 2.1.) Standar Nasional Indonesia Baku untuk tingkat getaran peledakan pada kegiatan tambang terbuka

terhadap bangunan dibuat untuk menjadi acuan bagi pelaksana, pengawas, dan masyarakat di lingkungan sekitar (Sidiq, 2021).

Nilai getaran tanah dapat diprediksi dengan melakukan perhitungan maksimum jumlah bahan peledak perdelay berbanding jarak perekaman sehingga dapat dihitung scale distance (skala besarnya persentase peledakan pada jarak tertentu).

BAB III

PELEDAKAN

Kegiatan penambangan batubara di Indonesia telah menjadi salah satu sektor industri yang memegang peranan penting dalam perekonomian nasional. Di berbagai wilayah di Nusantara, kekayaan alam berupa batubara telah dieksplorasi dan dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi utama, baik untuk kebutuhan dalam negeri maupun ekspor. Provinsi Kalimantan Timur, dengan potensi cadangan batubara yang melimpah, menjadi salah satu kawasan utama untuk operasi pertambangan. Di tengah dinamika ini, terdapat berbagai sub-kontraktor yang berperan penting dalam mendukung keberhasilan proses penambangan di lapangan, salah satunya adalah PT. ANSAF yang beroperasi di Blok Separi.

Sebagai salah satu sub-kontraktor dari PT. IBP, PT. ANSAF menjalankan operasi penambangannya di wilayah yang mencakup Blok Separi, yang terletak di site Berambai. Dengan luas area mencapai ± 182 hektar, lokasi ini melibatkan empat desa, yakni Desa Kertabuana, Desa Pariaman, Desa Buana Jaya, dan Desa Mulawarman, yang secara administratif berada di Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Lokasi ini menjadi pusat dari kegiatan penelitian yang dilakukan, mengingat pentingnya peran sub-kontraktor dalam mendukung eksplorasi dan produksi batubara secara efisien dan berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji aspek-aspek teknis dan operasional yang terkait dengan kegiatan penambangan di Blok Separi, termasuk evaluasi terhadap dampak lingkungan yang timbul dari operasi tersebut. Dengan memperhatikan peran vital PT. ANSAF dan dinamika geografis

3.1 Peledakan, Geometri dan Dimensi Pengeboran, Desain Peledakan, Fragmentasi Hasil Peledakan.

Dalam industri pertambangan batubara, proses pengupasan lapisan tanah penutup (overburden) merupakan salah satu tahap awal yang krusial. Tanah penutup ini terdiri dari berbagai jenis batuan yang melindungi lapisan batubara yang akan dieksploitasi. Kegiatan pengupasan ini tidak hanya berdampak pada keberlanjutan operasi penambangan, tetapi juga menentukan efisiensi dan kelancaran proses-proses selanjutnya, seperti pemuatan dan pengangkutan material.

Proses pembongkaran batuan yang dilakukan dalam kegiatan ini sering kali memerlukan metode pemberaian yang sesuai dengan sifat batuan tersebut. Untuk material yang lebih lunak, pemberaian dapat dilakukan secara mekanik, di mana material digali langsung menggunakan alat berat. Namun, dalam kondisi di mana batuan yang dihadapi keras atau sangat kuat, diperlukan metode yang lebih kompleks dan efektif, yaitu pengeboran dan peledakan. Sebagaimana dijelaskan oleh Munawir (2015), pemberaian secara mekanik dapat dilakukan pada material lunak seperti batuan lemah, sedangkan untuk material keras, pemberaian dilakukan melalui pengeboran dan peledakan.

Penggunaan bahan peledak dalam industri pertambangan merupakan hal yang lazim, namun pelaksanaannya harus dilakukan dengan kehati-hatian. Reaksi kimia yang cepat dari bahan peledak menghasilkan gas dengan tekanan tinggi yang mampu menghancurkan batuan dengan cepat, membuka jalan bagi kegiatan penambangan berikutnya. Menurut Koesnaryo (1988), peledakan adalah upaya pemberaian batuan dari batuan induk dengan menggunakan bahan peledak. Bahan peledak, menurut kamus pertambangan umum, merupakan senyawa kimia yang dapat bereaksi cepat dan menghasilkan gas bersuhu tinggi dalam waktu yang singkat.

Keberhasilan peledakan ini akan mempengaruhi tahapan selanjutnya, seperti pemuatan material hasil peledakan dan pengangkutan ke tempat pengolahan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai teknik dan dampak peledakan sangat penting untuk menjamin kelancaran dan keamanan operasi penambangan batubara (Susanti, 2015). Pada bab ini, kita akan membahas lebih dalam tentang teknik pengeboran dan peledakan dalam proses pengupasan tanah penutup, termasuk tantangan teknis, aspek ekonomis, serta pentingnya pengelolaan peledakan yang tepat dalam mencapai efisiensi dan keberlanjutan operasi penambangan.

Operasi peledakan yang ideal untuk kegiatan penambangan adalah efisien, murah, dan aman. Adapun penjabaran yang memenuhi kriteria tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Tujuan produksi tercapai.
- b. Efisiensi bahan peledak tinggi, yang ditunjukkan dalam perbandingan peledak atau faktor bahan peledak.
- c. Tidak banyak kehilangan.
- d. Memecah hasil peledakan seragam
- e. Tidak mengganggu lingkungan dengan cara berikut:
 - Tingkat getaran kecil.
 - Tidak terjadi lemparan batuan (*fly rock*).
 - Gangguan suara (*noise*) rendah.

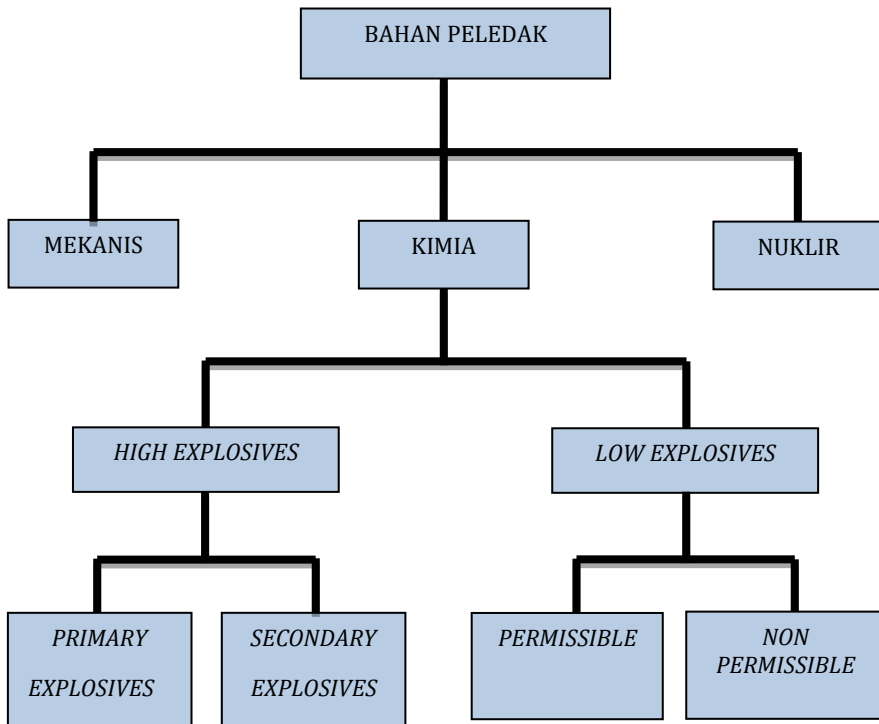
Dalam penambangan batubara PT. ANSAF, pada beberapa lokasi perlu dilakukan peledakan untuk mengupas lapisan penutup batubara. Diasumsikan 70% overburden dibutuhkan pembongkaran dengan pemboran dan peledakan.

3.1.1 Bahan Peledak

Bahan peledak (*explosives*) adalah suatu campuran bahan kimia yang terdiri dari bahan-bahan berbentuk padat atau cair atau campuran dari keduanya yang apabila terkena suatu aksi misalnya panas, benturan, gesekan dan sebagainya, dapat

bereaksi dengan kecepatan tinggi membentuk gelombang kejut, panas dan tekanan, membentuk gas hasil peledakan (*fumes*). Dalam pengertian praktis, bahan peledak adalah suatu campuran bahan-bahan yang sengaja dibuat agar dapat meledak untuk tujuan tertentu (Koesnaryo, 1988).

Pada pekerjaan tambang, tujuan penggunaan bahan peledak terutama ialah untuk membongkar batuan atau bahan galian dari batuan induknya, sedangkan dalam tahap kontruksi seperti pembuatan lubang bukaan pada tambang bawah tanah, umumnya selalu menggunakan bahan peledak pula (Koesnaryo, 1988).

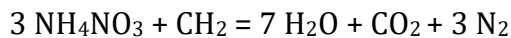


Gambar 3. 2. Klasifikasi Bahan Peledak (Manon, 1976)

1. *Ammonium Nitrat Fuel Oil (ANFO)*

Ammonium Nitrat (AN) adalah bahan penting dalam hampir semua bahan peledak komersial, termasuk dinamit dan gel, penggunaan utamanya adalah dalam bentuk butiran AN, berpori kecil yang dicampur dengan bahan bakar minyak, sejak diperkenalkan pada tahun 1950 produk ANFO telah digunakan secara ekstensif dalam berbagai aplikasi peledakan seperti penambangan batubara, penambangan logam, penggalian dan kontruksi (Motte, 1980).

Menurut Moelhim (1990), adapun campuran ANFO dengan *oxygen balance*-nya 94.5% AN – 5.5% FO.



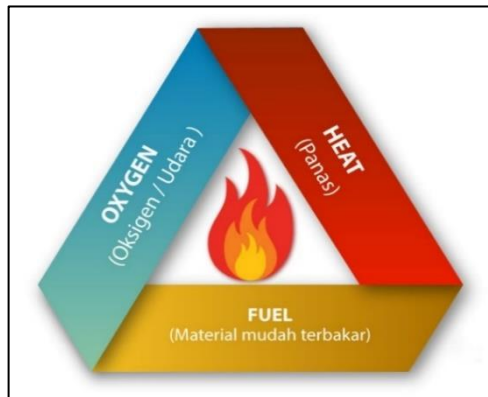
2. *Gelombang Kejut (Shock Wave)*

Gelombang kejut adalah gelombang tekan sementara yang bergerak secara non linier (pada laju regangan tinggi) dan padatan elastis (pada laju regangan rendah) lebih cepat dari kecepatan suara dalam material, hubungan non linier antara tegangan dan kecepatan menyebabkan gelombang kejut “mengguncang” dengan demikian amplitudo meningkat pada bagian depan, kepadatan, tekanan, suhu dan kecepatan partikel berubah secara drastis (redaman geometris dan material) menyebabkan gelombang kejut hanya ada di sekitar lubang ledak ketika kecepatannya berkurang, gelombang kejut menjadi gelombang elastis (gelombang seismik) (Rustan, 1998).

3. *Segitiga Api (Fire Triangle)*

Segitiga api menurut Hasibuan dkk, (2020), adalah elemen-elemen pembentuk api yang dirangkai dalam suatu segitiga yang menggambarkan proses terjadinya api.

Elemen-elemen tersebut jika bersatu dan dalam porsi tertentu maka akan menimbulkan reaksi kimia dan menghasilkan api. Teori ini dikenal sebagai Piramida Api atau *Tetrahedron* dimana elemen tersebut adalah panas, bahan bakar dan oksigen, namun dengan adanya ketiga elemen tersebut, kebakaran belum terjadi dan hanya menghasilkan pijar. Untuk berlangsungnya suatu pembakaran, diperlukan komponen keempat, yaitu rantai reaksi kimia (*chemical chain reaction*). Rantai reaksi kimia adalah peristiwa di mana ketiga elemen yang ada saling bereaksi secara kimiawi, sehingga yang dihasilkan bukan hanya pijar tetapi berupa nyala api atau pembakaran. Dalam pembakaran sempurna, bahan bakar yang terbakar hanya akan menghasilkan air dan karbondioksida (tidak ada asap dan produk lain).



Gambar 3. 3. Segitiga Api (Hasibuan dkk, 2020)

a. Oksigen

Sumber oksigen adalah dari udara, di mana dibutuhkan paling sedikit sekitar 15% volume oksigen dalam udara agar terjadi pembakaran. Udara normal di dalam atmosfer kita mengandung 21% volume oksigen, ada beberapa bahan bakar yang mempunyai cukup

banyak kandungan oksigen yang dapat mendukung terjadinya pembakaran.

b. Panas

Sumber panas diperlukan untuk mencapai suhu penyalan sehingga dapat mendukung terjadinya pembakaran. Sumber panas antara lain, panas matahari, permukaan yang panas, nyala terbuka, gesekan, reaksi kimia eksotermis, energi listrik, percikan api listrik, api las, gas yang dikompresi.

c. Bahan bakar

Bahan bakar adalah semua benda yang dapat mendukung terjadinya pembakaran. Ada tiga wujud bahan bakar, yaitu padat, cair dan gas. Untuk benda padat dan cair dibutuhkan panas pendahuluan untuk mengubah seluruh atau sebagian darinya, ke bentuk gas agar dapat mendukung terjadinya pembakaran.

4. Jenis dan Sifat Bahan Peledak

Jenis bahan peledak secara garis besar dapat diklasifikasikan menjadi tiga golongan (Manon, 1976):

- a. Bahan peledak mekanis (*mechanical explosives*)
- b. Bahan peledak kimia (*chemical explosives*)
- c. Bahan peledak nuklir (*nuclear explosives*)

Dari tiga golongan bahan peledak di atas, yang umum digunakan sebagai bahan peledak industri adalah golongan bahan peledak kimia. Menurut Bhandari (1997), adapun sifat-sifat bahan peledak yang mempengaruhi hasil peledakan antara lain adalah:

1) Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan suatu bahan peledak adalah ukuran yang dipergunakan untuk mengukur energi yang terkandung pada bahan peledak dan kerja yang dapat dilakukan oleh bahan peledak tersebut. Kekuatan dinyatakan dalam persen (%) dengan *Straight Nitroglycerin Dynamite* sebagai bahan peledak standard yang mempunyai bobot isi (*specific gravity*) sebesar 1,2 dan kecepatan detonasi (*VOD*) sebesar 12.000 feet per second (fps). Pada umumnya semakin besar bobot isi dan kecepatan detonasi suatu bahan peledak maka kekuatannya juga semakin besar.

2) Kecepatan Detonasi (*Velocity of Detonation*)

Kecepatan detonasi adalah kecepatan gelombang detonasi yang melalui sepanjang kolom isian bahan peledak, yang dinyatakan dalam m/s. Kecepatan detonasi bahan peledak tergantung pada beberapa faktor yaitu, bobot isi bahan peledak, diameter bahan peledak, derajat pengurangan, ukuran partikel dari bahan penyusunnya dan bahan-bahan yang terkandung dalam bahan peledak. Untuk peledakan pada batuan keras digunakan bahan peledak yang mempunyai kecepatan detonasi tinggi sedangkan pada batuan lunak digunakan bahan peledak dengan kecepatan detonasi rendah. Kecepatan detonasi bahan peledak komersial adalah antara 1.500-8.000 m/s.

3) Kepekaan (*Sensitivity*)

Kepekaan adalah pengukuran dalam kemudahan inisiasi. Beberapa jenis pengukuran pada kepekaan seperti *cap sensivity*, *drop test*, *friction test*, dan lainnya. Semua tes ini dilakukan dengan cara demikian dalam kaitannya penanganan keamanan handak. Kepekaan handak tergantung pada komposisi kimia, ukuran butir, bobot isi, pengaruh kandungan sir, dan temperatur. Bahan peledak yang sensitif belum tentu bagus, namun

bahan peledak yang mudah penyebaran reaksinya dan tidak peka lebih menguntungkan dan lebih aman.

4) Bobot Isi Bahan (*Density*)

Bobot isi bahan peledak adalah perbandingan antara berat dan volume bahan peledak, dinyatakan dalam gr/cm^3 . Bobot isi biasanya juga dinyatakan dengan istilah *Spesific Gravity (SG)*, ataupun *Loading density (de)*.

5) Tekanan Detonasi (*Detonation Pressure*)

Tekanan detonasi adalah penyebaran tekanan gelombang ledakan dalam kolom isian bahan peledak, dinyatakan dengan kilobar (kb). Tekanan akibat ledakan disekitar dinding lubang intensitasnya tergantung pada jenis bahan peledak (kekuatan, bobot isi, *VOD*), derajat pengurangan, jumlah dan temperatur gas hasil ledakan.

6) Sifat Gas Beracun (*Fumes*)

Bahan peledak yang meledak menghasilkan dua kemungkinan jenis gas, yaitu *smoke* atau *fumes*. *Smoke* tidak berbahaya karena hanya mengandung uap air (H_2O) dan asap berwarna putih (CO_2). Sedangkan *fumes* berwarna kuning dan berbahaya karena sifatnya beracun, yang terdiri dari karbon monoksida (CO) dan oksida nitrogen (NO_x). *Fumes* terjadi karena tidak terjadi keseimbangan oksigen dalam pembakaran, hal ini dikarenakan bahan peledak tersebut dalam keadaan rusak, atau dapat juga karena komposisi bahan peledak yang tidak sesuai.

7) Ketahanan Terhadap Air (*Water Resistance*)

Ketahanan Terhadap Air merupakan kemampuan dari bahan peledak tersebut dalam menahan rembesan air dalam waktu tertentu, tanpa merusak, mengurangi atau merubah kepekaannya. Sifat ini cukup penting karena dapat mempengaruhi peledakan dengan

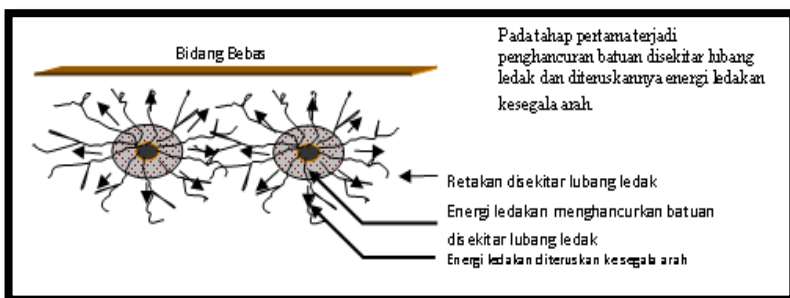
memperlambat reaksi pemanasan dan ketidakseimbangan reaksi kimia yang terjadi sehingga dapat menyebabkan rusaknya bahan peledak.

3.1.2 Mekanisme Peledakan

Menurut Moelhim (1990) konsep yang dipakai dalam proses pemecahan dan reaksi-reaksi mekanik dalam batuan homogen perlu ditekankan bahwa sifat mekanis dalam batuan yang homogen akan berbeda dari batuan yang mempunyai rekahan-rekahan dan heterogen seperti yang sering dijumpai dalam pekerjaan peledakan. Proses pemecahan batuan dibagi menjadi tiga tingkat:

1. Proses pemecahan tingkat I

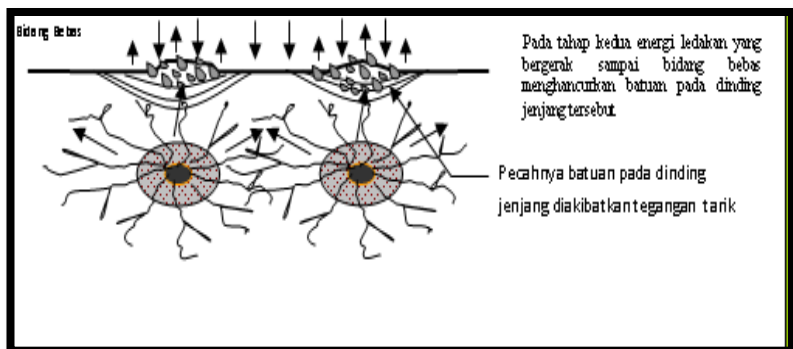
Pada saat bahan peledak diledakkan, tekanan tinggi menghancurkan batuan didaerah sekitar lubang tembak merambat dengan kecepatan 3000-5000 m/det. Akan mengakibatkan *tangensial stress* yang menimbulkan "*radial crack*" yang menjalar dari daerah lubang tembak, *radial crack* pertama terjadi dalam waktu 1-2 ms.



Gambar 3. 4. Proses Pemecahan Tingkat I (Moelhim, 1990)

2. Proses pemecahan tingkat II

Tekanan sehubungan dengan (*shock wave*) yang meninggalkan lubang tembak pada proses pemecahan tingkat I adalah positif. Apabila *shock wave* mencapai bidang bebas (*free face*) akan dipantulkan, tekanan akan turun dengan cepat kemudian berubah menjadi negatif dan timbul (*tension wave*). "*Tension wave*" ini merambat kembali di dalam batuan. Oleh karena batuan lebih kecil tahanannya terhadap "*tension*" dari pada "*compresion*", maka akan terjadi rekahan-rekahan (*primary failure cracks*) disebabkan karena "*tensile stress*" dari gelombang yang dipantulkan. Apabila "*tensile stress*" cukup kuat akan menyebabkan "*slabbing*" atau "*spalling*" pada bidang bebas. Dalam proses pemecahan tingkat I dan II fungsi dari "*shock wave energy*" adalah menyiapkan batuan dengan sejumlah rekahan-rekahan kecil.



Gambar 3. 5. Proses Pemecahan Tingkat II (Moelhim, 1990)

3. Proses pemecahan tingkat III

Dibawah pengaruh tekanan yang tinggi dari gas-gas hasil peledakan maka rekahan "*radial primer*" (Tingkat II) akan diperlebar/diperbesar secara cepat oleh kombinasi efek dari "*tensile stress*" disebabkan kompresi *radial* (*radial compresion*) dan "*pneumatic wedging*" (pembajian).

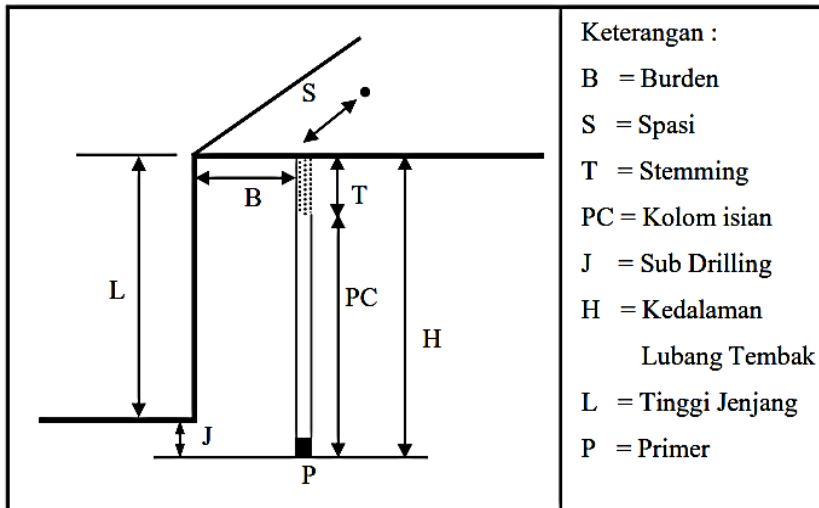
Apabila massa di depan lubang tembak gagal mempertahankan dalam posisinya dan bergerak kedepan maka "*compressive stress*" tinggi yang berada dalam batuan akan dilepas (*unloading*) seperti *spiral* kawat yang ditekan kemudian dilepaskan. Efek dari terlepasnya batuan (*unloading*) adalah menyebabkan "*tension stress*" tinggi dalam massa batuan yang akan melanjutkan pemecahan Tingkat II. Rekahan hasil dalam pemecahan Tingkat II menyediakan bidang-bidang lemah untuk memulai reaksi-reaksi fragmentasi utama pada proses peledakan.



Gambar 3. 6. Proses Pemecahan Tingkat III (Moelhim, 1990)

3.1.3 Geometri peledakan

Menghitung geometri peledakan, terutama menentukan ukuran *burden* berdasarkan diameter lubang tembak, kondisi batuan setempat dan jenis bahan peledak. Berikut parameter parameter geometri peledakan menurut R.L.Ash, (1976).



Gambar 3. 7. Geometri peledakan menurut Teori R.L.Ash (1967)

1. *Burden* (B)

Burden dapat didefinisikan sebagai jarak tegak lurus dari lubang tembak (kolom isian bahan peledak) terhadap bidang bebas (*free face*) yang terdekat ke arah material hasil peledakan terlempar. *Burden* merupakan variabel yang sangat penting dan kritis dalam rancangan peledakan. Dengan jenis peledakan yang dipakai dan menghadapi batuan yang akan dibongkar, *Burden* memiliki jarak maksimum yang harus dibuat agar peledakan sukses dilaksanakan Berikut beberapa rumus *burden* (B) R.L.Ash (1976) :

$$KB = KBstd \times AF1 \times AF2 \dots \dots \dots (3.1)$$

Keterangan:

KB = Nisbah *burden* yang telah dikoreksi

KBstd = KB standar bernilai 30

$$AF1 = [(DStd) / D]^{1/3} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$AF2 = [\frac{SG \times Ve^2}{SGStd \times VeStd}]^{1/3} \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan:

AF1= Faktor Koreksi Bahan Peledak

AF2= Faktor Koreksi Untuk Batuan

Sehingga didapatkan ukuran *burden* sebagai berikut:

$$B = \frac{KB \times De}{12} \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan:

B = *Burden* (m)

De = Diameter lubang ledak (S)

2. *Spacing*

Spacing adalah jarak antara lubang-lubang tembak yang berdekatan, terangkai dalam satu baris (*row*), diukur sejajar dengan jenjang (*pit wall*) dan tegak lurus *burden*, *Spacing* merupakan fungsi dari *burden* dan dihitung setelah *burden* ditetapkan terlebih dahulu. Jika ukuran *Spacing* lebih kecil dari *burden* maka cenderung mengakibatkan *Stemming ejection* lebih dini, gas hasil ledakan disebarkan ke udara bebas (atmosfer) bersamaan dengan noise dan *air blast*. Sebaliknya, jika jarak *spacing* terlalu besar diantara lubang tembak maka fragmentasi yang dihasilkan menjadi buruk Berikut beberapa rumus *Spacing* (S) menurut R.L.Ash (1976):

$$S = Ks \times B \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

KS = *spacing Ratio* (1.00-2.00)

B = *Burden*

3. *Stemming* (T)

Stemming adalah bagian lubang tembak yang tidak diisi bahan peledak tetapi diisi oleh material pemampat seperti pasir Air Pacah RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah, Kecamatan Koto Tangah, Kota Padang, cutting hasil pemboran dan tanah liat. *Stemming* berfungsi untuk mengurung gas yang terbentuk akibat reaksi detonasi bahan peledak didalam lubang tembak dan untuk menjaga keseimbangan tekanan (*stress balance*) sehingga gelombang tekan merambat kearah bidang bebas dahulu daripada ke arah pemampat. *Stemming* merupakan kunci sukses untuk fragmentasi yang baik. Pengungkungan akan membuat energi bahan peledak optimal dari lubang ledak, material dan panjang *Stemming* yang tepat diperlukan untuk membuat energi horizontal dan vertikal bahan peledakan yang sesuai Berikut rumus *Stemming* (T) menurut R.L.Ash (1976):

$$T = Kt \times B \dots\dots\dots (3.6)$$

KT = *Stemming Ratio* (0.75-1.00)

4. Kedalaman Lubang Ledak (H)

Kedalaman lubang tembak adalah penjumlahan dari dimensi tinggi isian bahan peledak, *Stemming* dan *Subdrilling*. Jika arah lubang tembak vertikal maka kedalaman lubang tembak merupakan penjumlahan dari tinggi jenjang dan *Subdrilling* Kedalaman lubang tembak Berikut beberapa rumus Kedalaman Lubang Ledak (H) menurut R.L.Ash (1976):

$$H = Kh - B \dots\dots\dots (3.7)$$

Keterangan:

KH = Nisbah Kedalaman Lubang

KH = 1.50 – 4.00

5. *Subdrilling* (J)

Subdrilling adalah tambahan kedalaman dari lubang tembak dibawah rencana lantai jenjang. Pemboran lubang tembak sampai batas bawah dari lantai bertujuan agar seluruh permukaan jenjang bisa secara full face setelah dilakukan peledakan, jadi untuk menghindari agar pada lantai jenjang tidak terbentuk tonjolan-tonjolan (toe) yang sering mengganggu operasi pengeboran berikutnya dan menghambat kegiatan pemuatan dan pengangkutan. Secara praktis *Subdrilling* dibuat antara 20 % sampai 40 % *Burden* Berikut beberapa rumus *Subdrilling* (J) menurut R.L.Ash (1976):

$$J = Kj \times B \dots\dots\dots (3.8)$$

KJ = *Subdrilling ratio* (0.30)

6. Panjang Kolom Isian atau *Primary Charge* (PC)

Panjang kolom isian adalah panjang kolom lubang ledak yang akan diisi bahan peledak. Panjang kolom isian ini merupakan kedalaman lubang ledak dikurangi panjang *Stemming* yang digunakan. Adapun persamaan panjang kolom isian menurut R.L.Ash (1976) sebagai berikut:

$$PC = H - T \dots\dots\dots (3.9)$$

Keterangan:

PC = Panjang kolom sian/*Primary Charge* (m)

H = Kedalaman lubang ledak (m)

T = *Stemming* (m)

7. Tinggi Jenjang (L)

Tinggi jenjang berhubungan erat dengan parameter geometri peledakan lainnya dan ditentukan terlebih dahulu atau ditentukan kemudian setelah parameter serta aspek lainnya diketahui. Tinggi jenjang maksimum biasanya 13 dipengaruhi oleh kemampuan alat bor dan ukuran mangkok (*bucket*) serta tinggi jangkauan alat muat. Pertimbangan lainnya adalah kestabilan jenjang jangan sampai runtuh, baik karena daya dukungnya lemah atau akibat getaran peledakan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa jenjang yang pendek memerlukan diameter lubang yang kecil, sementara untuk diameter lubang besar dapat diterapkan pada jenjang yang lebih tinggi rancangan menurut Richard L Ash.

$$L = H - J \dots\dots\dots(3.10)$$

Keterangan:

- L = Tinggi jenjang minimum (m)
- H = Kedalaman lubang ledak (m)
- J = *Subdrilling* (m)

8. *Loading density* (de)

Loading density adalah jumlah pemakaian bahan peledak dalam satu meter. Satuan yang digunakan adalah kg/meter. *Loading density* dicari untuk mengetahui berapa jumlah bahan peledak yang digunakan dalam satu lubang tembak. *Loading density* dapat dicari dengan rumus oleh persamaan menurut Richard L Ash. :

$$de = 0,508 \times De^2 \times (SG) \dots\dots\dots(3.11)$$

Keterangan:

de = *Loading density* (kg/mtr)

De = Diameter lubang ledak (inchi)

SG = Berat jenis bahan peledak

9. Jumlah Bahan peledak
 Jumlah bahan peledak dapat dicari dengan rumus sabagai berikut:

$$E = PC \times De \dots\dots\dots (3.12)$$

Keterangan:

E = Jumlah bahan peledak (kg)

PC = Panjang kolom isian (m)

de = *Loading density* (kg/m)

10. Volume peledakan
 Volume peledakan dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$V = B \times S \times L \dots\dots\dots (3.13)$$

Keterangan:

V = Volume peledakan (m²)

B = *Burden* (m)

S = *Spacing* (m)

L = tinggi jenjang (m)

- Powder Factor Powder factor dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$Pf = \frac{E}{V} \dots\dots\dots (3.14)$$

Keterangan:

PF = Powder faktor

E = Jumlah bahan peledak (kg)

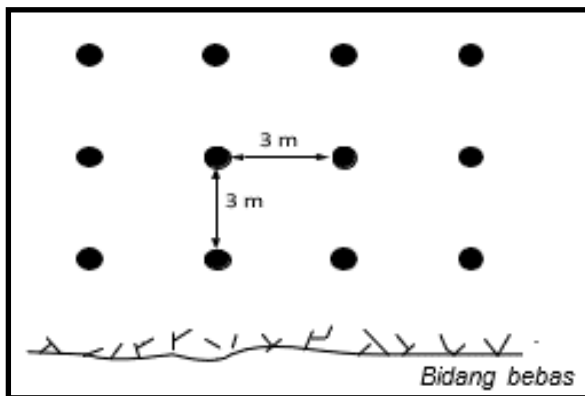
V = Volume batuan yang akan diledakkan

3.1.4 Pola Pemboran dan Arah Peledakan

Peledakan merupakan salah satu proses kunci dalam kegiatan penambangan, terutama untuk membongkar batuan keras yang tidak dapat dipecahkan melalui metode mekanis. Proses ini tidak hanya berfungsi untuk membongkar batuan, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap keberhasilan operasi penambangan secara keseluruhan. Efisiensi, keamanan, dan keberlanjutan kegiatan penambangan sangat bergantung pada pola pengeboran dan peledakan yang tepat. Setiap teknik pengeboran dan peledakan yang diterapkan harus disesuaikan dengan karakteristik batuan, area penambangan, serta lingkungan sekitar.

Salah satu tantangan dalam proses ini adalah bagaimana menyusun pola pengeboran yang optimal untuk memaksimalkan hasil peledakan dan mengurangi risiko seperti toe dan backbreak, ketidakstabilan lereng, dan dampak negatif terhadap lingkungan sekitarnya, terutama bagi pemukiman penduduk. Pola pemboran yang dipilih baik itu pola bujur sangkar, persegi panjang, maupun zig-zag memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing, sehingga keputusan teknik pemboran harus mempertimbangkan berbagai faktor, mulai dari kekerasan batuan hingga posisi geografis lokasi penambangan.

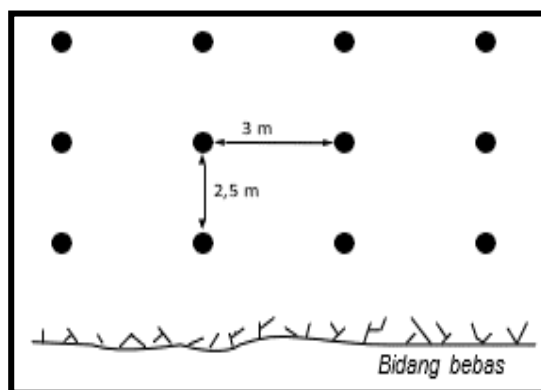
1. Pola Bujur Sangkar (*Square Pattern*) Pola pemboran bujur sangkar adalah pola pemboran dengan menempatkan lubang-lubang bor antara baris satu dengan baris berikutnya sejajar.



Gambar 3. 8. Pola Pemboran Bujur Sangkar (Anonim, 2009)

2. Pola Persegi Panjang (*Rectangular Pattern*)

Pola pemboran persegi panjang adalah pola pemboran yang jarak spasi dalam satu baris lebih besar dibanding jarak *burden*, untuk mendapatkan fragmentasi yang diinginkan.



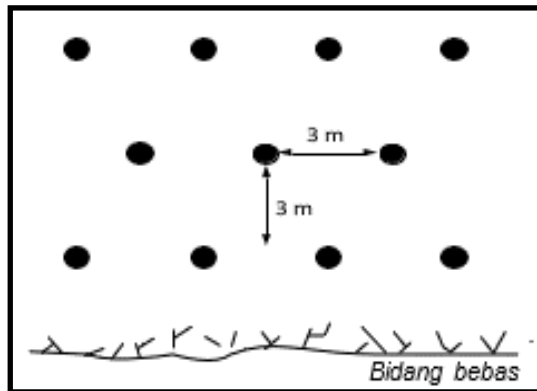
Gambar 3. 9. Pola Pemboran Persegi Panjang (Anonim, 2009)

3. Pola Zig-Zag (*Staggered Pattern*)

Pola pemboran zig-zag adalah pola pemboran yang setiap lubang ditempatkan diantara dua lubang pada baris sebelumnya, dimana pola ini gabungan dari pola bujur sangkar dan pola persegi panjang, pola zig-zag merupakan

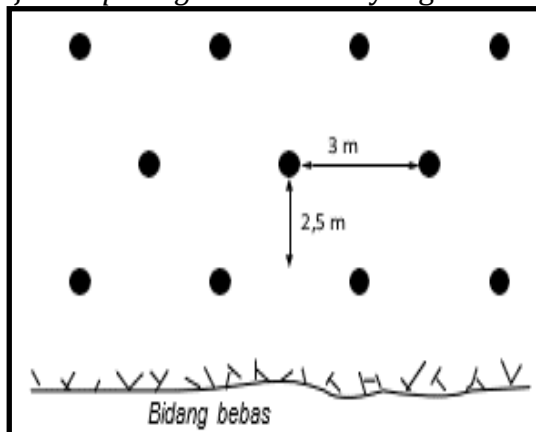
pola yang sangat baik dalam hal distribusi bahan peledak. Pola zig-zag terbagi menjadi dua jenis berdasarkan kedudukan jarak *spacing* dan *burden*, yaitu:

- a. Pola Zig-Zag Bujur Sangkar (*Staggered Square*)
Dimana kedudukan lubang bor satu dan yang lainnya memiliki jarak *spacing* dan *burden* yang sama.



Gambar 3. 10. Pola Pemboran Zig-Zag Bujur Sangkar (Anonim, 2009)

- b. Pola Zig-Zag Persegi Panjang (*Staggered Rectangular*)
Dimana kedudukan lubang bor satu dan yang lainnya memiliki jarak *spacing* dan *burden* yang berbeda.



**Gambar 3. 11. Pola Pemboran Zig-Zag Persegi Panjang
(Anonim, 2009)**

Berikut beberapa kelebihan dan kekurangan pengeboran tegak, yaitu:

1. Kelebihan
 - a. Pelaksanaan pengeboran lebih mudah, cepat, dan akurat
 - b. Untuk jenis batuan yang sama, aksesoris bor lebih tahan lama
 - c. Bahan peledak yang digunakan lebih sedikit
 - d. Biaya pengeboran lebih kecil
2. Kekurangan
 - a. Potensi terbentuk *toe* dan *backbreak* besar
 - b. Lereng kurang stabil terhadap getaran, perlu analisis kestabilan lereng
 - c. Hanya baik untuk batuan yang kompeten (kuat)
 - d. Permukaan bidang bebas sering tidak rata

Berikut beberapa kelebihan dan kekurangan pengeboran miring, yaitu:

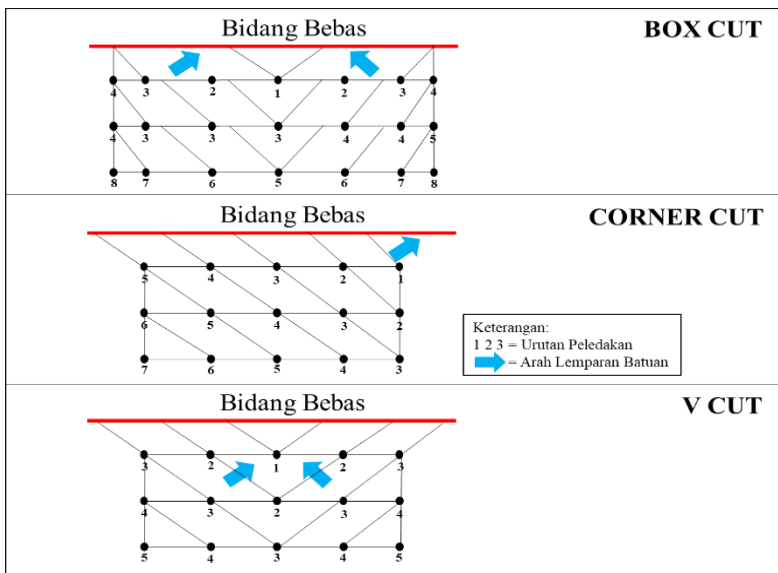
1. Kelebihan
 - a. Jenjang yang diperoleh lebih stabil
 - b. Mengurangi resiko terbentuknya *toe* dan *backbreak*
 - c. Bentuk *muck pile* lebih baik
 - d. Permukaan bidang bebas lebih berpotensi rata
2. Kekurangan
 - a. Sulit melakukan pengeboran miring yang akurat
 - b. Aksesoris bor tidak tahan lama (cepat rusak)
 - c. Diperlukan supervisi yang ketat

Pola peledakan merupakan urutan waktu peledakan antara lubang-lubang bor dalam satu baris dengan lubang bor pada baris berikutnya ataupun antara lubang bor yang

satu dengan lubang bor yang lainnya. Pola peledakan ini ditentukan berdasarkan urutan waktu peledakan serta arah lemparan batuan yang diharapkan (Anonim, 2009).

Berdasarkan arah runtuh batuan, pola peledakan diklasifikasikan sebagai berikut:

1. *Box Cut*, pola ini arah lemparan seluruhnya ke tengah area peledakan dan menghasilkan tumpukan batuan pada bagian tengah.
2. *Exchelon atau Corner Cut*, pola peledakan yang arah runtuh batuanya ke salah satu sudut dari bidang bebasnya.
3. *"V" Cut*, pola peledakan yang arah runtuh batuanya ke depan.

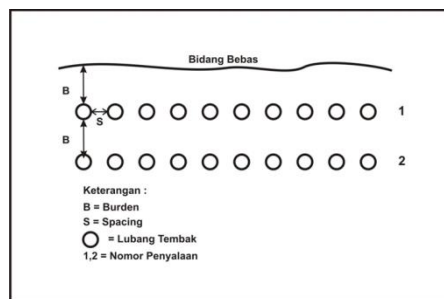


Gambar 3. 12. Pola Peledakan (Anonim, 2009)

Menurut (Defriansyah, 2018) Berdasarkan urutan waktu peledakan, pola peledakan diklasifikasikan atas :

1. Pola peledakan serentak, yaitu pola peledakan dengan waktu peledakan serentak pada semua lubang
2. Pola peledakan beruntun, yaitu pola peledakan dimana pada rangkaian peledakan ada waktu tunda antara baris satu dengan baris lainnya.

Dalam penelitian ini, digunakan pola pemboran selang-seling dengan alat bor FURUKAWA PCR 200, serta pola peledakan serentak dalam satu baris dan beruntun antar baris. Hal ini dirancang untuk memastikan peledakan yang efektif serta mengurangi dampak getaran terhadap lingkungan sekitar, termasuk pemukiman penduduk yang berjarak 3.000 meter dari lokasi peledakan. Menurut Defriansyah (2018), waktu peledakan dapat diklasifikasikan berdasarkan urutannya, yaitu peledakan serentak dan peledakan beruntun. Arah peledakan yang awalnya direncanakan dari Selatan ke Utara disesuaikan dengan kondisi lapangan untuk memastikan keamanan dan efisiensi proses.



Gambar 3.2. Pola Pemboran dan Peledakan.
(Sumber: Anonim, 2009)

3.2 Rancangan Teknik Peledakan

Peledakan merupakan salah satu metode yang paling efektif dan efisien dalam pembongkaran lapisan penutup pada kegiatan penambangan batubara. Di dalam dunia

pertambangan, lapisan penutup yang terdiri dari batuan keras seperti batulanau, batupasir, dan batulempung harus dibongkar terlebih dahulu sebelum mengekstraksi batubara yang berada di bawahnya. Proses ini membutuhkan perencanaan geometri peledakan yang matang serta pemilihan bahan peledak yang tepat untuk memastikan keberhasilan pembongkaran, efisiensi produksi, dan keamanan di lokasi tambang.

Dalam pembongkaran lapisan penutup batubara ini, perhitungan geometri peledakan didasarkan pada teori R.L. Ash, yang dikenal mampu memberikan panduan dalam menentukan dimensi lubang bor, pola peledakan, serta penggunaan bahan peledak yang tepat. ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil) digunakan sebagai bahan peledak utama dalam proses ini karena memiliki karakteristik yang sangat baik untuk pembongkaran batuan besar, dengan kecepatan detonasi sebesar 11.100 FPS dan berat jenis (SG) 0,8. Sebagai primer, digunakan booster seberat 400 gram yang dikombinasikan dengan detonator non-elektrik (NONEL) untuk memicu ledakan awal, yang memberikan kontrol dan keamanan yang lebih baik pada proses peledakan. Dengan penggunaan bahan peledak yang sesuai dan penghitungan yang cermat, diharapkan pembongkaran lapisan penutup dapat dilakukan secara efektif, mempercepat proses produksi, dan memastikan keberlangsungan operasi tambang yang aman serta efisien.

3.3 Vibrasi Peledakan

Penjalaran energi melalui bumi yang padat (medium), seperti yang ditunjukkan oleh gelombang suara dan cahaya, dikenal sebagai gelombang seismik. Gelombang seismik, seperti gempa bumi, juga dapat dihasilkan oleh sumber lain yang disebabkan oleh manusia; peledakan adalah salah satu contohnya. Akibat peledakan dapat dirasakan dalam bentuk "getaran", atau vibrasi.

Berdasarkan berat isian bahan peledak dan jarak suatu bangunan atau area dari lokasi peledakan, analisis hukum jarak skala pada kegiatan peledakan mempertimbangkan berbagai faktor yang mempengaruhi perkiraan tingkat getaran peledakan.

Menggunakan jarak yang diukur adalah metode yang efektif dan efisien untuk mengontrol getaran. Ini memungkinkan petugas di lapangan untuk menentukan jumlah bahan peledak yang dipenuhi atau jarak aman yang digunakan untuk menghasilkan getaran peledakan yang diizinkan.

Peledakan tunda adalah metode peledakan yang meledakkan sejumlah muatan bahan peledak sebagai kumpulan muatan yang lebih kecil daripada satu muatan. Getaran yang dihasilkan dari peledakan tunda adalah kumpulan getaran kecil daripada satu getaran besar. Karena setiap tunda menghasilkan gelombang seismik yang kecil dan terpisah, peledakan tunda mengurangi tingkat getaran. Sebelum peledakan tunda berikutnya terjadi, gelombang hasil peledakan tunda pertama telah merambat pada jarak tertentu.

Untuk menghindari getaran yang dapat merusak struktur bangunan, dua hal harus diperhatikan saat mengangkut bahan peledak:

- a. Besarnya getaran yang dipengaruhi oleh tiga faktor: jumlah bahan peledak, jarak struktur dari titik ledak, dan karakteristik media penghantar gelombang.
- b. Standar kerusakan struktur itu sendiri, seperti kecepatan, percepatan, dan perpindahan maksimum yang masih diizinkan.

Tidak ada teori yang tepat yang dapat memperhitungkan semua sifat penting batuan untuk menentukan besarnya getaran pada berbagai jarak. Oleh karena itu, penyelesaian yang

dapat dilakukan adalah secara empiris, menggunakan asumsi berikut:

- Massa batuan bersifat isotrop, elastik, dan homogen.
- Muka gelombang yang datar dengan pulsa persegi empat atau bujur sangkar adalah karakteristik rambatan gelombang yang terjadi.
- Gerakan harmonis sederhana adalah jenis gerakan partikel yang terjadi.
- Berat bahan peledak sama dengan energi yang dihasilkannya.

Dengan menggunakan analisis dimensional yang didasarkan pada teori Buckingham Pi, asumsi-asumsi di atas menunjukkan bahwa ada hubungan antara energi yang dihasilkan oleh peledakan dan jarak dari titik ledakan; dampak jarak akan setara dengan akar pangkat tiga energi peledakan. Dalam situasi ini, ketika energi diekuivalensikan dengan jumlah bahan peledak, parameter yang dihasilkan, yang dikenal sebagai SD, dapat digunakan sebagai salah satu faktor yang memengaruhi perkiraan getaran yang dihasilkan oleh peledakan.

Hukum SD untuk kontrol getaran akibat peledakan ada dua macam, yaitu:

- Menurut hasil analisis dimensional, SD dinyatakan sebagai:

$$CRSD = \frac{R}{W^{1/3}}$$

Keterangan:

CRSD = cube root scaled distance (m/kg^{1/3})

R = jarak dari sumber ledakan (m)

W = berat isian bahan peledak per delay (kg)

Hukum CRSD ini digunakan untuk pendugaan kerusakan struktur bangunan akibat peledakan pada jarak < 20 meter dari sumber ledakan.

- b. Menurut USBM (United State Bereau of Mine), SD dinyatakan sebagai:

$$SRSD = \frac{R}{W^{1/2}}$$

Keterangan:

SRSD = square root scaled distance (m/kg^{0,5})

R = jarak dari sumber ledakan (meter)

W = berat isian bahan peledak per delay (kg)

Apabila pengukuran seismik tidak ada, perhitungan SD akan menghasilkan angka tertentu yang digunakan untuk memperkirakan tingkat getaran peledakan. Menurut Nicholls, Johnson, dan Duval dalam Buletin USBM, 656 (1971) SD, batas aman yang disarankan adalah setidaknya lima puluh jika alat seismograf tidak digunakan atau tidak tersedia. Tingkat getaran pada SD adalah 0,08–15 ips. Harga SD yang tinggi (SD lebih dari 50) biasanya menunjukkan kondisi getaran yang aman atau kerusakan kecil. Rencana peledakan PT. ANSAF masih dalam batas kondisi getaran aman terhadap pemukiman penduduk sekitarnya karena harga SD lebih dari 50, dan SRSD = 54.78 m/kg.

3.4 Pengamanan Gudang Handak

Penyimpanan dan penanganan bahan Peledak sesuai dengan Kepmen 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik dan peraturan kepala kepolisian no 2 tahun 2008. Penyimpanan bahan peledak menjadi tanggungjawab kepala gudang bahan peledak atau petugas gudang bahan peledak yang ditunjuk khusus oleh Kepala Teknik Tambang.

Penyimpanan bahan peledak di gudang peledak harus diatur sedemikian rupa sehingga memudahkan penerapan sistem FIFO, yang berarti persediaan atau stok yang paling lama

dikeluarkan terlebih dahulu. Dilarang menggunakan alat dari logam yang dapat memercikan api untuk membuka atau menutup kemasan detonator. Bahan peledak harus disimpan dalam kemasan aslinya dan dicantumkan tanggal penyerahannya ke gudang. Tulisan pada kemasan harus jelas dan mudah dibaca tanpa memindahkannya.

Beberapa ketentuan kesesuaian penyimpanan bahan peledak adalah sebagai berikut:

- Detonator harus disimpan di gudang yang tidak mengandung bahan peledak peka detonator.
- Tidak disarankan untuk menyimpan bahan peledak peka detonator di dalam gudang bahan peledak peka primer atau bahan ramuan bahan peledak.
- Gudang bahan peledak peka detonator dapat menyimpan bahan peledak peka primer bersama; namun, gudang bahan ramuan bahan peledak tidak boleh menyimpan bahan peledak peka primer bersama.
- Gudang bahan peledak peka primer dan/atau gudang bahan peledak peka detonator dapat digunakan untuk menyimpan bahan ramuan bahan peledak.
- Semua bagian besi harus ditutup dengan beton sampai tiga meter dari lantai atau dilapisi dengan pelat tembaga atau alumunium. Amunisi dan jenis mesiu lainnya hanya boleh disimpan di gudang bahan peledak dengan bahan peledak lain.

Gudang bahan peledak harus selalu dalam keadaan terkunci untuk menjamin keamanannya dari tindakan yang tidak bertanggungjawab, dimana pintu gudang dipasang 3 (tiga) gembok (kunci masing-masing gembok dipegang oleh Kepala Teknik (didelegasikan ke Tim Keamanan Perusahaan), Kepala Gudang dan Polri. Dilarang merokok. Dilarang juga membawa geretan atau korek api, senjata api, sepatu berduri, atau alat lain yang dapat menimbulkan api. Gudang dan sekitarnya harus bersih dari sampah, rumput atau semak dan lainnya yang dapat

menimbulkan kebakaran. Suhu penyimpanan di dalam gudang selalu terjaga pada suhu 550 C untuk Gudang Amonium Nitrat dan 350 C untuk Gudang Detonator, sebagaimana peraturan yang ditetapkan.

Petugas gudang bahan peledak harus melakukan inspeksi rutin di area gudang bahan peledak setiap minggu untuk memastikan kondisinya.

1. Penyimpanan Ammonium Nitrate: Hanya menggunakan gudang untuk menyimpan ammonium nitrat. Itu disimpan di atas botol atau bangku setinggi 30 cm dari lantai. Penyimpanan atau penyusunan ammonium nitrat dan sejenisnya harus dilakukan di antara kemasan dengan papan penyekat. Ada ruang bebas antara tumpukan dengan dinding 30 cm dan maksimal sepuluh tumpukan untuk karung ukuran 25-50 kg atau jumbo bag. Kebocoran di dinding atau atap gudang harus diperbaiki segera. Bahan peledak yang dikeluarkan dari gudang yang sedang diperbaiki harus dijaga dan disimpan di gudang peledak lainnya atau di jarak yang aman.
2. Penyimpanan Detonator: Gudang hanya dipaki untuk menyimpan detonator, sumbu api keamanan (fuse). Semua barang harus disimpan di atas rak yang disusun menjadi lima susun dengan tinggi maksimal 180 cm dan jarak minimal 30 cm dari lantai ke dasar rak. Semua barang harus dikelompokkan menurut jenis dan macamnya, dan isi harus dipisahkan dari yang sudah dibuka dan telah diambil. Kemasan detonator dilarang dibuka atau mengepak atau mengepak ulang di dalam gudang. Bukalah atau tutup kembali kemasan dengan hati-hati, jangan melemparkan, membanting, atau menggesernya di atas lantai. Tidak ada detonator yang tercecer, tersimpan lepas, atau terbuka di dalam gudang.
3. Penyimpanan Dinamit/Booster: Hanya digunakan sebagai gudang untuk menyimpan dinamit dan sejenisnya. Itu disimpan di atas rak yang terdiri dari empat susun dengan

tinggi maksimal 180 cm dari lantai dan jarak minimal 30 cm dari lantai ke dasar rak. Rak ini dibuat dari kayu atau bahan yang tidak mudah terbakar.

4. **Pengeluaran Bahan Peledak:** Blasting Engineer mengajukan permintaan bahan peledak dengan formulir MIN-FS2A Berita acara pengambilan dan pengembalian bahan peledak kepada kepala gudang bahan peledak dimana jenis dan jumlah bahan peledak yang diminta harus sesuai dengan kebutuhan berdasarkan design blasting, (dengan lampiran desain blasting yang telah ditandatangani oleh blasting engineer Perusahaan). Pengeluarannya harus disaksikan oleh Security, Polisi dan Kepala Gudang dan blasting engineer kontraktor. Dalam urutan waktu penerimaan, bahan peledak yang dibutuhkan harus dikeluarkan dari gudang (prinsip FIFO) yaitu selalu mengeluarkan barang yang sudah lama. Bahan peledak dan detonator yang dikeluarkan harus dalam kondisi baik dan tidak terlalu banyak. Jika ternyata pada saat dikeluarkan kondisi bahan peledak telah rusak, maka harus segera dimusnahkan dengan cara yang aman. Kepala gudang bahan peledak selanjutnya mencatat pengeluaran bahan peledak di dalam buku inventori bahan peledak.
5. **Administrasi dan Pelaporan:** Kepala Gudang bahan peledak harus membuat laporan pengelolaan bahan peledak (blast report) dan diserahkan kepada Bagian Drilling & Blasting Perusahaan untuk setiap kegiatan peledakan. Laporan pengelolaan bahan peledak paling tidak memuat informasi sebagaimana berikut:
 - Nama dan tanda tangan petugas gudang/Kepala gudang bahan peledak.
 - Jumlah semua jenis bahan peledak dan detonator yang masuk dan keluar dari gudang peledak.
 - Tanggal pengeluaran dan waktu pengembalian bahan peledak.
 - Nama dan tanda tangan anggota staf yang menerima bahan peledak, dan.

- Tempat peledakan, atau alasan permintaan dan pengeluaran bahan peledak.
6. Inspeksi Area Gudang Bahan Peledak: Kepala gudang bahan peledak harus melakukan pemeriksaan/inspeksi setiap minggu, area dan bangunan gudang bahan peledak untuk mendeteksi adanya potensi masalah/ketidaksesuaian. Inspeksi dapat dilakukan menggunakan formulir inspeksi untuk area gudang bahan peledak mengikuti prosedur Inspeksi K3L. setiap temuan yang ditemukan selama pelaksanaan inspeksi harus ditindaklanjuti dan dilaporkan kepada Perusahaan melalui Bagian Drilling dan Blasting. Laporan inspeksi dan status penyelesaian perbaikan yang telah dilakukan harus diserahkan setiap bulan kepada Perusahaan melalui Bagian Drilling dan Blasting.

3.5 Geostatistik (Statistik Spasial)

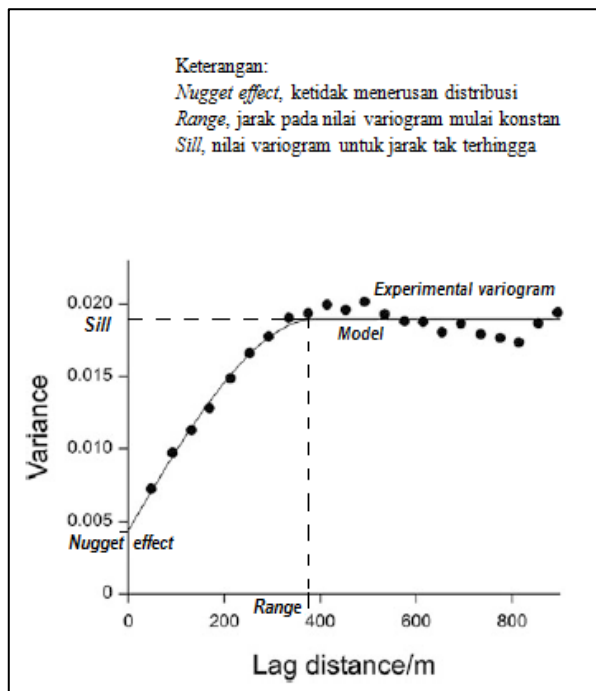
Geostatistik, juga dikenal sebagai statistik spasial, yaitu metode analisis yang digunakan untuk mengukur distribusi suatu fenomena dengan menggunakan keruangan. Ini berbeda dengan statistik non-spasial, yang menganalisis elemen keruangan tidak. Dengan menggunakan geostatistik, kita dapat mengkuantifikasi korelasi antara dua nilai yang terpisah oleh jarak h dan menggunakan data ini untuk membuat prediksi pada lokasi yang tidak diukur.

Dalam kumpulan data fenomena alam, kecenderungan kemenerusan ruang biasanya ditemukan. Dua nilai data yang terletak dekat satu sama lain memiliki kemungkinan lebih besar untuk memiliki nilai yang mirip daripada dua nilai data yang terletak jauh satu sama lain.

Metode statistik yang dikenal sebagai geostatistik memanfaatkan hubungan antara variabel yang diukur pada titik tertentu dengan variabel yang diukur pada titik yang berbeda dengan jarak tertentu dari titik pertama, atau data spasial.

Metode ini juga digunakan untuk mengestimasi parameter di lokasi yang datanya belum diketahui (Oliver and Carrol, 2005).

Keketakbebasan dan keheterogenan adalah dua ciri yang membedakan data spasial ini. Kebebasan disebabkan oleh perhitungan galat pengamatan dan fakta bahwa hasil di satu bagian sistem memengaruhi hasil di bagian lain. Untuk menggunakan analisis geostatistik, variogram atau semivariogram adalah alat utama dalam perhitungan geostatistik; ini digunakan untuk mengkuantifikasi korelasi ruang antar contoh. Sementara variogram model secara teoritis merupakan model matematis, variogram eksperimental diperoleh dari data yang diamati atau hasil pengukuran.



Gambar 3. 13. Variogram eksperimental dan variogram model *spherical*

(Sumber: Modifikasi dari Oliver dan Webster, 2015)

Nilai rata-rata dan varians dari populasi sering diperkirakan dengan tingkat yang ditentukan dari kepercayaan menyeluruh dari sejumlah relatif kecil sampel. Keyakinan dalam rata-rata global pada tingkat tertentu tidak selalu cukup, dan pengetahuan tentang nilai-nilai lokal dari parameter dan variabilitas lokal sering diperlukan untuk karakterisasi limbah dan tujuan perencanaan tambang.

Semi-variogram eksperimental, atau $\gamma(h)$, adalah dasar dari kebanyakan geostatistik. Ini adalah alat dasar untuk menentukan karakteristik properti spasial (z) dan mengukur perbedaan rata-rata antara data yang terpisah oleh jarak, h . Variogram juga merupakan pusat untuk estimasi atau interpolasi metode geostatistik (kriging), serta metode yang lebih maju untuk perubahan dukungan dan simulasi kondisional.

Sebuah variogram eksperimental dihitung sebagai setengah rata-rata perbedaan kuadrat antara komponen setiap pasangan data. Dimana $\gamma(h)$ digambarkan sebagai berikut:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2$$

Keterangan:

$\gamma(h)$: Fungsi variogram

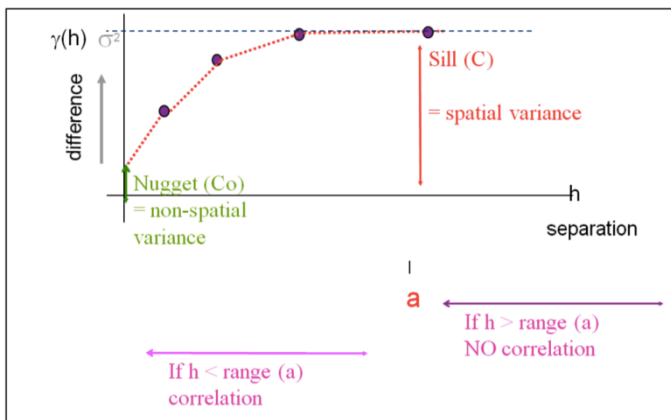
$n(h)$: Jumlah pasangan data

$Z(x_i + h)$: Nilai kadar pada lokasi $(x_i + h)$

$Z(x_i)$: Nilai kadar pada lokasi x_i

h : Merupakan suatu vektor yang menyatakan jarak antara dua titik sesuai dengan nilai lag untuk perhitungan variogram eksperimental.

Berikut $z(u\alpha)$ dan $z(u\alpha + h)$ adalah nilai-nilai dari pasangan titik dan penjumlahan semua pasangan N dipisahkan oleh jarak, (h) . Secara umum, h adalah vektor, memiliki amplitudo dan arah. Cara lain untuk mengatakan hal ini adalah bahwa variogram eksperimental merupakan plot jarak pemisahan (h) dari titik dipadankan terhadap varians dari nilai properti untuk semua pasangan sampel yang dipisahkan oleh jarak, h . Sebuah variogram ideal ditunjukkan pada Gambar di bawah.



Gambar 3. 14. Komponen Variogram.

(Sumber: Oliver dan Webster, 2015)

Pada Gambar di atas dapat dijelaskan komponen dalam variogram atau semivariogram adalah sebagai berikut.

- Jangkauan, menurut Isaaks dan Srivastava (1989), adalah jarak di mana variogram adalah dataran tinggi atau masa stabil. Jarak di mana variogram mencapai nilai sill disebut range, tetapi menurut Dorsel dan Breche (1997), range adalah jarak antara lokasi pengamatan di mana ragamnya tidak meningkat. Dalam grafik variogram, jarak yang diwakili oleh lambang "a" adalah jarak dari titik nol pada sumbu

horizontal sampai titik proyeksi perubahan variogram dari miring ke mendatar. Pada jarak ini, posisi variabel dipengaruhi. Nilai $Z(s)$ dan nilai lainnya akan memiliki korelasi antara satu sama lain dalam batas range. Besarnya korelasi antara satu nilai ke nilai lain akan berkurang sesuai dengan bertambahnya jarak. Dalam praktik, batas akan mempengaruhi korelasi spasialnya.

- b. Sill: menurut Isaaks dan Srivastava (1989), masa stabil suatu variogram saat mencapai rangenya disebut sill. Menurut Dorsel dan Breche (1997), sill menunjukkan saat variogram menjadi datar, sehingga ragamnya juga tidak meningkat.
- c. Nugget Effect adalah kediskontinuan pada pusat variogram terhadap garis vertikal yang bergerak dari nilai 0 di pusat ke nilai variogram pada jarak terkecil. Nugget effect relatif adalah istilah yang sering digunakan untuk menggambarkan rasio nugget terhadap sill. Ini biasanya ditunjukkan dalam persen (Isaaks and Srivastava, 1989). Nugget effect dapat mencakup kesalahan sistematis—biasanya dibuat oleh manusia—kesalahan sampling, kesalahan membaca alat, dan lain-lain.

Korelasi spasial terjadi ketika varians dari seluruh populasi lebih besar daripada varians rata-rata pasangan data pada jarak pemisahan rendah. Secara sederhana, hal-hal yang berada di dekat satu sama lain cenderung memiliki nilai yang sama, dan hal-hal yang berada di jarak jauh cenderung memiliki nilai yang berbeda.

Pada jarak pemisahan yang cukup besar, dikenal sebagai rentang/range (a), varians rata-rata pasangan akan kurang lebih sama seperti yang dari populasi keseluruhan σ^2 , menunjukkan bahwa korelasi spasial tidak ada lagi di luar jarak itu. Karakteristik range ini sejalan dengan pemahaman intuitif tentang kemenerusan geologi dan isi komoditas/distribusi kualitas dalam berbagai sumberdaya yang berbeda. Hal tersebut juga mencerminkan jarak bor yang biasa digunakan untuk

memperkirakan sumberdaya dalam berbagai jenis cebakan. Sebuah variogram yang naik secara konsisten dari jarak pemisahan rendah dan kemudian merata merupakan bentuk khas korelasi spasial. Sebuah variogram yang datar atau sangat tidak teratur dari jarak pemisahan yang rendah menunjukkan kurangnya korelasi spasial atau data yang kurang.

Nilai dugaan dari variogram yang didasarkan pada penarikan sampel disebut variogram eksperimen. Untuk memplot eksperimen variogram, sumbu-sumbu jarak antara dua titik dibagi ke dalam selang berurutan, mirip dengan histogram. Sebagai alat untuk analisis eksploitasi, experimental variogram memiliki kelemahan. Grafiknya bergantung pada pemilihan selang-selang dan dipengaruhi oleh metode rata-rata. Beberapa hal yang dimaksud dengan variogram eksperimen adalah:

- a. Variogram eksperimen, yang berisi informasi tentang fluktuasi variabel skala, adalah grafik yang biasanya digunakan dalam aplikasi geostatistik untuk menyelidiki ketakbebasannya.
- b. Kelakuan variogram pada jarak yang kecil dekat pusat menunjukkan apakah fungsi spasial terlihat mulus dan kontinu. Namun, hasil eksperimen dari variogram pusat (pada jarak pendek) menunjukkan tingkat fungsi kemulusannya.
- c. Behavior berukuran besar: Kelakuan variogram pada jarak yang sebanding dengan ukuran daerahnya menentukan apakah fungsi tersebut adalah fungsi stationary.

Variogram eksperimen akan berfungsi sebagai fungsi untuk menstabilkan nilai di sekitarnya, yaitu sill. Selain itu, sill yang diperoleh sebagai fungsi yang tidak bergerak akan menunjukkan panjang skala (Kitanidis, 1997).

Jika variogram eksperimental tidak menunjukkan struktur atau rentang luar sampel jarak terkecil, maka tidak ada korelasi spasial antara sampel pada atau di atas sampel jarak terkecil. Ini berarti bahwa nilai-nilai parameter di lokasi yang tidak diketahui tidak dapat diinterpolasi atau diekstrapolasi dengan keyakinan apapun, dan rata-rata semua sampel dalam domain adalah estimasi terbaik di setiap lokasi yang tidak diketahui.

Parameter kecocokan menentukan hubungan antara variogram model dan variogram eksperimental. Pencocokan, atau pencocokan, variogram dilakukan untuk mengetahui hubungan antara variogram eksperimental dan variogram model. Selanjutnya, nilai parameter kecocokan dihitung. Analisis struktural adalah istilah untuk proses pencocokan ini (structural analysis).

Tiga model variogram teoritis yang umum digunakan dalam analisis struktural adalah spherical, exponential, dan Gaussian (Oliver dan Webster, 2015), lihat Gambar 3.6:

- a. Model variogram *spherical* didefinisikan dengan persamaan berikut:

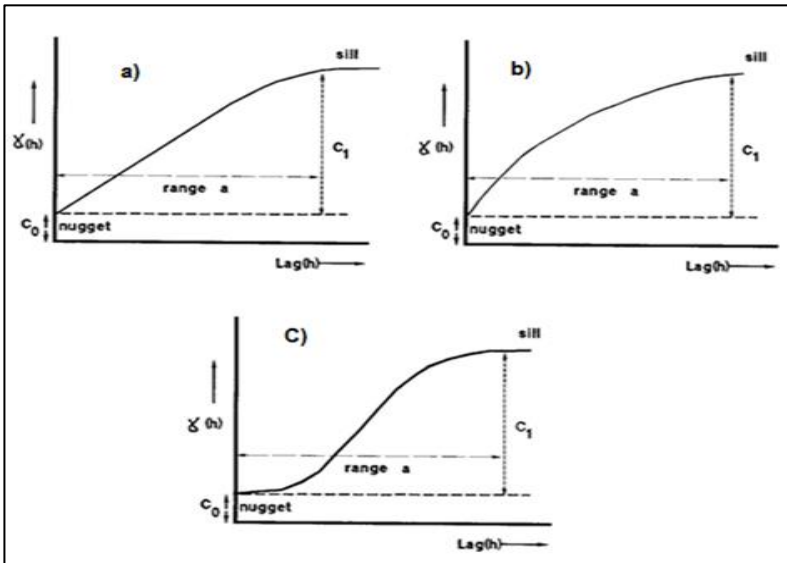
$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] + C_0, & \text{untuk } 0 < h \leq a \\ C + C_0, & \text{untuk } h > a \\ 0, & \text{untuk } h = 0 \end{cases}$$

- a) Model *exponential* dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] + C_0$$

- b) Model gaussian adalah bentuk kuadrat dari eksponensial yang menghasilkan bentuk parabolik pada jarak yang dekat. Model ini dirumuskan sebagai persamaan berikut:

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp \left(-\frac{h^2}{a} \right) \right] + C_0$$



Gambar 3. 15. Model variogram dengan *nugget effect*, a) *Spherical* b) *Exponential*, c) *Gaussian*

Suatu variogram harus ditentukan pada berbagai arah karena jarak h adalah vektor. Dengan demikian, bentuk anisotropi dapat dihasilkan jika $\gamma(h)$ berubah sesuai dengan arah orientasinya.

- Bentuk isotropi: $\gamma(h)$ adalah suatu fungsi dari harga absolut vektor h jika nilai masing-masing variogram pada berbagai arah sama.
- Geometrik anisotropi terjadi ketika beberapa $\gamma(h)$ dengan arah yang berbeda memiliki harga sill dan nugget varian yang sama tetapi nilai rangenya berbeda.
(lihat Gambar 3.14).

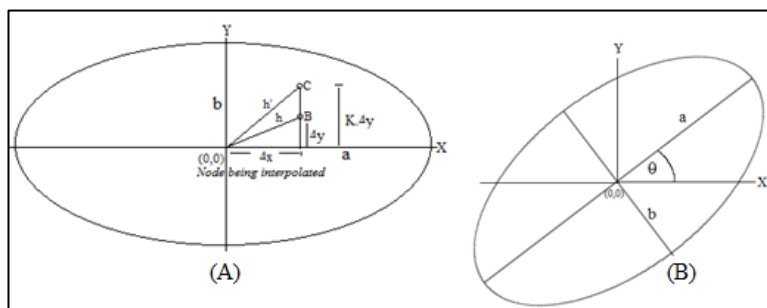
Jika arah sumbu anisotropi parallel terhadap sumbu sistem koordinat data (Gambar 3.14 A) maka h' , sebagai transformasi dari jarak h , merupakan fungsi dari koordinat dua point (x_1, y_1) dan (x_2, y_2) adalah:

$$h' = \sqrt{(\Delta x)^2 + (K \cdot \Delta y)^2}$$

Dengan K (anisotropi faktor) adalah nilai sumbu panjang dibagi sumbu pendek (a/b), lihat Gambar 3.15 (A).

Bila sumbu anisotropi membentuk sudut θ terhadap sumbu dari sistem koordinat data (Gambar 3.7 (B)), maka nilai h' dihitung dengan persamaan berikut (Barnes, 1980):

$$yh' = \sqrt{(\Delta x \cdot \cos\theta + \Delta y \cdot \sin\theta)^2 + K^2(\Delta x \cdot \sin\theta + \Delta y \cdot \cos\theta)^2}$$



(Sumber: Oliver dan Webster, 2015)

Gambar 3. 16. Bentuk Anisotropi Terhadap Sistem Koordinat Data

(A): Anisotropi parallel terhadap sumbu sistem koodinat data.

(B): Anisotropi membentuk sudut θ terhadap sumbu sistem koodinat data.

Menurut Sulistyana (1999), nugget effect berpengaruh terhadap keseragaman nilai-nilai bobot contoh. Pada setiap contoh, model variogram dengan nilai nugget yang besar

menghasilkan bobot yang hampir identik. Akibatnya, hasil kriging sama dengan rerata biasa. Menurut Oliver dan Webster (2015) terdapat korelasi positif antara nilai rasio nugget effect terhadap sill dengan nilai variansi estimasi, bila nilai rasio nugget effect terhadap sill semakin besar maka nilai variansi estimasi menjadi semakin besar pula.

Untuk penelitian ini, variogram eksperimen dilakukan dalam beberapa arah pencarian: utara-selatan, timur-barat, barat laut-tenggara, dan barat daya-timur laut. Namun, toleransi angle dan parameter jarak antar conto, juga dikenal sebagai luas daerah pencarian, digunakan untuk menunjukkan luas daerah pencarian. Digunakan jarak lag 100 m, yang sama dengan jarak antar titik bor, untuk mendapatkan pasangan data yang baik. Lag size digunakan menentukan kisaran autokorelasi mana yang akan dihitung. Jarak minimum untuk bidang ini adalah jarak minimum antara titik yang berdekatan dalam kumpulan data, sedangkan jarak maksimum adalah jarak maksimum antara dua titik. Jumlah minimum pasangan data untuk semivariogram ialah 30 pasang menurut Journel & Huijbregt (1978) dan Webster & Oliver (1992).

Variogram Map digunakan di setiap arah kompas untuk memberikan gambaran visual tentang semivariance. Ini memungkinkan seseorang untuk menemukan sumbu utama yang tepat untuk menentukan model variogram anisotropik. Map variogram menunjukkan jumlah data yang digunakan dalam proses fitting semivariogram; semakin banyak data yang tersedia, semakin luas model map variogram, dan sebaliknya. Dalam penelitian ini, semua model variogram adalah anisotropi, seperti yang ditunjukkan oleh beberapa map variogram yang memiliki panjang range yang berbeda di berbagai arah.

Untuk melakukan variogram eksperimen, model variogram teoritis dipasang. Ini adalah proses mencocokkan variogram eksperimen dengan model variogram yang sesuai. Pada penelitian ini, satu-satunya model yang digunakan adalah

model sfera. Model ini dipilih melalui analisis variogram untuk mendapatkan parameter nugget (C_0), sill (C_0+C), range (a), dan bentuk anisotropi.

BAB IV

PENDEKATAN SPASIAL DAN STRUKTURAL DALAM ANALISIS GETARAN PELEDAKAN DAN KEBERLANJUTAN PERTAMBANGAN

Dalam upaya memahami dan mengelola dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh kegiatan tambang batubara, khususnya terkait getaran akibat peledakan, pendekatan ilmiah yang terstruktur menjadi sangat penting. Teknik-teknik seperti Kriging, Interpretative Structural Modeling (ISM), dan Multidimensional Scaling (MDS) menawarkan solusi yang dapat membantu dalam memahami distribusi spasial getaran, menganalisis hubungan antar faktor yang mempengaruhi, serta menilai keberlanjutan operasi tambang.

4.1 Kriging

Kriging dikenal sebagai Best Linear Unbiased Estimator (BLUE), kriging adalah teknik estimasi lokal yang memberikan harga estimasi dalam keadaan tidak bias. Ordinary Kriging (OK) digunakan untuk mengestimasi satu variabel biasa. Melalui teknik Kriging, kita dapat memetakan dan memprediksi pola penyebaran getaran. Penelitian yang melibatkan kriging pada getaran peledakan dapat memberikan wawasan yang berharga dalam memahami pola spasial dan distribusi geografis dari fenomena ini, serta membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih baik terkait pengelolaan risiko dan perlindungan lingkungan.

Analisis kriging pada penelitian ini memanfaatkan data spasial atau geografis yang berkaitan dengan fenomena yang diteliti, dalam hal ini getaran peledakan pada tambang

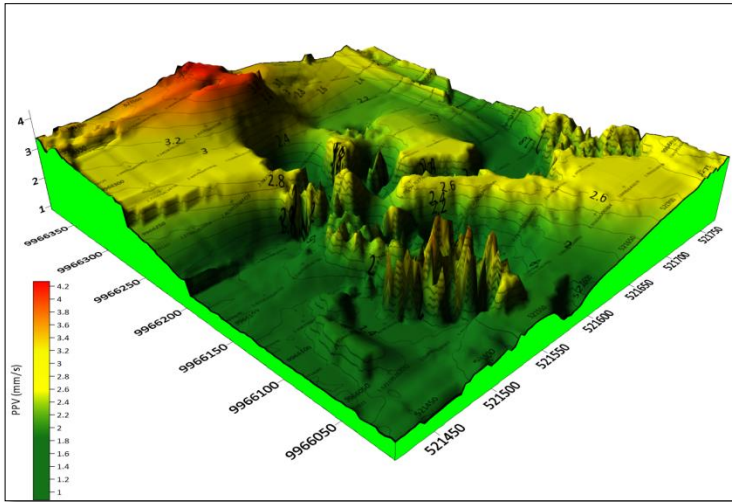
batubara. Proses analisisnya melibatkan beberapa komponen utama seperti:

- 1) Data observasi atau pengukuran yang diperoleh langsung dari lapangan, termasuk tingkat getaran yang diukur di berbagai lokasi sekitar area peledakan;
- 2) Setiap data pengukuran dilengkapi dengan koordinat geografis yang menunjukkan posisi pasti setiap titik pengukuran dalam konteks geografis;
- 3) Informasi tambahan mengenai data yang dapat mencakup waktu pengukuran, kondisi lingkungan, dan faktor lain yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran;
- 4) Kovariat yang dapat mempengaruhi distribusi getaran, seperti jenis batuan, kedalaman lapisan, dan aktivitas penambangan yang terjadi di sekitar area pengukuran;
- 5) Data variogram digunakan untuk menilai bagaimana variabilitas data pengukuran berubah terhadap jarak. Variogram adalah alat penting dalam Kriging untuk memodelkan struktur spasial data; dan
- 6) Data batas atau kendala mencakup informasi tentang batas geografis atau kendala lain yang dapat mempengaruhi sebaran getaran, seperti batas wilayah pertambangan atau zona aman.

Hasil analisis Kriging ini tidak hanya memberikan gambaran pola sebaran getaran peledakan, namun juga menunjukkan wilayah yang berpotensi berisiko tinggi dan memerlukan mitigasi lebih lanjut untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan keselamatan masyarakat sekitar. Dalam penelitian ini dilakukan pemetaan Optimal Stochastic Index (ISO) Peak Particle Velocity (PPV) [28] menggunakan data dari 2.717 titik lubang bor selama satu bulan. Pengamatan dilakukan sebanyak 25 kali peledakan pada lokasi yang telah ditentukan. Metode ini menggambarkan pola sebaran spasial intensitas getaran peledakan secara 2- D.

Ketinggian tertinggi daerah penelitian adalah 140 meter dengan interval antar ketinggian 20 meter. Sumber data getaran peledakan diperoleh dari sistem monitoring geoteknik yang dipasang di sekitar lokasi wilayah tambang batubara. Sistem ini merupakan bagian dari sistem pemantauan tambang yang lebih luas, yang dirancang untuk menyediakan data real-time yang akurat. Data ini penting untuk memantau potensi dampak getaran peledakan terhadap lingkungan sekitar dan infrastruktur yang ada. Dengan memanfaatkan data hasil pemantauan ini, teknik analisis seperti Kriging atau metode spasial lainnya dapat digunakan untuk mengevaluasi pola sebaran getaran secara spasial.

Pengumpulan data getaran peledakan di tambang batubara biasanya melibatkan penggunaan berbagai sensor dan instrumen geoteknik yang ditempatkan di sekitar area peledakan. Sensor-sensor ini merekam data getaran secara terus menerus, memberikan informasi rinci mengenai intensitas dan frekuensi getaran yang ditimbulkan oleh aktivitas peledakan. Data yang dikumpulkan membantu dalam analisis yang lebih mendalam tentang bagaimana dampak getaran terhadap wilayah sekitar tambang, baik dari segi lingkungan maupun infrastruktur. Karakteristik spasial ini juga sangat penting dalam analisis dan interpretasi data, karena memungkinkan peneliti mengidentifikasi pola dan tren dalam data yang mungkin mengindikasikan area berisiko. Pemahaman yang mendalam terhadap karakteristik spasial getaran peledakan memungkinkan peneliti dan pengelola tambang untuk merumuskan lebih tepat.



Gambar 4. 2. Visualisasi 3 dimensi dari hasil kriging data ppv dengan satuan mm/s menggunakan metode ordinary kriging.

Metode kriging digunakan untuk menginterpolasi dan memodelkan distribusi Peak Particle Velocity (PPV) di area tambang batubara berdasarkan data pengukuran yang tersedia. Kriging merupakan teknik interpolasi spasial yang mengestimasi nilai pada lokasi yang tidak terukur dengan memanfaatkan data dari titik-titik pengamatan di sekitarnya, serta memperhitungkan struktur spasial dari data tersebut.

1. Model variogram yang diterapkan dalam analisis ini adalah kriging spherical, yang menggambarkan hubungan spasial antara nilai-nilai PPV di berbagai jarak. Model ini mengasumsikan bahwa korelasi antara nilai PPV menurun secara bertahap seiring dengan meningkatnya jarak antara titik-titik pengamatan. Variogram ini memberikan informasi penting tentang skala dan arah variabilitas spasial, yang digunakan untuk menentukan parameter interpolasi kriging.
2. Teknik kriging yang digunakan memperhitungkan model variogram untuk melakukan interpolasi nilai PPV di lokasi-

lokasi yang tidak terukur. Dengan demikian, kriging memberikan estimasi yang optimal berdasarkan data yang ada, meminimalkan varians prediksi dan menghasilkan peta distribusi PPV yang lebih akurat. Hasil interpolasi ini membantu dalam memahami bagaimana intensitas getaran peledakan tersebar di seluruh area tambang.

3. Validasi hasil kriging dilakukan dengan membandingkan nilai prediksi dengan data pengamatan aktual untuk mengevaluasi keakuratan model. Analisis kesalahan dan validasi silang memastikan bahwa estimasi yang dihasilkan dapat diandalkan dan memberikan gambaran yang representatif dari distribusi PPV. Hasil validasi menunjukkan bahwa model kriging mampu memprediksi nilai PPV dengan akurasi yang memadai, memperkuat keandalan peta distribusi yang dihasilkan.
4. Interpretasi Hasil dari analisis kriging memperlihatkan pola spasial dari intensitas getaran peledakan di area tambang. Peta distribusi yang dihasilkan mengidentifikasi zona-zona dengan intensitas PPV tinggi yang berpotensi menyebabkan dampak signifikan. Penggunaan kode warna, seperti merah untuk zona bahaya tinggi, kuning untuk zona waspada, dan hijau untuk zona aman, mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan. Ini memungkinkan tindakan mitigasi yang tepat untuk melindungi infrastruktur dan keselamatan pekerja.
5. Implikasi dan Rekomendasi, Hasil kriging memberikan informasi penting untuk manajemen tambang dalam merencanakan dan mengelola kegiatan peledakan. Dengan memahami distribusi spasial PPV, pengelola tambang dapat menerapkan langkah-langkah mitigasi yang lebih efektif, seperti penyesuaian teknik peledakan dan pengaturan jarak aman, guna meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

Secara keseluruhan, penggunaan kriging dalam analisis ini memungkinkan pemahaman yang lebih baik tentang distribusi PPV di area tambang, memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dan perencanaan yang lebih strategis dalam pengelolaan risiko peledakan.

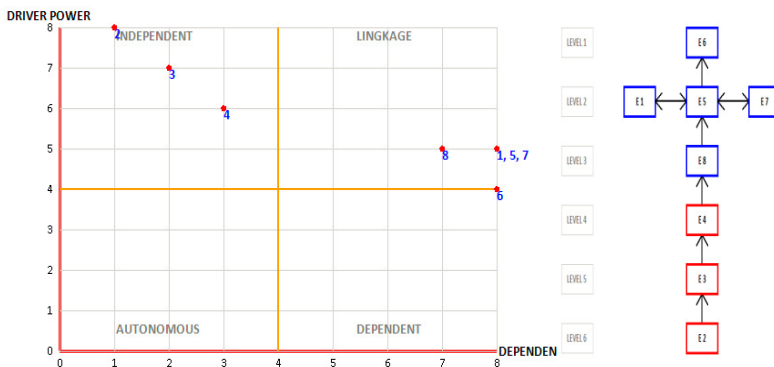
4.2 Interpretative Structural Modeling (ISM)

Dalam memahami dinamika sistem yang kompleks, seperti dampak getaran peledakan di tambang batubara atau pengaruh faktor lingkungan terhadap operasi tambang, diperlukan pendekatan yang mampu mengidentifikasi dan menganalisis hubungan antar elemen yang saling terkait. Interpretative Structural Modeling (ISM) adalah salah satu metode yang menawarkan cara yang terstruktur dan sistematis untuk memetakan hubungan-hubungan ini, memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai bagaimana elemen-elemen dalam sistem saling mempengaruhi.

Pembahasan dalam ISM, elemen-elemen utama yang mempengaruhi sistem atau fenomena yang sedang dianalisis harus diidentifikasi dengan jelas. Setelah diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah melakukan perbandingan berpasangan antar elemen-elemen. Perbandingan ini bertujuan menentukan seberapa kuat dan arah hubungan antara masing-masing elemen. Metode yang umum digunakan adalah mewawancarai para ahli untuk mendapatkan persepsi mereka tentang hubungan antar elemen. Berdasarkan hasil perbandingan berpasangan, sebuah matriks dapat dibentuk. Matriks ini menggambarkan hubungan antar elemen-elemen dalam bentuk matriks biner atau matriks kuadrat yang menunjukkan kekuatan dan arah hubungan antar setiap pasangan elemen.

Dari matriks yang telah dibentuk, dapat dibuat matriks reachability menunjukkan ketercapaian dari satu elemen ke elemen lain dalam struktur hierarkis yang sedang dibangun.

Matriks reachability membantu dalam mengidentifikasi hubungan langsung dan tidak langsung antar elemen-elemen. ISM menggunakan matriks reachability dan analisis tambahan untuk membentuk struktur hirarkis dari elemen-elemen yang telah diidentifikasi. Struktur hirarkis ini menunjukkan tingkat kepentingan atau pengaruh masing-masing elemen dalam sistem secara berjenjang, dari elemen paling dasar hingga elemen paling tinggi. Langkah terakhir dalam ISM adalah melakukan validasi terhadap model yang telah dibangun, melibatkan evaluasi terhadap konsistensi dan koherensi struktur hirarkis yang telah dibentuk, serta memastikan bahwa model ini akurat dalam merepresentasikan dinamika sistem yang sedang dianalisis.



Gambar 4. 3. Hubungan Driver Power dan Struktur Hirarki

Dari gambar di atas, didapat Pembahasan sebagai berikut:

- Sektor 1: **Autonomous**, sub elemen/peubah yang umumnya tidak berkaitan dengan sistem dan mempunyai hubungan yang kecil walaupun dapat saja hubungan tersebut kuat. (tidak terdapat).
- Sektor 2: **Independent**, di isi oleh Elemen 2, 3, dan 4 (E2, E3, E4) yaitu Regulasi yang lemah yang disebut sebagai bagian sisa dari system dan disebut peubah bebas.

- c. Sektor 3: **Linkage**, di isi oleh Elemen 1, 5, 7 dan 8 (E1, E5, E7, E8) hubungan antar peubah tidak stabil, sehingga harus dikaji secara hati-hati karena perubahannya akan berdampak pada peubah lain dan pada akhirnya akan kembali berdampak pula pada peubah bersangkutan.
- d. Sektor 4: **Dependent**, di isi oleh Elemen 6 (E6) bagian sisa dari sistem dan disebut peubah bebas/ pencemaran lingkungan.

Dengan menggunakan *Interpretative Structural Modeling* (ISM), peneliti dapat menggambarkan dan menganalisis sistem secara lebih mendalam, serta mendapatkan wawasan yang lebih baik tentang bagaimana elemen-elemen dalam sistem saling terkait dan berdampak satu sama lain, diantaranya:

1. Identifikasi Faktor Utama: Mengidentifikasi faktor-faktor utama yang mempengaruhi getaran akibat peledakan pada kerusakan pada struktur bangunan (E2). Jenis bahan bangunan, jarak dari titik peledakan, dan karakteristik peledakan itu sendiri.
2. Pemahaman Hierarki Hubungan: Menggambarkan secara hierarkis bagaimana berbagai faktor saling terkait dan mempengaruhi satu sama lain. Jarak dari titik peledakan dapat mempengaruhi intensitas getaran yang dirasakan pada bangunan.
3. Analisa Dampak: Dapat dianalisa bagaimana intensitas, durasi, dan frekuensi getaran dapat mempengaruhi berbagai jenis bangunan dan struktur. Hal ini dapat membantu dalam merancang perlindungan atau mitigasi yang tepat terhadap getaran peledakan, sehingga kekhawatiran terhadap masyarakat lokal (E3) dapat terjawab.
4. Optimasi Solusi: Dengan memahami hierarki dan hubungan antara faktor-faktor yang berbeda, Mengoptimalkan strategi mitigasi atau perlindungan terhadap getaran peledakan. Pemilihan material bangunan yang lebih tahan terhadap getaran atau penempatan struktur pendukung yang lebih

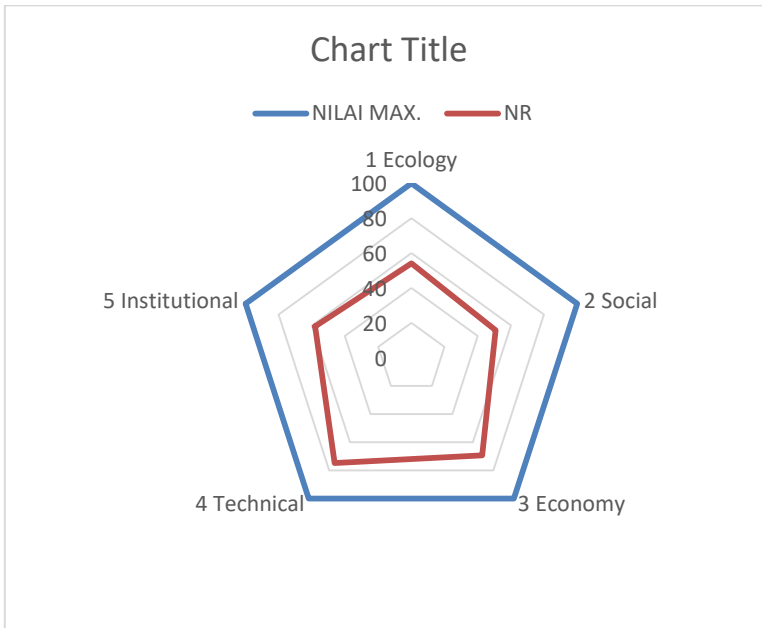
efektif, sehingga Lemahnya Pengawasan dan Penegakan Hukum (E4), dapat terselesaikan.

Dengan demikian, ISM dapat menjadi alat yang sangat berguna dalam menganalisis dan memahami kompleksitas getaran peledakan terhadap bangunan serta dalam merancang langkah-langkah untuk mengurangi dampaknya.

4.3 Analisis Multidimensional Scaling (MDS)

Analisis Deplesi SDGs Pekerjaan Layak dan Pertumbuhan Ekonomi di Tambang Batubara, Terhadap Pembangunan Berkelanjutan PT. IBP yang bersebelahan memberikan indeks cukup keberlanjutan, dan atribut yang digunakan terdiri dari lima dimensi, termasuk Lingkungan, Sosial, Ekonomi, Teknis, dan Kelembagaan. Selain itu, hasilnya mencapai status cukup berkelanjutan masing-masing sebesar 54,09, 50,75, 69,15, 74,78, dan 57,98% untuk dimensi Lingkungan, Sosial, Ekonomi, Teknis, dan Kelembagaan.

Berdasarkan nilai yang dihitung dari analisis Monte Carlo pada tingkat kepercayaan 95% untuk setiap dimensi dan lima elemen yang digabungkan, terlihat perbedaan yang relatif minimal dibandingkan dengan hasil MDS. Situasi ini menunjukkan nilai akurat dari evaluasi MDS sebagai berikut:



Hasil analisis MDS terhadap indeks keberlanjutan tambang batubara menunjukkan hal tersebut meskipun ada beberapa kesalahan kecil dalam prosedur penilaian atribut, sebagian besar Perbedaan skor berasal dari perbedaan pendapat di antara para ahli yang terlibat. Itu tingkat stabilitas analisis MDS tetap tinggi, dengan kesalahan data yang dapat diabaikan dan data yang minimal kehilangan. Selain itu, nilai S-stress yang diperoleh cukup tinggi menunjukkan akurasi yang baik hasil pemodelan. Lampiran 1. menyajikan hasil analisis Monte Carlo yang mengukuhkan nilai indeks keberlanjutan multidimensi dengan tingkat yang tinggi kepercayaan diri.

Koefisien determinasi (R^2) yang relatif tinggi berkisar antara 0,8834 sampai dengan 0,9389 menunjukkan bahwa atribut dalam analisis ini mewakili 92-95% variabilitas sampel menggambarkan akurasi model yang kuat. Selain itu, nilai S-stress yang rendah (0,1402-0,1669) menunjukkan tingkat akurasi konfigurasi yang sangat baik untuk setiap dimensi, seperti yang dijelaskan pada Lampiran 2.

Untuk mengatasi konflik sosial akibat getaran peledakan di lingkungan Wilayah pertambangan PT. IBP, solusi yang diusulkan mencakup beberapa tahapan penting. Tahapan ini dirancang untuk mengurangi dampak negatif getaran terhadap masyarakat dan lingkungan, serta memperkuat hubungan antara tambang dan masyarakat setempat.

BAB IV

STUDI KASUS DAMPAK GETARAN PELEDAKAN PERTAMBANGAN BATUBARA

Dalam kajian dampak getaran peledakan di pertambangan batubara, sejumlah penelitian telah memberikan wawasan yang mendalam mengenai pengaruh getaran tanah terhadap lingkungan sekitar serta strategi manajemen untuk meminimalkan risiko. Penelitian-penelitian ini berfokus pada dampak getaran terhadap struktur bangunan dan keselamatan pekerja, serta memberikan rekomendasi penting mengenai pengelolaan getaran di lokasi tambang.

Penelitian oleh M. Aldi Rizaldi (2022) menjadi salah satu kajian yang sangat relevan dalam konteks ini. Studi yang dilakukan di Pit TSBC Tambang Air Laya, PT. Bukit Asam Tbk., Tanjung Enim, Sumatera Selatan, mengeksplorasi dampak getaran tanah akibat peledakan terhadap struktur bangunan dan aktivitas karyawan. Dalam penelitiannya, Rizaldi menekankan pentingnya penerapan metode pengelolaan getaran yang tepat untuk mengurangi risiko kerusakan bangunan, terutama pada perumahan karyawan yang berada di area tambang. Temuan ini menyoroti bahwa dengan manajemen yang efektif, dampak negatif dari getaran tanah dapat diminimalisir secara signifikan, memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap bangunan dan keselamatan karyawan. Studi ini juga berfungsi sebagai acuan penting bagi tambang-tambang lain yang menghadapi masalah serupa, terutama dalam konteks perlindungan infrastruktur dan keselamatan pekerja di lingkungan tambang yang intensif.

Sejalan dengan penelitian Rizaldi, Wahyudi Pratama Putra Sangadji (2022) melanjutkan diskusi ini dengan fokus pada manajemen getaran di tambang terbuka. Penelitiannya menggunakan metode *scaled distance analysis* sebagai pendekatan awal dalam mengelola tingkat getaran akibat peledakan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi awal terhadap rona tingkat getaran yang dihasilkan dari peledakan, sehingga mempermudah pengelolaan dan pengendalian dampak di masa mendatang. Penelitian Sangadji menunjukkan bahwa melalui analisis jarak terukur, pengelolaan getaran dapat dilakukan secara lebih efektif, memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang dampak peledakan terhadap struktur di sekitar tambang. Ini memberikan landasan yang kuat bagi penerapan strategi manajemen getaran yang lebih canggih dan berbasis data.

Sementara itu, Eko Santoso (2021) mengembangkan rumusan prediksi getaran tanah dengan menggunakan metode *scaled distance analysis*. Penelitian ini memberikan acuan penting dalam memprediksi dampak peledakan terhadap lingkungan sekitar. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa rumusan prediksi yang dikembangkan cukup baik dan dapat digunakan untuk memastikan bahwa dampak dari kegiatan peledakan tetap dalam batas aman, dengan fokus pada ambang batas getaran peledakan di area sekitar tambang batubara. Hal ini memberikan dasar bagi pembuatan pedoman praktis dalam pengelolaan getaran tanah.

Dalam konteks yang sama, Deni Rolansyah (2021) melakukan analisis getaran tanah terhadap area pemukiman pada operasi peledakan di Pit 2 Banko Barat. Penelitian ini mengungkapkan bahwa sebagian besar data getaran tanah masih dalam batas aman sesuai dengan standar nasional, meskipun ada satu data yang sedikit melebihi ambang batas. Temuan ini menunjukkan perlunya estimasi tingkat getaran tanah yang lebih akurat untuk mencapai nilai *Peak Particle Velocity* yang aman, serta pentingnya pengaturan isian bahan

peledak untuk mengoptimalkan hasil peledakan sambil menjaga keselamatan lingkungan sekitar.

Penelitian oleh Yunita Kristina (2022) juga memberikan kontribusi penting dengan mengukur dampak ground vibration terhadap bangunan di sekitar tambang, khususnya di wilayah permukiman warga. Penelitian ini menunjukkan bahwa hasil getaran peledakan di pengaruhi oleh *scaled distance*, dengan rata-rata nilai getaran sebesar 0,83 mm/s yang tergolong aman. Penggunaan alat ukur Blassmate III dan Micromate memungkinkan pengukuran yang akurat dan analisis dampak getaran terhadap bangunan, memberikan gambaran yang jelas tentang pengaruh getaran peledakan terhadap struktur bangunan dan lingkungan sekitarnya.

Perspektif tentang dampak getaran peledakan pada pertambangan batubara dari berbagai studi mengenai pengelolaan dan mitigasi dampak getaran tanah. Penelitian oleh Hani Vinola Sari (2020) mengkaji pola rangkaian peledakan di Quarry Tuban I-IV PT. Semen Indonesia dan mengukur pengaruhnya terhadap tingkat getaran tanah. Dengan menggunakan metode statistika regresi power, penelitian ini menghasilkan rumus hubungan antara peak particle velocity (PPV) dan scaled distance (SD), yaitu $PPV = 323,75 (SD)^{-1.34}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat getaran tanah di lokasi tersebut masih tergolong aman jika dibandingkan dengan standar maksimal 3 mm/s dari PT. Semen Indonesia. Namun, meskipun hasil pengukuran menunjukkan kepatuhan terhadap standar, masih terdapat keluhan dari masyarakat sekitar yang merasa terdampak oleh peledakan. Penelitian ini menggarisbawahi pentingnya komunikasi yang baik dengan masyarakat serta perlunya penyesuaian lebih lanjut dalam metode peledakan untuk meminimalkan dampak sosial.

Penelitian oleh Indra Hot Daniel Hutasoit (2020) memperluas pemahaman tentang pengaruh pola peledakan terhadap getaran tanah dengan membandingkan pola peledakan Box cut dan Corner cut di Pit 2 Banko Barat PT Bukit

Asam Tbk. Hasil penelitian menunjukkan variasi dalam nilai getaran tanah, dengan Box cut menghasilkan getaran rata-rata 0,53 mm/s dan Corner cut 0,69 mm/s. Semua hasil pengukuran berada dalam batas aman menurut SNI 7571:2010, menunjukkan bahwa pengelolaan getaran tanah telah dilakukan dengan efektif. Temuan ini penting dalam memilih pola peledakan yang optimal untuk meminimalkan dampak terhadap permukiman dan bangunan di sekitarnya.

Sementara itu, penelitian Imelda Yuni Pratiwi (2022) berfokus pada evaluasi dampak getaran tanah pada aktivitas peledakan di Pit TSBC PT Bukit Asam Tbk. Penelitian ini mengevaluasi berbagai faktor yang mempengaruhi getaran tanah, termasuk struktur geologi, muatan bahan peledak, dan metode peledakan. Dengan membandingkan metode delay blast Nonel dan decking, penelitian ini menemukan bahwa penggunaan delay blast Nonel dapat mengurangi getaran tanah secara signifikan. Temuan ini menyoroti pentingnya memilih metode peledakan yang tepat dan menerapkan teknik yang sesuai untuk mengurangi dampak getaran tanah pada bangunan dan lingkungan sekitar.

Arwan Wira Yudha (2022) melakukan kajian teknis mengenai pengontrolan tingkat getaran tanah pada operasi peledakan di Sorowako East dan West Area PT Vale Indonesia Tbk. Dengan menggunakan teori scaled distance dan analisis regresi multivariat, penelitian ini mengusulkan rumusan prediksi ground vibration untuk berbagai jarak dan jumlah bahan peledak. Hasilnya menunjukkan persentase kesalahan relatif rata-rata sebesar 22,36% untuk Sorowako West dan 30,99% untuk Sorowako East. Temuan ini menyediakan panduan penting untuk menentukan jumlah bahan peledak yang optimal berdasarkan jarak dan kelas bangunan, serta memberikan kontribusi pada pengelolaan getaran tanah yang lebih efisien.

Penelitian terakhir yang dibahas, dilakukan oleh Ayu Purwaningsih (2023), mengevaluasi pengukuran getaran tanah di PT Semen Baturaja (Persero) Tbk menggunakan alat Micromate. Dengan bahan peledak ANFO, Dynamite, dan Detonator, penelitian ini mencatat nilai rata-rata getaran sebesar 1,6 mm/s, yang berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan. Penelitian ini menekankan pentingnya pemantauan rutin dan evaluasi untuk memastikan bahwa getaran tanah tetap dalam batas aman dan sesuai dengan permintaan perusahaan.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian ini memberikan gambaran yang komprehensif tentang berbagai metode dan pendekatan dalam mengelola dampak getaran peledakan di pertambangan batubara. Dari penggunaan rumusan prediksi, analisis pola peledakan, hingga metode pengelolaan yang tepat, studi-studi ini menunjukkan pentingnya penerapan teknologi dan metode yang sesuai untuk meminimalkan dampak getaran tanah terhadap lingkungan dan masyarakat.

BAB VI

STRATEGI MITIGASI KONFLIK SOSIAL AKIBAT GETARAN PELEDAKAN

Dalam pengelolaan pertambangan batubara, dampak getaran peledakan sering kali menimbulkan konflik sosial dengan masyarakat sekitar. Strategi mitigasi yang efektif sangat penting untuk meminimalkan dampak negatif dan menjaga hubungan baik dengan komunitas. Bab ini membahas pendekatan sistematis yang dapat diterapkan untuk mengurangi konflik sosial akibat getaran peledakan, dengan menguraikan setiap tahap dari identifikasi dampak hingga pelaporan dan transparansi.

Identifikasi Dampak dan Penilaian

Langkah awal dalam strategi mitigasi adalah identifikasi dampak dan penilaian. Proses ini dimulai dengan survei sosial untuk memahami dampak sosial dan keluhan masyarakat. Survei ini bertujuan untuk mengumpulkan data mengenai persepsi masyarakat terhadap getaran peledakan serta dampaknya terhadap kesejahteraan mereka. Selain itu, penilaian dampak lingkungan diperlukan untuk mengevaluasi sejauh mana getaran peledakan memengaruhi infrastruktur dan kesehatan masyarakat. Penilaian ini penting untuk menentukan area yang membutuhkan perhatian khusus dan untuk merancang langkah mitigasi yang tepat.

Konsultasi dan Komunikasi

Konsultasi dan komunikasi yang efektif adalah kunci dalam mitigasi konflik sosial. Dialog komunitas harus diadakan secara teratur untuk menjelaskan dampak dari getaran peledakan serta langkah-langkah mitigasi yang akan diterapkan. Pertemuan ini memungkinkan perusahaan untuk mendengarkan kekhawatiran masyarakat dan memberikan penjelasan yang jelas mengenai jadwal peledakan dan intensitas getaran. Berbagi informasi yang transparan membantu membangun kepercayaan dan memastikan bahwa masyarakat tidak merasa terabaikan atau tidak terinformasi.

Rencana Mitigasi Perkembangan

Setelah identifikasi dan komunikasi, langkah selanjutnya adalah mengembangkan rencana mitigasi. Penyesuaian jadwal peledakan menjadi salah satu strategi utama untuk menghindari gangguan terhadap aktivitas masyarakat. Penjadwalan yang bijaksana memastikan bahwa peledakan dilakukan pada waktu yang minim mengganggu kehidupan sehari-hari masyarakat. Selain itu, pengurangan intensitas getaran melalui penerapan teknik peledakan yang terkendali dan ramah lingkungan dapat mengurangi dampak negatif. Perbaikan infrastruktur juga penting untuk menjaga kualitas bangunan dan fasilitas yang terkena dampak. Inspeksi rutin dan perbaikan yang diperlukan memastikan bahwa infrastruktur tetap dalam kondisi baik.

Implementasi dari Tindakan Pencegahan

Pada tahap implementasi, pemantauan dan pengawasan merupakan bagian integral dari strategi mitigasi. Pemasangan sensor untuk memantau getaran secara real-time memungkinkan perusahaan untuk merespons segera jika getaran melebihi batas yang ditetapkan. Pelatihan dan

kesadaran juga penting, baik untuk pekerja maupun masyarakat, mengenai mitigasi getaran. Pelatihan ini memastikan bahwa semua pihak memahami prosedur dan teknik yang dapat mengurangi dampak getaran.

Evaluasi dan Pengaturan

Evaluasi efektivitas dari langkah-langkah mitigasi yang diterapkan harus dilakukan secara berkala. Proses ini melibatkan tinjauan menyeluruh terhadap hasil mitigasi dan penyesuaian rencana berdasarkan temuan evaluasi. Penyesuaian ini memungkinkan perusahaan untuk meningkatkan strategi mitigasi secara berkelanjutan dan memastikan bahwa langkah-langkah yang diambil tetap relevan dan efektif.

Hubungan Masyarakat dan Bangunan

Pengembangan program bantuan masyarakat dan investasi pada infrastruktur lokal adalah bagian dari strategi mitigasi yang berfokus pada hubungan masyarakat. Program ini menunjukkan komitmen perusahaan terhadap kesejahteraan komunitas dan dapat meningkatkan hubungan harmonis dengan masyarakat. Umpan balik dari komunitas harus diterima dengan baik dan digunakan untuk melakukan penyesuaian yang diperlukan. Ini memastikan bahwa masyarakat merasa didengarkan dan diperhatikan.

Pelaporan dan Transparansi

Terakhir, pelaporan rutin mengenai dampak getaran dan tindakan mitigasi harus dilakukan untuk memastikan transparansi. Menghasilkan laporan yang jelas dan terbuka mengenai hasil pengukuran getaran dan tindakan mitigasi memberikan informasi yang diperlukan kepada masyarakat dan pemangku kepentingan. Transparansi ini membantu membangun kepercayaan dan memastikan bahwa semua pihak terinformasi mengenai upaya mitigasi yang dilakukan.

Dengan mengikuti tahapan-tahapan ini, perusahaan tambang dapat mengurangi konflik sosial yang disebabkan oleh getaran peledakan dan meningkatkan hubungan harmonis dengan komunitas sekitarnya. Strategi mitigasi yang efektif tidak hanya berkontribusi pada keberlanjutan operasional tambang tetapi juga pada kesejahteraan masyarakat dan lingkungan sekitar.

BAB IV

PENUTUP

Pada buku ini mengungkapkan bahwa penelitian mengenai getaran yang dihasilkan oleh peledakan menggunakan campuran bahan bakar ANFO (Amonium Nitrat Fuel Oil) di wilayah pertambangan batubara dapat melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571:2010. Getaran yang tidak terkendali ini, khususnya pada elevasi yang lebih tinggi, dapat menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan serta flora dan fauna di sekitar area pertambangan. Dampak terhadap flora termasuk kerusakan akar dan penurunan pertumbuhan, sementara fauna dapat mengalami gangguan perilaku, kesehatan, serta perubahan pola migrasi. Analisis geostatistika yang dilakukan juga menunjukkan bahwa getaran ini menyebar secara tidak merata, berpotensi mempengaruhi area yang lebih luas dari yang diperkirakan sebelumnya.

Untuk mengurangi dampak buruk ini, penulis merekomendasikan penerapan metode mitigasi yang lebih efektif dan prosedur peledakan yang lebih terkontrol. Pemodelan peta sebaran getaran, atau zonasi dampak getaran peledakan, diusulkan sebagai alat penting dalam mengidentifikasi zona risiko tinggi dan merencanakan mitigasi yang lebih baik. Selain dampak fisik, penelitian ini juga mengidentifikasi kecemasan yang signifikan di kalangan masyarakat yang tinggal dekat dengan lokasi peledakan, di mana masalah seperti gangguan tidur, ketidaknyamanan, dan kerusakan bangunan sering dialami. Oleh karena itu, pendekatan penanganan dan mitigasi yang efektif diperlukan untuk meningkatkan kualitas hidup warga sekitar dan menjaga keselamatan lingkungan serta struktur bangunan di sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Absori, A., Yulianingrum, A. V., Dimyati, K., Harun, H., Budiono, A., & Disemadi, H. S. (2021). Environmental Health-Based Post-Coal Mine Policy in East Borneo. *Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences*, 9(E), 740-744. [8].
- Ahmed, S., Brown, D., & Lee, H. (2020). Managing community conflict and social sustainability in post-mining regions: A case study. *Journal of Environmental Management*, 249, 109427.
- Alkadrie. 2019. "Kajian Distribusi Ukuran Fragmen Batuan Granodiorit di PT. Hansindo Mineral Persada Desa Peniraman Kecamatan Sungai Pinyuh Kabupaten Mempawah. Provinsi Kalimantan Barat". Teknik Pertambangan, Universitas Tanjungpura: Pontianak.
- Amsya, R. M., Zakri, R. S., & Fiqri, M. R. (2021). Analisis Pengaruh Penggunaan Fly Ash Dan Kapur Tohor Pada Penetralan Ph Air Asam Tambang Di Pt. Mandiangin Bara Prima. *Jurnal Sains Dan Teknologi: Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknologi Industri*, 21(1), 109-116.
- Anonim. 2009. Modul Kursus Juru Ledak Pusdiklat Teknologi Mineral dan Batubara, Universitas Pembangunan Nasional Veteran: Yogyakarta.
- Ardanu, T. M. (2021). Coal Mining Reclamation Improvement in East Kalimantan Indonesia (Master's thesis, University of Twente). [1].
- Aryantie, M. H., Hidayat, M. Y., Widodo, T., Putra, A., & Dewata, I. (2023). Environmental Perspectives to the Rejection of Javanese Karst Mining in Systematic Literature Reviews. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, 18(12). 3757-3764
- Ash, R. L. 1990. Design of Blasting Rounds. *Surface Mining ; PP.* 565-583.

- Balfas, M. D. 2015. Geologi Untuk Pertambangan Umum. Graha Ilmu: Yogyakarta.
- Barlian, E., & Yunhendri Danhas, S. P. (2022). Konsep & Aplikasi Ekologi Manusia. Deepublish.
- Barlian, E., Dewata, I., Gusman, M., & Efendi, N. (2024). Effectiveness of Acid Mine Water Testing Using Sparing at PT. Bara Alam Utama. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 10(1), 100-107. [3].
- Bohling, G. (2005). Introduction to geostatistics and variogram analysis. Kansas Geological Survey, 1(10), 1-20. [21].
- Chen, J., Zhao, L., & Li, W. (2020). The impacts of mining activities on biodiversity and riparian ecosystems: A review. Environmental Science & Policy, 109, 123-135.
- Clark, I. (2010). Statistics or geostatistics? Sampling error or nugget effect? Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 110(6), 307-312. [22].
- Clarkson, M. A. (2022). Fully Automated Drill and Blast for Mining (Doctoral dissertation, University of Southern Queensland). [17].
- Davis, J. C. (2002). Statistics and Data Analysis in Geology (3rd ed.). John Wiley & Sons. [34].
- Dewata, I., & Danhas, Y. H. (2018). Pencemaran Lingkungan.
- Dewata, I., & Putra, A. (2021). Kriging-GIS model for the spatial distribution of seawater heavy metals. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 9(2), 629-637. [25].
- Diamantopoulou, E., Pavlides, A., Steiakakis, E., & Varouchakis, E. A. (2024). Geostatistical Analysis of Groundwater Data in a Mining Area in Greece. Hydrology, 11(7), 102. [24].
- Ding, Q., Wang, Y., & Zhuang, D. (2018). Comparison of the common spatial interpolation methods used to analyze potentially toxic elements surrounding mining regions. Journal of Environmental Management, 212, 23-31. [30].

- Dotto, M. S., & Pourrahimian, Y. (2024). The influence of explosive and rock Mass properties on blast damage in a single-hole blasting. *Mining*, 4(1), 168-188. [19].
- Efendi, N., Barlian, E., Dewata, I., Syah, N., & Gusman, M. (2024). Ambient dust levels in the paths that are passed and not passed by barges on the Mahakan river–East Kalimantan. *AIP Conference Proceedings*. 3001, 1. [2].
- Efendi, N., Cressendo, H., Putri, S. E., Antara, Y., Susanto, W. P. A., Musharyanto, M., & Diliarosa, S. (2021). Ecology and Environmental Science Waste Problems and Biota Life. *Science and Environmental Journal for Postgraduate*, 4(1), 30-35
- Efendi, N., Frinaldi, A., Lanin, D., Umar, G., & Gusman, M. (2023). Pertambangan Emas Tanpa Izin (Peti): Dampak Lingkungan, Sosial Dan Ekonomi Serta Peranan Hukum Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Nusantara (JIMNU)*, 1(3), 123-128. [9].
- Eri Barlian, Iswandi U, 2020. *Ekologi Manusia*, Penerbit Deepublish Jogjakarta.
- Eri Barlian, Yun Hendri Danhas, 2022. *Konsep dan Aplikasi Ekologi Manusia*. Penerbit Deepublish Jogjakarta.
- Fitriansyah, G. R. (2016). Evaluasi Getaran Peledakan berdasarkan Tingkat Peluruhan di PT Dahana Job Site Ck Kjb, Kampung Long Lanuk, Kecamatan Sambaliung, Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur.
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., & Walker, B. (2002). Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(5), 437-440.
- Fourney, W. L. (2016). Mechanisms of rock fragmentation by blasting. In *Comprehensive Rock Engineering* (pp. 39-68). [18].
- G. Tyler Miller. Jr. 1991. *Enviromental Science, Sustaining The Earth*.

- Getis, A. (1999). Spatial statistics. In Geographical Information Systems, 1, 239-251. [20].
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press.
- Gumengilung, A. (2017). Pengaturan Dan Pertanggung Jawaban Dalam Tindak Pidana Lingkungan Hidup Menurut UU No. 32 Tahun 2009 Tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Lex Crimen*, 6(4).
- Guo, Y., Wang, Z., & Wu, Q. (2019). The environmental impacts of large-scale mining: A quantitative assessment. *Environmental Pollution*, 246, 567-574.
- Gusman, M., Afaz, T., & Efendi, N. (2021). Mining Investment Feasibility based on Economic and Environmental Aspects. *Indian Journal of Economics and Business*, 20, 1073-1082. [10].
- Hamdani, D. M., Barlian, E., Dewata, I., Gusman, M., Putra, A., & Heldi, H. (2024). Ecological study of the influence of mining workers on mining area communities. In AIP Conference Proceedings. 3001(1). 080018
- Hardjasoemantri, K. (2005). Hukum Tata Lingkungan. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hasibuan, A. B. 2020. Teknik Keselamatan Kerja. Yayasan Kita Menulis, Hal. 98, ISBN: 9786236761601.
- Heriawan, M.N. and K. Koike, Capability of Ordinary Kriging for Estimating Coal Deposit: Some Problems Encountered and Practical Solutions, Proceedings of 2nd International Workshop on Earth Science and Technology, Fukuoka, Japan, pp.159-168 (2004).
- Heriawan, M Nur. K, Kolke., 2015, Spatial Characterization and Geological Modeling of Heterogeneous Resource Quality in Multilayer Coal Deposit, Research Group of Earth Resources Exploration, Faculty of mining and Petroleum Engineering Institiut teknologi Bandung, Bandung.

- Heriawan, M Nur., 2017, Short Course on Geostatistics “Drill Hole Spacing Analysis (DHSA) for Coal Resources Evaluation”, LAPA ITB, Bandung.
- Hermon, D., Barlian, E., Umar, I., & Efendi, N. (2023). Post-Coal Mining Reclamation Land Sustainability Study in Tebo Regency. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(11), 10330-10337. [4].
- Hidayattullah, S. 2019. “Rancangan Geometri Peledakan Untuk Mencapai Target Fragmentasi Ideal Berdasarkan Nilai Blastability Index Pada Tamka PT. Allied Indo Coal Jaya Kota Sawahlunto”. Universitas Negeri Padang: Padang.
- Hifzirridho, H., Isjudarto, A., & Prastowo, R. (2021). Technical Study of Reducing Ground Vibration Levels on Overburden Blasting Activities in East Pit PT. Bungo Bara Utama Jobsite Kuansing Inti Makmur, Bungo District, Jambi Province. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial and Technology and Information Design, ICITID 2021*, 30 August 2021, Yogyakarta, Indonesia. [15].
- Hogenboom, A. C., van Leerdam, J. A., & de Voogt, P. (2009). Measurement & Monitoring: 30th Quarterly Literature Update & Grant Survey. *Journal of Chromatography: A*, 1216(3), 510-519. [29].
- Hustrulid. 1999. *Blasting Principles For Open Pit Mining*. Colorado School Of Mines Golden. Colorado, USA.
- Iswandi, U., dan Dewata, I. (2017). Pendekatan Sistem Dalam Ilmu Sosial, Teknik dan Lingkungan. *Depok.: Raja Grafindo Persada*. Jakarta.
- Iswandi, U., dan Dewata, I. (2020). *Pengelolaan Sumber Daya Alam*. Deepublish.
- Iswandi, U., dan Dewata, I. (2023). *Pendekatan Sistem dalam Manajemen Sumber Daya Alam*. Deepublish
- Jafar Yasrebi , Mahboub Saffari , Hamed Fathi , Najafali Karimian , Masome Moazallahi and Reza Gazni , 2009. Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse

- Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters. *Research Journal of Biological Sciences*, 4: 93-102.
- Jafar Yasrebi , Mahboub Saffari , Hamed Fathi , Najafali Karimian , Masome Moazallahi and Reza Gazni , 2009. Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters. *Research Journal of Biological Sciences*, 4: 93-102.
- Jones, P., Nguyen, T., & Zhang, Y. (2020). Post-mining land sustainability: Challenges and strategies for ecological recovery. *Environmental Impact Assessment Review*, 85, 106492.
- Journel, A. G., & Huijbregts, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press. [32].
- Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 1827 K/30/MEM/2018 Pengelolaan lingkungan kerja.
- Kitanidis, P. K. 1997. *Introduction to Geostatistics. Applications in Hydrogeology*. xx + 249 pp. Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney.
- Kleijnen, J. P. C. (2017). *Kriging: Methods and Applications*. (CentER Discussion Paper; Vol. 2017-047). CentER, Center for Economic Research. [27].
- Lamamra, A., Neguritsa, D. L., & Mazari, M. (2019, November). Geostatistical modeling by the Ordinary Kriging in the estimation of mineral resources on the Kieselguhr mine, Algeria. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 362, No. 1, p. 012051). IOP Publishing. [31].
- Lee, S., & Rolfe, J. (2021). Ecological restoration in post-mining landscapes: Case studies from Indonesia. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64(4), 587-604

- Li, T., Martinez, J., & Yang, Z. (2019). Pollution and its economic implications in post-mining regions: Strategies for sustainability. *Economic Modelling*, 81, 389-401
- Li, Z., Zhang, X., Clarke, K. C., Liu, G., & Zhu, R. (2018). An automatic variogram modeling method with high reliability fitness and estimates. *Computers & Geosciences*, 120, 48-59. [23].
- Liu, R. Z., & Borthwick, A. G. L. (2011). Measurement and assessment of carrying capacity of the environment in Ningbo, China. *Journal of Environmental Management*, 92(8), 2047-2053.
- Lizarazo-Marriaga, J., Vargas, C. A., & Tiria, L. (2018). A new approach to predict local site effects related to blast-induced ground vibrations. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(5), 1843-1850. [28].
- Lubis, J. F., Toha, T., & Ngudiantoro, N. (2017). Analysis of the Blasting Effect on the Environment around Blasting Areas at PT. Semen Baturaja Persero, Tbk. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, 1(1), 15-18. [14].
- M Gusman (et al 2019 IOP Con). Estimations of limestone resources using three dimension block kriging method, a case study: limestone sediment at PT. Semen Padang
- Maria Farida Indrati S., dkk. 2020. *Ilmu Perundang-Undangan*, PT. Gramedia.
- Maryura, R., Toha, M. T., & Sudarmono, D. (2014). Kajian Pengurangan Tingkat Getaran Tanah (Ground Vibration Level) Pada Operasi Peledakan Interburden B2-C Tambang Batubara Air Laya Pt. Bukit Asam (Persero), Tbk Tanjung Enim. *Jurnal Ilmu Teknik Sriwijaya*, 2(1), 103329.
- Michaud, P. R., & Blanchet, J. Y. (2020). Establishing a quantitative relation between post blast fragmentation

- and mine productivity: a case study. In *Rock Fragmentation by Blasting* (pp. 389-396). CRC Press.
- Moelhim, K. 1990. Teknik Peledakan. Universitas Teknologi Bandung: Bandung.
- Mohsin, M., Zhu, Q., Naseem, S., Sarfraz, M., & Ivascu, L. (2021). Mining industry impact on environmental sustainability, economic growth, social interaction, and public health: An application of semi-quantitative mathematical approach. *Processes*, 9(6), 972. [11].
- Mousavifazl, H., Alizadh, A., & Ghahraman, B. (2013). Application of Geostatistical Methods for determining nitrate concentrations in Groundwater (case study of Mashhad plain, Iran). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(4), 318.
- Munawir. 2015. "Analisis Geometri Peledakan Terhadap Ukuran Fragmentasi Overburden Pada Tambang Batubara PT. Pamapersada Nusantara Jobsite Adaro Kalimantan Selatan". Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Industri Universitas Muslim Indonesia: Makassar.
- Mundaca, G. (2024). Economic valuation of environmental and health impacts from mining: the case of Peru. *Environment, Development and Sustainability*, 26(1), 2415-2441. [6].
- Munir, S. (2020). The role of mining in global ecological degradation: A critical review. *Global Environmental Change*, 62, 102070
- Nazki, A., Razak, A., Carlo, N., Barlian, E., Dewata, I., Putra, A., & Mukhtar, E. (2024). Biotechnology Utilization for Enhancement the Environmental Carrying Capacity of Former Ex-Coal Mining Land. *EnvironmentAsia*, 17(1), 83-94
- Nggeboe, F. (2017). Suatu Tinjauan Tentang Pidana Denda Dalam Hukum Pidana Positif Indonesia Dan Rancangan Kuhp. *Legalitas: Jurnal Hukum*, 2(1), 86-105.
- Nurhasan Syah, Yun Hendri Danhas, 2021. *Ekologi Industri*. Penerbit Deepublish Jogjakarta.

- Nwabuko, E. (2024). Multidimensional sustainability assessment in mining operations. *Sustainability Journal*, 18(5), 643-659
- Oliver MA., Webster R., Basic steps in geostatistics : the variogram and kriging, Cham, Switzerland : Springer.
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56-69. [26].
- Oliver, M. A., Muir, K. R., Webster, R., Parkes, S. E., Cameron, A. H., Stevens, M. C. G. and Mann, J. R. (1992) A Geostatistical Approach to the Analysis of Pattern in.
- Pal Roy, P. (2021). Emerging trends in drilling and blasting technology: Concerns and commitments. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(7), 652. [13].
- Prasodjo, E., Sitorus, S. R., Pertiwi, S., & Putri, E. I. K. (2015). Economic valuation of coal mining activity in Samarinda city, East Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 26347-26362. [7].
- Pujiyana, A. (2021). Optimasi kinerja alat bor dalam memenuhi target produksi 92 m3/jam batu andesit PT. Gunung Bumi Perkasa, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat (Bachelor's thesis, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta). [16].
- Putri, T. N. (2022). Analisis Keberlanjutan Rumah Gadang di Nagari Tuo Pariangan Kabupaten Tanah Datar Menggunakan MDS. (Tesis). UNP. Sekolah Pascasarjana.
- Rahman, S., Ying, Q., & Soubbotina, T. (2022). Regulatory enforcement in mining and its impact on sustainability: Insights from developing countries. *Resources Policy*, 75, 102530
- Rai, M. A. 2013. Mekanika Batuan. Institut Teknologi Bandung Press :Bandung.
- Rangga Bayu, P. (2020). *PENGARUH KEDALAMAN LUBANG LEDAK TERHADAP PRODUKTIFITAS ALAT GALI MUAT SHOVEL P&H 4100A DI PT. AMMAN MINERAL NUSA*

- TENGGARA* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Mataram).
- Rees, W. E. (1996). Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability. *Population and Environment*, 17(3), 195-215.
- Rinaldo. 2018, "Analisis Pengaruh Parameter Geomekanika Batuan Terhadap Kegiatan Peledakan Pada Front Penambangan Blok A2 di CV. Triarga Nusatama, Kecamatan Lareh Sago Halaban, Kabupaten Lima Puluh Kota, Sumatera Barat". *Teknik Pertambangan*. Fakultas Teknik .Universitas Negeri Padang: Padang
- Sidiq, R., Sofro, S., Jalil, A., & Achmad W, R. W. (2021). Virtual World Solidarity: How Social Solidarity is Built on the Crowdfunding Platform Kitabisa. com. *Webology*, 18(1).
- Simatupang, A. R. 2018. "Korelasi Nilai Rebound Schmidt Hammer Dengan Nilai Uniaxial Compressive Strength (UCS) Seam Batubara A2 dan C pada Pit 3 Timur Banko Barat, di PT. Bukit Asam, Tbk". *Prosiding XXVII dan Kongres X PERHAPI 2018*. DKI Jakarta: Universitas Trisakti.
- Siti Kotijah. 2020. *Hukum Perizinan*, Lingkar Media.
- Smith, J., Martinez, L., & Wilson, R. (2020). Strengthening corporate social responsibility for post-mining sustainability. *Business and Society*, 59(3), 517-535
- Sulistiyana Waterman B., Purnomo., Hendro, 2016., *Performance Evaluation of Ordinary Kriging and InverseDistance Weighting Methods for Nickel Laterite Resources Estimation*, Master of Mining Engineering, UPN "Veteran" Yogyakarta, 55283 SWK 104 Yogyakarta, Indonesia.
- Supriatna, S., Sukardi., dan Rustandi. 1995. *Peta Geologi Lembar Samarinda, Kalimantan*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Susanti. 2015. "Kajian Teknis Operasi Peledakan untuk Meningkatkan Nilai Perolehan Hasil Peledakan di

- Tambang Batubara Kab. Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur". Teknik Pertambangan UPN Veteran Yogyakarta: Yogyakarta.
- Svarstad, H., Petersen, L. K., Rothman, D., Siepel, H., & Wätzold, F. (2008). Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. *Land Use Policy*, 25(1), 116-125.
- Syah, N., Danhas, Y. H., & SP, M. S. (2021). *Ekologi Industri*. Deepublish.
- Tost, M., Hitch, M., Chandurkar, V., Moser, P., & Feiel, S. (2018). The state of environmental sustainability considerations in mining. *Journal of Cleaner Production*, 182, 969-977. [5].
- Turner, M., Yuan, H., & Jiang, L. (2020). Vibration impacts of mining activities and their effects on infrastructure stability. *Engineering Geology*, 274, 105698
- Vasconcelos, M. A., & Farias, T. L. (2011). Estimating the Impact of Blast Vibrations on Nearby Structures Using Geostatistical Modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(5), 789-797. [33].
- Wagianto, W., Syah, N., Dewata, I., Umar, I., & Putra, A. (2024). The population explosion: Indonesian's dilemma amid limited resources. *AIP Conference Proceedings*. 3001(1). 080013.
- Wu, M., Lu, Y., & Zhao, H. (2021). Mining waste management and its role in sustainable land development. *Land Degradation & Development*, 32(1), 144-159
- Younger, P. L. (2004). Environmental impacts of coal mining and associated wastes: A geochemical perspective. Geological Society, London, Special Publications, 236(1), 169-209. [12].
- Zhang, X., Zhao, Y., & Wu, H. (2021). Assessing the long-term ecological impacts of mining on local communities. *Science of The Total Environment*, 772, 144897

Zuhdi, M. 2019. Pengantar Geologi, Duta Pustaka Ilmu:
Mataram.

LAMPIRAN 1.

Hasil analisis Monte Carlo untuk indeks keberlanjutan multi dimensi dan masing-masing pada tingkat kepercayaan 95%

No.	Keberlanjutan /Indeks	MDS Hasil (%)	Monte Carlo Hasil (%)	Perbedaan (%)
1	Ekologi	54,09	53,68	0,41
2	Sosial	50,75	49,03	1,72
3	Ekonomi	69,15	59,04	10,11
4	Teknis	74,78	56,39	18,39
5	Kelembagaan	57,98	52,73	5,25

LAMPIRAN 2.

Hasil analisis nilai S-stres dan koefisien determinasi (R^2)

No.	Ukuran	S-stres Nilai	R nilai ²
1	Ekologi	0,1443	0,9375
2	Sosial	0,1477	0,9389
3	Ekonomi	0,1402	0,9266
4	Teknis	0,1669	0,8834
5	Kelembagaan	0,1661	0,9260

BIODATA PENULIS



Nur Efendi, S.T., M.Si., lahir di Pekanbaru, 17 Juli 1974. Menempuh Pendidikan SD Negeri 31 Pekanbaru, SMP Negeri 18 Pekanbaru, dan STM Negeri Pekanbaru, Meraih gelar Sarjana Teknik Pertambangan (S.T) di Universitas Islam Bandung (UNISBA). Kemudian meraih Gelar Magister Ilmu Lingkungan (M.Si) di Universitas Negeri Padang (UNP) lulusan terbaik dengan IPK 4.00 tahun 2022, melanjutkan Program Doktor Ilmu Lingkungan di Universitas Negeri

Padang (UNP) tingkat akhir. Keahlian Penulis di bidang Pertambangan Memperoleh Pengawas Operasional Utama (POU) Tahun 2008 dan salah satu Pendiri Forum Kepala Teknik Tambang di Kalimantan Timur Tahun 2010. Aktif membuat laporan: Eksplorasi, Studi Kelayakan, AMDAL/ UKL UPL, Rencana Reklamasi, Rencana Penutupan Tambang, CSR/ RIPPM, Rencana Kerja Anggaran Biaya (RKAB), dan Izin Pinjam Pakai Kawasan Hutan (IPPKH). Saat ini bergabung memiliki Perseroan Terbatas Pertambangan Batubara, semoga tercipta lapangan kerja untuk orang banyak. email: rioefendi.cdi2016@gmail.com



Prof. Dr. Eri Barlian, MS., lahir di Padang, 24 Juli 1961. Menempuh Pendidikan SD Negeri 14 Padang, SMP Negeri 1 Padang, dan SPMA Negeri Padang, Meraih gelar Sarjana Pembina (Drs) dari Institut Keguruan dan Ilmu Kependidikan (IKIP) Padang tahun 1986. Kemudian meraih gelar Magister Ilmu Lingkungan (MS) dari Universitas Indonesia (UI) pada tahun 1991, dan meraih gelar Doktor Pendidikan Kependudukan dan

Lingkungan Hidup (Dr) dari Universitas Negeri Jakarta (UNJ) pada tahun 1999. Sejak tahun 2008 dikukuhkan jadi Guru Besar Olahraga dan Lingkungan Pascasarjana Universitas Negeri Padang Tahun 2016 menjadi Kaprodi Doktor Ilmu Lingkungan. Tahun 2021-2023 menjadi Kaprodi Ilmu Lingkungan Magister dan Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Negeri Padang. Penulis bertugas sebagai Dosen PNS pada Fakultas Ilmu Keolahragaan (FIK) dan Program Magister - Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Padang (UNP). Penulis juga aktif dalam melakukan penelitian dan menulis beberapa karya ilmiah baik

dalam bentuk jurnal, prosiding dan buku terkait olahraga dan lingkungan hidup. Penulis dapat dihubungi pada alamat email: e.barlian@fik.unp.ac.id.



Prof. Dr. Nurhasan Syah, M.Pd., lahir di Bukittinggi, 5 November 1960. Meraih gelar Sarjana Pendidikan Teknik Bangunan (Drs) dari Institut Keguruan dan Ilmu Kependidikan (IKIP) Padang tahun 1985. Meraih Gelar Magister Pendidikan Teknologi dan Kejuruan (M.Pd) dari Institut Keguruan dan Ilmu Kependidikan (IKIP) Yogyakarta tahun 1992, Meraih Gelar Doktor Pendidikan Kependudukan dan Lingkungan Hidup (Dr) dari Universitas Negeri Jakarta (UNJ) tahun 1997. Wakil Dekan 1 Fakultas Teknik UNP (1999-2002), Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Hidup UNP (2000-2001). Sebagai akademisi dan praktisi di bidang lingkungan hidup, berkecimpung di birokrat sebagai Kepala Dinas Pendidikan Kabupaten Agam, Sumatera Barat (2002-2007). Sebagai *cluster coordinator* Sistem Penjamin Mutu Pendidikan BKPSDMP Kemendikbud RI (2009-2013). Sebagai Dosen PNS pada Fakultas Teknik (FT) dan Program Magister - Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Padang (UNP). Aktif dalam melakukan penelitian dan menulis beberapa karya ilmiah baik dalam bentuk jurnal, prosiding dan buku terkait ekologi industri dan green building. Penulis dapat dihubungi pada alamat email: nurhasan_s@yahoo.com.



Prof. Dr. Indang Dewata, M.Si. lahir di Candung Agam, 18 November 1965. Meraih gelar Sarjana Kimia (Drs) dari Universitas Andalas (UNAND) tahun 1989. Meraih gelar Magister Ilmu Lingkungan (M.Si) dari Universitas Indonesia (UI) tahun 1995, dan meraih gelar Doktor Ilmu Lingkungan (Dr) dari Universitas Indonesia (UI) tahun 2009. Penulis bertugas sebagai Dosen PNS pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) dan Program Magister - Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Padang (UNP). Sebagai akademisi dan praktisi di bidang lingkungan serta seorang birokrat. Dua periode sebagai Kepala Dinas Lingkungan Hidup dan Kepala Dinas Pendidikan di Kota Padang. Dipercayai sebagai Ketua oleh Pusat Studi Lingkungan Hidup Perguruan Tinggi Se-Indonesia (BKPSL Indonesia). Aktif di Dewan Riset Daerah (DRD) Provinsi Sumatera Barat membidangi Pembangunan dan Lingkungan Hidup, sebagai Peneliti di BKKBN Sumbar dan BKKBN Pusat. TIM Teknis AMDAL serta TIM KLHS serta Tim Panitia Seleksi (Pansel) pejabat daerah di Kabupaten/ Kota di

Sumbar. Tercata sebagai anggota IESA (Indonesian Environmental Scientist Association). Penulis juga aktif dalam melakukan penelitian dan menulis beberapa karya ilmiah baik dalam bentuk jurnal, prosiding dan buku terkait kimia lingkungan dan pengelolaan sumberdaya alam. Penulis dapat dihubungi pada alamat email: indangdewata@fmipa.unp.ac.id.



Dr. Ir. Mulya Gusman, S.T., M.T., Lahir di Padang, 8 Agustus 1974. Meraih gelar Sarjana Teknik Pertambangan (S.T) dari Universitas Islam Bandung (UNISBA) tahun 1999. Meraih Gelar Magister Teknik Rekayasa Pertambangan dari Institut Teknologi Bandung (ITB) tahun 2009. Meraih Gelar Doktor (Dr) Ilmu Lingkungan dari Universitas Negeri Padang (UNP) tahun 2020. Penulis bertugas sebagai Dosen Fakultas

Teknik Pertambangan (S1) dan Magister Ilmu Lingkungan (S2) Universitas Negeri Padang, Sebagai Kepala Pusat Pengembangan Sertifikasi Kompetensi dan Profesi (2021-2025), Sebagai Ketua I (Ikatan Asosiasi Asesor Profesional Indonesia Sumatera Barat (IASPRO) (2022-2025), Pembina ITUES (International Tunneling Underground Engineer Indonesia) Pusat (2021-sekarang), Sebagai Kepala Pusat Riset Geosaince Universitas Negeri Padang (2022-sekarang), Penulis juga aktif dalam melakukan penelitian dan menulis beberapa karya ilmiah baik dalam bentuk jurnal, prosiding dan buku terkait pertambangan dan lingkungan. Penulis dapat dihubungi pada alamat email: mgusman1974@gmail.com



Dr. Iswandi U, S.Pd., M.Si., Lahir di Padang, 18 April 1977. Meraih Gelar Sarjana Pendidikan Geografi (S.Pd) tahun 2001 dari Universitas Negeri Padang (UNP), Meraih Gelar Magister Ilmu Lingkungan (M.Si) tahun 2009 dari Universitas Negeri Padang (UNP), Meraih Gelar Doktor Ilmu Lingkungan (Dr) dari Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2009, Penulis bertugas sebagai Dosen Jurusan Geografi

dan Program Magister – Doktor Ilmu Lingkungan di Universitas Negeri Padang (UNP). Merupakan staf pengajar pada Yayasan Prayoga Padang. (2009-sekarang). Selain itu, penulis aktif dalam workshop tentang arahan kebijakan dengan pendekatan AHP, ISM, SWOT, MDS, dan Sistem Dinamik. Penulis juga

aktif dalam melakukan penelitian dan menulis beberapa karya ilmiah baik dalam bentuk jurnal, prosiding dan buku terkait pertambangan dan lingkungan. Penulis dapat dihubungi pada alamat email: iswandi_u@yahoo.com



Dr. Aprizon Putra, S.Pd., M.Si. Aprizon Putra, lahir di Padang, 18 April 1985. Meraih gelar Sarjana Pendidikan (S.Pd) dari Universitas Negeri Padang (UNP) pada tahun 2012. Kemudian meraih gelar Magister Ilmu Lingkungan (M.Si) dari Universitas Andalas (UNAND) pada tahun 2017, dan meraih gelar Doktor Ilmu Lingkungan (Dr) dari Universitas Negeri Padang (UNP). Penulis bertugas sebagai Peneliti Ahli Muda di

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Penulis aktif dalam menulis beberapa karya ilmiah baik dalam bentuk jurnal, prosiding dan buku terkait pengelolaan lingkungan, dan sumberdaya alam. Penulis dapat dihubungi pada alamat email: aprizonputra@gmail.com