

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Vale Indonesia Tbk sebelumnya dikenal sebagai PT INCO Tbk. Perusahaan ini beroperasi di Sorowako, Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan, dan telah aktif sejak tahun 1968. PT Vale merupakan produsen nikel terkemuka di Indonesia, berkontribusi sebanyak 5% dari pasokan nikel global. Perusahaan ini memiliki empat wilayah binaan, yaitu Kecamatan Nuha, Kecamatan Towuti, Kecamatan Wasuponda, dan Malili. PT. Vale Indonesia Tbk. Tidak hanya melakukan eksploitasi terhadap sumber daya nikel yang terdapat di wilayah Sorowako dan sekitarnya, PT. Vale Indonesia juga bergerak aktif dalam proses pengolahan nikel serta produk produk terkait sehingga dapat dikatakan bahwa PT. Vale Indonesia bergerak dalam program hilirisasi nasional khususnya di bidang mineral. Proses pengambilan dan pemanfaatan nikel berlangsung mulai dari tahap eksplorasi, penambangan, pengolahan serta rehabilitasi lahan. Perusahaan ini adalah anak usaha dari Vale S.A., sebuah perusahaan pertambangan multinasional yang berbasis di Brasil dan merupakan salah satu produsen nikel terbesar di dunia (PT. Vale Indonesia Tbk., 2024).

Operasi PT Vale Indonesia melibatkan beberapa tahapan, termasuk penambangan bijih nikel, pengolahan menjadi produk nikel matte, dan pengangkutan ke pelabuhan untuk diekspor ke berbagai negara, terutama Jepang. Nikel matte yang dihasilkan merupakan bahan baku yang penting untuk berbagai industri, seperti baja nirkarat (*stainless steel*) dan baterai kendaraan listrik, sehingga produk PT Vale Indonesia berkontribusi secara signifikan dalam rantai pasokan global nikel. Sebagai perusahaan yang berkomitmen terhadap keberlanjutan, PT Vale Indonesia juga sangat memperhatikan aspek lingkungan, sosial, dan tata kelola perusahaan (ESG). Dalam operasinya, perusahaan ini berusaha untuk meminimalkan dampak lingkungan dengan menerapkan teknologi dan praktik penambangan yang ramah lingkungan, serta berupaya merehabilitasi lahan pascatambang. Selain itu, PT Vale Indonesia aktif dalam program-program pemberdayaan masyarakat lokal, menyediakan lapangan kerja, dan berkontribusi terhadap pembangunan infrastruktur di daerah operasi. Komitmen perusahaan terhadap praktik berkelanjutan ini sesuai dengan kebijakan induk perusahaannya,

Vale S.A., yang juga berfokus pada keberlanjutan dan inovasi dalam industri tambang global (Cumming & Hail, 2022).

Nikel laterit merupakan material yang berasal dari *regolith* (lapisan yang merupakan hasil pelapukan batuan yang menyelimuti suatu batuan dasar) yang berasal dari batuan beku ultrabasa yang mengandung unsur Ni dan Co. *Regolith* biasanya terbentuk melalui proses pelapukan fisik dan kimia yang intensif pada daerah dengan iklim tropis-subtropis. Proses pembentukan endapan nikel laterit dimulai dari pengendapan batuan induknya yaitu Peridotit yang memiliki komposisi berat nikel berkisar antara 0,2% - 0,4%. Metode pengambilan material yang diterapkan di PT. Vale Indonesia dilakukan melalui berbagai cara seperti proses pengupasan lahan menggunakan alat berat serta tak terkecuali melakukan kegiatan peledakan untuk mengambil material batuan dasar sebagai bahan pengerasan jalan wilayah tambang PT. Vale Indonesia. (Kyle, 2010)

Bedrock yang diperoleh dari komoditas tambang nikel laterit juga disebut sebagai batuan dasar yang dimanfaatkan keberadaannya sebagai material penguatan atau pengerasan bersama dengan campuran material *slag* dan *reject* ukuran fragmentasi tertentu yang akan digunakan dalam pembuatan *dyke* (Tanggul penahan disposal), disposal serta jalan tambang. Pembongkaran *bedrock* dilakukan dengan cara pengeboran dan peledakan (McRae, 2019).

Peledakan merupakan tahap yang tidak dapat dipisahkan dalam kegiatan penambangan, hal tersebut dikarenakan bahwa ketidakmampuan alat berat untuk memecah batuan secara manual sehingga dibutuhkan bantuan bahan peledak agar material tersebut dapat terberai lalu dapat dengan mudah diangkut menggunakan alat berat lainnya. Pelaksanaan kegiatan peledakan ini tidak terlepas dari berbagai prosedur yang diatur oleh standar tertentu seperti yang tercatat pada aturan SNI 7571:2023. Pada aturan tersebut dapat ditemukan bahwa peledakan memiliki standar getaran tanah atau *peak particle velocity* (PPV) yang tidak boleh berlebih sesuai dengan kondisi lingkungannya masing-masing. Maka dari itu getaran tanah merupakan parameter yang relevan dan perlu untuk dievaluasi lebih lanjut ketika melaksanakan peledakan. (Mayangsari, 2016).

Pada prinsipnya rencana peledakan yang kurang tepat akan menghasilkan getaran tanah yang melebihi ambang batas aman yang telah ditentukan, getaran tanah hasil peledakan dapat dikontrol dengan rancangan peledakan yang baik. Standar yang digunakan untuk pengukuran *ground vibration* mengacu pada SNI

7571:2023 yang mengklasifikasikan bahwa untuk kawasan penambangan pada pengukuran jarak 300 meter dan 500 meter tidak boleh lebih dari 5 mm/s. Oleh karena itu penulis mengangkat judul “Analisis *Peak particle velocity* Pada Proses Peledakan *Quarry* PT. Vale Indonesia Tbk. Sorowako Kabupaten Luwu Timur Provinsi Sulawesi Selatan”

1.2 Rumusan Masalah

Kegiatan penambangan khususnya pada pengambilan material batuan dasarhendaknya menimbulkan efek getaran tanah yang seminimal mungkin, maka dari itu penelitian ini disusun berdasarkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana variasi nilai *Powder factor* terhadap peledakan yang dilakukan pada quarryPT. Vale Indonesia Tbk.?
2. Bagaimana distribusi nilai *ground vibration* di sekitar area peledakan quarryPT. Vale Indonesia Tbk. Sorowako Kabupaten Luwu Timur Provinsi Sulawesi Selatan?
3. Bagaimana sebaran nilai fragmentasi terhadap peledakan yang dilakukan oleh PT. Vale Indonesia Tbk. sesuai dengan *ground vibration* yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung *Powder factor* terhadap peledakan yang dilakukan pada area batuan dasarPT. Vale Indonesia.
2. Menganalisis distribusi nilai *ground vibration* di sekitar area peledakan batuan dasarPT. Vale Indonesia Tbk. Sorowako Kabupaten Luwu Timur Provinsi Sulawesi Selatan.
3. Menganalisis nilai fragmentasi peledakan di PT. Vale Indonesia Tbk. dan kesesuaian *ground vibration* yang dihasilkan dengan ketentuan pada SNI 7571:2023.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam pengelolaan lingkungan dan keselamatan masyarakat sekitar area tambang. Dengan menganalisis *peak particle velocity* (PPV) secara prediksi dan aktual, penelitian ini dapat membantu memahami tingkat getaran yang dihasilkan oleh proses peledakan.

Selain itu, penelitian ini juga memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi operasional perusahaan tambang, khususnya PT. Vale Indonesia Tbk. Dengan mengevaluasi estimasi *ground vibration* prediksi berdasarkan prinsip-prinsip teori *scaled distance* dan membandingkannya dengan standar *ground vibration* yang ada, penelitian ini dapat membantu perusahaan dalam mengoptimalkan proses peledakan. Informasi yang diperoleh dari penelitian ini dapat membantu perusahaan untuk mengidentifikasi area-area yang berpotensi menghasilkan getaran tinggi dan merancang strategi peledakan yang lebih tepat dan efisien. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan manfaat bagi lingkungan dan masyarakat sekitar, tetapi juga bagi keberlanjutan operasional dan kinerja perusahaan tambang secara keseluruhan.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan

Penelitian ini dilakukan pada wilayah PT. Vale Indonesia di blok Sorowako dan Petea selama dua bulan lamanya. Adapun kegiatan yang dilakukan adalah peledakan pada bagian quarry yang meruakan lapisan paling bawah dari struktur lapisan di wilayah PT. Vale Indonesia Tbk. Peledakan tersebut akan menghasilkan getaran yang akan dianalisis nilainya baik secara prediksi maupun aktual untuk membandingkannya dengan kesesuaian aturan ambang batas getaran yang dijalankan oleh pemerintah dan perusahaan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

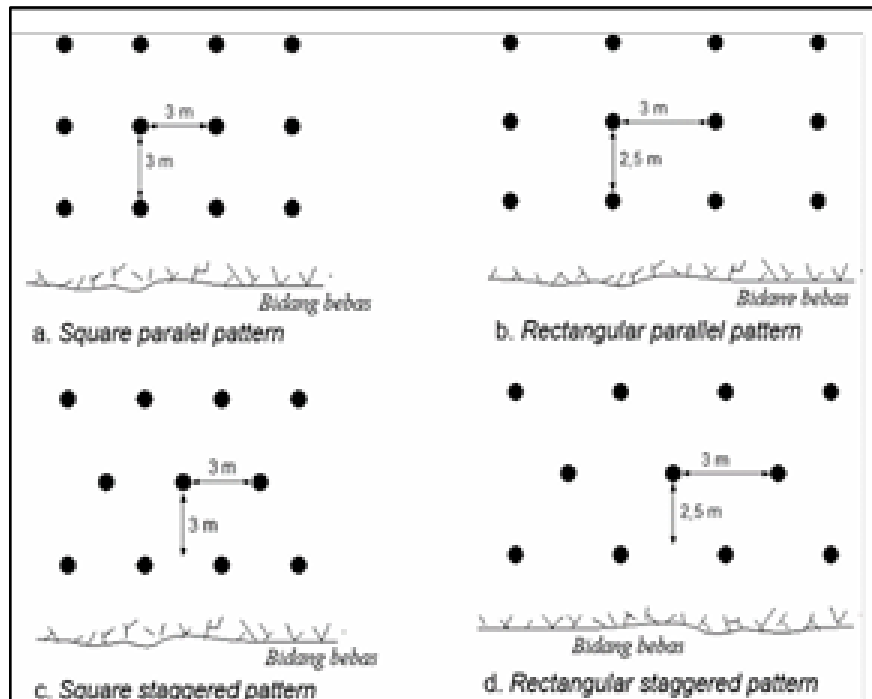
2.1 Teknik Pengeboran

Pengeboran merupakan kegiatan yang krusial untuk dilakukan dengan tujuan pembuatan lubang untuk diisi bahan peledak pada proses kegiatan pengeboran dan peledakan. Kegiatan sebelum dilakukannya peledakan adalah dengan melakukan pengeboran untuk lubang tembak terlebih dahulu. Lubang tembak adalah lubang yang dibuat untuk diisi bahan peledak dan selanjutnya diledakkan dalam kegiatan peledakan. Pembuatan lubang tembak dilakukan pada lapisan tanah atau batuan yang akan diledakkan dengan dilakukannya pengeboran (Azizi, dkk., 2019).

Dalam pemilihan alat bor untuk tambang terbuka yang memakai metode peledakan jenjang faktor ukuran dan kedalaman lubang ledak, jenis batuan dan kondisi lingkungan serta harus selalu diperhatikan. Terdapat tiga pola pengeboran yang ada pada area tambang terbuka, yaitu:

- a. Pola bujur sangkar (*Square pattern*), yaitu pola peledakan dengan jarak *burden* dan spasinya yang sama.
- b. Pola persegi pasang (*Rectangular system*), yaitu pola peledakan dengan jarak dan spasi dalam satu baris lebih besar dibandingkan dengan *burdennya*.
- c. Pola zig-zag (*Staggered pattern*), yaitu pola peledakan yang dimana antara lubang bornya dibuat zig-zag yang berasal dari pola bujur sangkar maupun persegi panjang. Pengeboran pada tambang dengan komoditas tertentu khususnya pada *overburden* biasanya menggunakan pola ini. Penyebaran atau distribusi energi akan lebih maksimal dan merata jika menggunakan pola peledakan zig-zag ini.

Proses pengeboran dilakukan dengan menggunakan alat yang bernama *rotary drill*, Gerakan *rotary* pada ujung bor dihasilkan dari hidrolik atau motor Listrik. Ujung bor atau sering disebut sebagai *drill bit* atau mata bor, didorong melalui mekanisme putar untuk mendapatkan tenaga yang diperlukan. Bor yang digunakan pada sistem pengeboran *rotary blasthole* ini cukup besar dan berat, yang dibutuhkan untuk menghasilkan tenaga dan torsi yang besar pula pada mata bor melalui rangkaian bor. Contoh pola peledakan dapat diperhatikan pada Gambar 2.1 berikut (Rosario, dkk., 2015).



Gambar 2. 1 Geometri Peledakan (Salmani, 2020)

2.2 Teknik Peledakan

Peledakan merupakan proses yang menghasilkan adanya gelombang kejut dan proses tekanan gas dari bahan peledak untuk menghancurkan batuan (Fitriansyah, 2016).

2.2.1 Peralatan Peledakan

Peralatan peledakan adalah segala alat-alat dan bahan yang akan digunakan lebih dari satu kali pada saat proses kegiatan peledakan. Alat-alat tersebut dapat diuraikan sebagai berikut, yaitu:

a. Base Station

Base station merupakan alat yang digunakan untuk melakukan proses arming dan firing pada peledakan. Digunakan oleh seorang *blaster* dan proses penembakan peledakan.

b. Bench Box

Bench box adalah alat perantara antara *base station* dan detonator pada lubang tembak. *Bench box* menerima sinyal *arming* and *firing* dari *base station* dan diteruskan ke rangkaian peledakan. *Delay* pada *bench box* dapat juga diatur untuk pengiriman sinyal ke rangkaian peledakan. Jarak maksimal antara *base station* dan *bench box* mencapai 3,5 kilometer.

c. Harness wire

Harness wire adalah kawat yang digunakan sebagai penghubung dari bench box ke rangkaian peledakan. Pada proses peledakan, pengiriman sinyal atau inisiasi dapat menggunakan *harness wire* atau dapat juga mengirimkan sinyal langsung ke detonator elektronik.

d. Alat Pengaman Peledakan

Alat pengaman peledakan yang umumnya digunakan dalam kegiatan peledakan adalah:

-*Handy Talky* (HT).

-Bendera merah, bendera batas jarak aman manusia (500 meter) dan alat (350 meter). Biasanya disesuaikan dengan standar operasi yang ada pada tiap Perusahaan.

-*Safety line*, tali pembatas lokasi peledakan.

-*Road blocker flag and map*, digunakan sebagai tanda pemblokiran akses jalan menuju lokasi peledakan.

-Rambu tanda lokasi dan selembaran catatan *sign in* dan *sign out* (SISO) pada lokasi peledakan sebagai penanda lokasi peledakan dan absensi pekerja yang masuk dan bekerja di lokasi peledakan.

2.2.2 Peralatan Pendukung Peledakan

Peralatan pendukung peledakan adalah segenap peralatan yang membantu, memudahkan serta melancarkan kegiatan peledakan yang akan dijalankan. Peralatan pendukung peledakan pada umumnya dapat diuraikan sebagai alat-alat berikut ini, antara lain:

a. *Mobile manufacturing unit* (MMU)

Merupakan alat yang digunakan untuk mencampur dan membawa bahan peledak yang akan digunakan. Campuran bahan peledak yang biasa disebut sebagai emulsi. Emulsi merupakan fase cairan yang di dalamnya mengandung tetesan mikroskopik nitrat dan garam (*Chiefly AN*) tersebar dalam *fuel oil*, wax, atau paraffin yang menggunakan emulsi agen (Aimone, 1992). Dengan komposisi campuran antara gel dan ANFO tertentu. Proses pengangkutan dari gudang handak menuju lokasi peledakan menggunakan MMU ini.

b. Mobil Box

Mobil box yang digunakan biasanya membawa aksesoris peledakan seperti *booster*, *delay* (*Inhole and surface*), detonator dan lainnya.

2.2.3 Perlengkapan Peledakan

a. Detonator

Detonator adalah alat pemicu awal yang menimbulkan inisiasi dalam bentuk letupan (Ledakan kecil) sebagai bentuk aksi yang memberikan efek kejut terhadap bahan peledak peka detonator (Cahyadi, 2019).

Detonator yang biasa digunakan dibagi menjadi dua, yaitu *nonel* dan *electronic detonator*. Detonator *nonel* dapat juga disebut detonator biasa karena lebih cenderung diinisiasi dengan sumbu api dibandingkan dengan listrik. *Nonel* di design dengan menggunakan detonator biasa yang dipasang dengan *Signal tube* sebagai penghantar energi untuk meledak. *Signal tube* ini berisi bahan peledak kuat yang komposisinya sudah disesuaikan, maka masing-masing dari jenis *Signal tube* ini memiliki kecepatan *delay* tertentu yang berbeda-beda. Gelombang kejut yang merambat pada *nonel* ini dapat mencapai 200 m/s. Detonator elektronik memiliki sumber energi yang berbeda dengan *nonel* detonator. Elektronik menggunakan detonator dan kabel listrik. Detonator elektrik mempunyai keakursian *delay* yang tinggi karena proses inisiasinya menggunakan sinyal yang berasal dari permukaan. Dengan ini detonator elektronik merupakan detonator dengan sistem keamanan tertinggi dibanding dengan detonator lainnya.

b. Bahan Peledak

Bahan peledak yang digunakan untuk mengisi lubang tembak yaitu ANFO. Namun, saat ini sudah banyak yang menggunakan emulsi yaitu campuran antara ANFO dan *emulsion gel*.

d. Booster

Booster adalah bahan peledak berdaya ledak tinggi yang digunakan pada proses peledakan. *Booster* merupakan pencampuran proses pelelehan Trinitrotoluena (TNT) dengan Pentaerythritol Tetranitrate (PETN) yang bekerja sebagai pemicu peledakan untuk meledakkan ANFO pada lubang tembak.

e. Primer

Primer adalah istilah yang digunakan pada bahan peledak peka detonator, yaitu bahan peledak yang berbentuk tabung yang sudah dipasang detonator.

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 runtuh material yang diharapkan. Berdasarkan arah runtuh batuan, pola peledakan diklasifikasikan sebagai berikut:

- *Corner cut* (eschelon), yaitu pola peledakan yang arah runtuh batuan ke salah satu sudut dari bidang bebasnya.
- *V cut*, yaitu pola peledakan yang arah runtuh batuan ke depan dan membentuk huruf V.
- *Box cut*, yaitu pola peledakan yang arah runtuh batuan ke depan dan membentuk kotak. Yang menghasilkan tumbukan batuan pada tengah bagian.

Berdasarkan urutan waktu peledakan, pola peledakan diklasifikasikan sebagai berikut:

- Pola peledak serentak, yaitu suatu pola yang waktu ledaknya serentak untuk semua lubang ledak.
- Pola peledakan beruntun, yaitu suatu pola yang menerapkan peledakan dengan waktu tunda antara baris yang satu dengan baris lainnya, atau dapat juga antara lubang yang berbeda waktu tundanya..

2.3 Geometri Peledakan

Geometri peledakan adalah jarak lubang tembak yang dibuat pada suatu area yang akan dilakukannya peledakan. Geometri peledakan tentunya sangat berpengaruh pada hasil peledakan. Jika geometri peledakannya baik dan sesuai tentu akan menghasilkan fragmentasi batuan yang baik juga. Dampak dari geometri peledakan yang baik seperti tidak adanya bongkahan batuan, kondisi jenjang yang stabil, keamanan alat-alat dan juga keselamatan pekerja yang terjamin (Ash, 1967).

a. *Burden*

Burden merupakan jarak tegak lurus terpendek antara lubang tembak yang diisi bahan peledak dengan bidang bebas atau ke arah mana batuan peledakan akan terlempar. Dalam menentukan *burden* harus memperhatikan jarak terdekat ke *fareeface* dan arah dari hasil ledakannya, selain itu perlu diperhatikan pula besarnya *burden* karena besarnya *burden* dipengaruhi oleh beberapa hal seperti karakteristik batuan yang akan diledakkan dan karakteristik material. Jarak *burden* sangat berkaitan dengan diameter lubang bor yang digunakan. Menurut R.L. Ash, harga *burden* tergantung pada harga *burden ratio* dan diameter lubang bor. Besarnya *burden ratio* antara 20-40

dengan harga KB standar adalah 30. Harga KB standar sebesar 30 terjadi pada kondisi sebagai berikut:

- Densitas batuan= 160 lb/cuft
- *Specific gravity* bahan peledak= 1,20
- Kecepatan detonasi bahan peledak= 12.000 fps

Jika Kb tidak dalam nilai standar, maka dapat dikoreksi dengan cara:

$$K_b = K_{b \text{ std}} \times A_{f1} \times A_{f2}$$

- Koreksi bahan peledak standar (A_{f1})

$$A_{f1} = \sqrt[3]{\frac{SG \text{ handak} \times (VOD^2)}{1,2 \times 12000^2}}$$

- Koreksi batuan standar (A_{f2})

$$A_{f2} = \sqrt[3]{\frac{\text{Densitas Batuan std (160 lb/cuft)}}{\text{Densitas batuan yang akan diledakkan}}}$$

Keterangan:

- K_b = *Burden ratio* yang dikoreksi
- $K_{b \text{ std}}$ = *Burden ratio* standar
- A_{f1} = Faktor koreksi b atuan
- A_{f2} = Faktor koreksi bahan peledak
- D_{std} = Kerapatan batuan standar
- D = Kerapatan batuan yang akan diledakkan
- SG_{std} = *Spesific gravity* bahan peledak standar
- SG = *Spesific gravity* bahan peledak yang dipakai

Jika K_b sudah diketahui maka dapat dimasukkan ke dalam rumus di bawah ini:

$$B = K_b \times D_e \div 12$$

Keterangan:

- K_b = *Burden ratio* yang dikoreksi
- D_e = Diameter lubang

b. Diameter Lubang (D_e)

Lubang ledak harus memiliki diameter yang seimbang dan tidak boleh terlalu besar ataupun kecil. Jika lubang ledak kecil, maka tekanan yang dihasilkan akan kurang dan akan mempengaruhi hasil dari peledakan, sehingga peledakan tidak berjalan dengan sempurna.

c. Spasi (S)

Spasi adalah jarak terdekat antara dua lubang tembak yang berdekatan dengan satu baris (*Row*). Jika jarak spasi terlalu besar maka akan menyebabkan bongkahan batuan pada hasil peledakan, tetapi jika spasi terlalu rapat batuan akan hancur menjadi halus. Penentuan spasi menggunakan rumus R.L. Ash, yaitu:

$$S = K_s \times B$$

Keterangan:

- K_s = *Spacing ratio* (1,00-2,00)

- S = Spasi (Meter)

- B = *Burden* (Meter)

d. *Stemming* (T)

Stemming adalah tempat material penutup di dalam lubang bor, yang letaknya di atas kolom isian bahan peledak. Fungsi *stemming* adalah supaya terjadi keseimbangan tekanan dalam lubang tembak dan mengurung gas-gas hasil ledakan sehingga dapat menekan batuan dengan energi yang maksimal. *Stemming* yang cukup dalam atau Panjang dapat menyebabkan timbulnya bongkahan yang keras karena daya ledak yang dihasilkan tidak kuat untuk menghancurkan batuan. Sementara itu, *stemming* yang pendek dapat menyebabkan pecahan batuan yang kecil dan timbulnya *fly rock*. Untuk penentuan tinggi *stemming* digunakan rumus R.L.S. Ash seperti berikut, yaitu:

$$T = K_t \times B$$

Keterangan:

- K_t = *Stemming ratio* (0,75-1,00)

- T = *Stemming* (Meter)

- B = *Burden* (Meter)

e. Kedalaman Lubang Tembak (H)

Kedalaman lubang ledak merupakan jumlah total antara tinggi jenjang dengan besarnya sub-*drilling*. Kedalaman lubang disesuaikan dengan kapasitas produksi dan perhitungan geoteknik. Untuk penentuan kedalaman lubang digunakan rumus R.L. Ash seperti berikut, yaitu:

$$H = K_h \times B$$

Keterangan:

- K_h = *Hole depth ratio* (1,5-4,0)

- H = Kedalaman lubang tembak (Meter)

-B= *Burden* (Meter)

f. *Subdrilling* (J)

Subdrilling merupakan bagian dari Panjang lubang tembak yang terletak lebih rendah dari lantai jenjang. *Subdrilling* diperlukan agar batuan dapat meledak secara keseluruhan dan terbongkar tepat pada batas lantai jenjang, sehingga tonjolan-tonjolan pada lantai jenjang dapat dihindari. Untuk penentuan *subdrilling* digunakan rumus R.L. Ash yang dinyatakan sebagai:

$$J = K_j \times B$$

Keterangan:

-K_j: *Subdrilling ratio* (0,2-0,3)

-J: *Subdrilling* (Meter)

-B: *Burden* (Meter)

g. Panjang Kolom Isian (PC)

Panjang kolom isian adalah panjang kolom lubang tembak yang akan diisi dengan bahan peledak. Panjang kolom ini merupakan kedalaman lubang tembak dikurangi panjang *stemming* yang digunakan. Dapat ditentukan dengan rumus R.L. Ash sebagai berikut, yaitu:

$$PC = H - T$$

Keterangan:

-PC: Panjang kolom isian (Meter)

-H: Kedalaman lubang tembak (Meter)

-T: *Stemming* (Meter)

h. Tinggi Jenjang (L)

Tinggi jenjang maksimum ditentukan oleh peralatan lubang bor dan alat muat yang tersedia. Tinggi jenjang berpengaruh terhadap hasil peledakan seperti fragmentasi batuan, *air blast*, *fly rock* dan *ground vibration*. Berdasarkan perbandingan ketinggian jenjang dan jarak *burden* yang diterapkan (*Stiffness Ratio*), maka akan diketahui hasil dari peledakan tersebut dengan rumus. Geometri peledakan dapat diperhatikan pada Gambar 2.2:

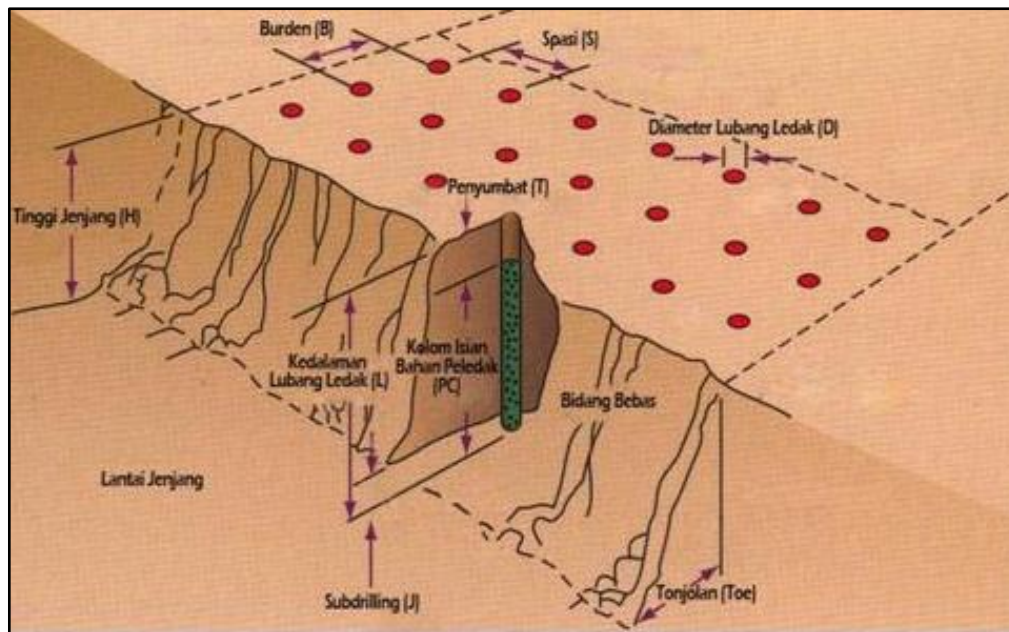
$$L = H - J$$

Keterangan:

L: Tinggi jenjang minimum

H: Kedalaman lubang

J: *Sub-drilling*



Gambar 2. 2 Geometri peledakan (W.A. Hustrulid, 2013)

2.4 Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan yaitu berupa bobot isi, porositas dan kandungan air. Selain itu nilai *Uniaxial Compressive Strenght* (UCS) dibutuhkan dalam hal penentuan kekerasan batuan. UCS merupakan nilai yang paling banyak digunakan dalam hal pengukuran kekuatan batuan, deformasi dan karakteristik batuan karena keakurasiannya. UCS lebih membutuhkan biaya, waktu dan peralatan yang digunakan harus sesuai dengan standar yang berlaku, tetapi hasil yang didapat lebih dapat dipercaya daripada pengukuran dengan metode lain, dan dibutuhkan untuk membuat desain yang lebih detail. *Density* atau massa jenis batuan juga merupakan hal yang perlu dipertimbangkan, semakin besar *density* batuan tersebut maka tentu akan semakin keras juga batuan tersebut untuk dapat diledakkan. Hal ini masuk ke dalam faktor *blastibility* indeks yang menjadi salah satu faktor dalam fragmentasi batuan. Pada data *blastibility* indeks terdapat parameter-parameter seperti *Rock Mass Description* (RMD), *Joint Plane Spacing* (JPS), *Joint Plane Orientation* (JPO), *Specific gravity Influence* (SGI), dan *Hardness*. Parameter lain yang perlu ditambahkan yaitu UCS dan *density* batuan dari jenis tertentu, *blastibility index* dapat diperhatikan pada Gambar 2.3 (Casandra, 2023).

Geomechanic parameters	Rating
1. RMD	
1.1 Powdery / Friable	10
1.2 Blocky	20
1.3 Total massive	50
2. JPS	
2.1 Close (m)	10
2.2 Intermediate (0.1 to 1 m)	20
2.3 Wide (m)	50
3. JPO	
3.1 Horizontal	10
3.2 Dip out of face	20
3.3 Strike normal to face	30
3.4 Dip into face	40
4. SGI	
SGI= $25D$ or $SGI = 0.05 \times UCS$	
5. HD	1–10

Gambar 2. 3 *Blastibility index* (Lily, 1986)

Berdasarkan data *blastibility index* tersebut digunakan untuk perhitungan rock factor (A) dengan rumus:

$$BI = 0,5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + H)$$

$$A = 0,21 \times BI$$

Keterangan:

- BI : *Blatibility index*
RMD : *Rock mass description*
JPS : *Joint plane spacing*
JPO : *Joint plane orientation*
SGI : *Specific gravity influence*
H : *Hardness*
A : *Rock factor*

2.5 Fragmentasi

Fragmentasi merupakan suatu ukuran batuan yang dihasilkan dari proses peledakan yang dilakukan. Fragmentasi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti yang diketahui dalam teori fragmentasi Kuz-Ram. Terdapat dua prinsip penting yang harus dilihat untuk mengontrol ukuran fragmentasi. Jumlah energi yang sesuai diterapkan pada lokasi yang strategis dalam massa batuan. Energi yang dikeluarkan

harus tepat pada waktunya untuk menghasilkan interaksi yang sesuai terjadi (Konya, 1990)

Prediksi fragmentasi batuan dilakukan menggunakan perhitungan Kuz-Ram. Hasil dari perhitungan tersebut dapat dikaitkan hubungannya dengan perhitungan *digging time* aktual di lapangan. Cunningham melakukan penyempurnaan pada persamaan Kuznetsov untuk dapat digunakan pada semua jenis bahan peledak menjadi:

$$X_{mean} = A \left(\frac{V_o}{Q} \right)^{0,8} Q^{\frac{1}{6}} \left(\frac{115}{e} \right)^{\left(\frac{19}{30} \right)}$$

Keterangan:

X_{mean} : Ukuran rata-rata fragmen batuan (cm)

A : *Rock factor*

V_o : Volume batuan per lubang edak ($B \times S \times H$) (bcm)

Q : Berat bahan peledak TNT yang energinya ekivalen dengan energy muatan bahan peledak dalam setiap lubang ledak.

E : Kekuatan berat relatif bahan peledak yang digunakan (ANFO:100)

Rossin Ramler membuat suatu rumus sebagai berikut:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{xc}\right)} \times 100\%$$

Keterangan:

R : Banyaknya batuan yang tertahan pada ayakan

X : Ukuran ayakan (mm)

$$X_c : \frac{X_{mean}^{\frac{1}{n}}}{(0,693)}$$

e : Ephsilon= 2.71

n : Indeks keseragaman

Dengan pertimbangan faktor-faktor tersebut, maka dikembangkan dengan persamaan Kuznetsov yang saat ini menjadi rumusan atau Kuz-Ram model:

$$N = \left(2,2 - \frac{12B}{d} \right) \left(1 - \frac{W}{B} \right) \left(1 + \frac{(A-1)}{2} \right) \left(\frac{L}{H} \right)$$

Keterangan:

d : Diameter lubang ledak (mm)

A : *Ratio spasi terhadap burden*

W : Standar deviasi lubang bor (m)

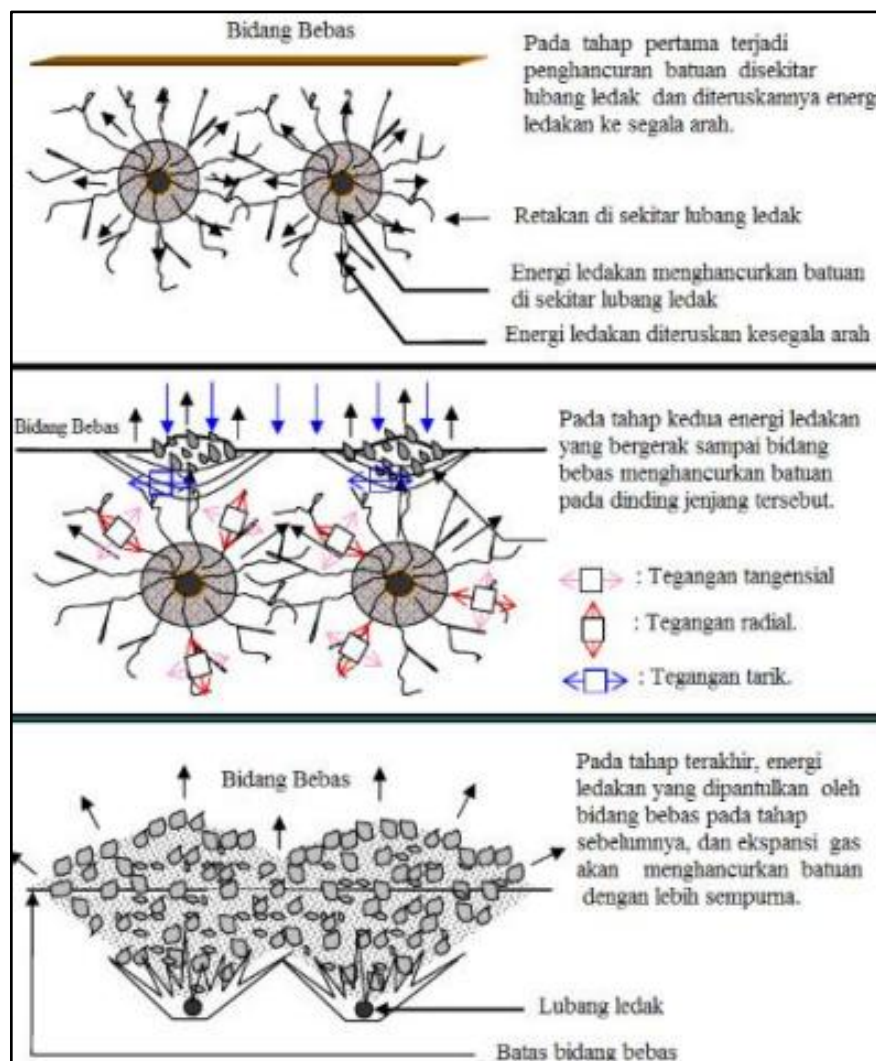
L : Panjang kolom isian (m)

B : *Burden* (m)

H : Tinggi jenjang (m)

2.6 Mekanisme Peledakan

Terdapat tiga tahap dalam proses pecahnya batuan, dengan menggunakan konsep proses-proses pemecah reaksi mekanik dalam batuan homogen. Proses pemecahan pada batuan yang homogen. Proses pemecahan pada batuan yang homogen akan berbeda seperti yang sering terjadi dalam proses peledakan (Ezra,2020). Mekanisme pecahnya batuan dapat diperhatikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Mekanisme Hancurnya Batuan (

Proses pemberaian batuan berlangsung melalui beberapa tahap, yaitu:

1. Tahap 1

Pada saat baan peledak meledak, tekanan tinggi menghancurkan batuan di daerah sekitar lubang ledak. Gelombang kejut (*Shock wave*) yang

meninggalkan lubang ledak merambat dengan kecepatan 3000-5000 m/s, akan mengakibatkan tegangan tangensial yang menimbulkan rekahan yang menjalar (*Radial rock*) dari daerah lubang ledak. Rekah pertama menjalar terjadi dalam waktu 1-2 m/s.

2. Tahap 2

Tekanan akibat gelombang kejut yang meningkatkan lubang ledak pada proses pemecahan tingkat 1 adalah positif. Apabila mencapai *free face* akan dipantulkan, tekanan akan turun dengan cepat, kemudian berubah menjadi negatif dan timbul gelombang tarik. Gelombang tarik (*Tensile wave*) ini merambat kembali di dalam batuan. Oleh karena batuan lebih kecil ketahanannya terhadap tarikan daripada tekanan, maka akan terjadi rekahan-rekahan primer (*Primary failure cracks*) disebabkan karena tegangan tarik (*Tensile stress*) dari gelombang yang dipantulkan. Fungsi dari energi yang ditimbulkan dari proses pemecahan batuan tahap 1 dan tahap 2 yaitu membuat rekahan kecil pada batuan. Secara teoritis energi gelombang kejut jumlahnya antara 5-15% dari energi total bahan peledak. Jadi gelombang kejut menyediakan kesiapan dasar untuk proses pemecahan tingkat akhir.

3. Tahap 3

Pengaruh tekanan yang sangat tinggi dari gas hasil peledakan juga turut membantu rekahan. Rekahan radial utama (Tahap 2) akan diperlebar secara cepat oleh kombinasi efek dari tegangan tarik disebabkan kompresi radial dan pembajian (*Pneumatic wedging*). Terdapat efek dari lepasnya batuan yang menyebabkan tegangan tarik tinggi dalam massa batuan yang menyebabkan tegangan tarik tinggi dalam massa batuan yang akan melanjutkan pemecahan hasil dari pemecahan tahap 2 mengakibatkan bidang-bidang lemah memulai reaksi fragmentasi utama.

2.7 Sifat Bahan Peledak

Performa dari bahan peledak yaitu berasal dari kemampuan bahan peledak dalam penggunaannya pada kondisi tertentu. Berbeda tipe bahan peledak, maka berbeda pula penanganannya. Kemampuan ketahanan terhadap air, sifat gas beracun, energi yang diperlukan untuk detonasi dan kekuatan untuk memecahkan batuan juga tentu berbeda (Hamdan, 2023)

a. Kekuatan (*Energy Strenght*)

Kekuatan suatu bahan peledak merupakan ukuran yang dipergunakan untuk mengukur energi yang terkandung pada bahan peledak dan kerja yang dapat dilakukan oleh bahan peledak tersebut. Percobaan dalam pengukuran kekuatan peledakan telah banyak dilakukan, untuk memprediksikan performa dari bahan peledak tersebut. Pengukuran energi secara teori (Q) dan kerja ekspansi (EWK), seperti pengukuran *underwater shock* dan *bubble energy*, tekanan gelombang dan tarikan gelombang pada material yang diledakkan sendiri.

b. Kecepatan Detonasi (VOD)

Kecepatan detonasi (*Velocity of Detonation*) adalah kecepatan gelombang detonasi yang melalui sepanjang kolom isian bahan peledak, yang dinyatakan dalam meter/detik. Setiap bahan peledak memiliki kecepatan pasti dan kecepatan ideal yang diketahui sebagai *hydrodynamic velocity*. Kecepatan detonasi suatu 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 1.500-8000 m/s.

c. Kepekaan (*Sensitivity*)

Kepekaan adalah pengukuran dalam kemudahan inisiasi. Beberapa jenis pengukuran pada kepekaan seperti *cap Sensitivity*, *drop tests*, *friction test* dan lainnya. Semua tes ini dilakukan dengan cara demikian dalam kaitannya penanganan keamanan bahan peledak. Kepekaan bahan peledak tergantung pada komposisi kimia, ukuran butir, bobot isi, pengaruh kandungan air dan temperature. Bahan peledak yang sensitif belum tentu bagus, namun bahan peledak yang mudah penyebaran reaksinya dan tidak peka adalah lebih menguntungkan dan lebih aman.

d. Bobot Isi Bahan Peledak (*Density*)

Bahan isi bahan peledak adalah perbandingan antara berat dan volume bahan peledak, dinyatakan dalam gr/cm³. Bobot isi biasanya juga dinyatakan dengan istilah *specific gravity* (SG), ataupun *loading density* (de).

e. Tekanan Detonasi (*Detonation Pressure*)

Tekanan detonasi adalah penyebaran tekanan gelombang ledakan dalam kolom isian bahan peledak, dinyatakan dalam kilobar (kb). Tekanan akibat ledakan di sekitar dinding lubang ledak intensitasnya tergantung pada jenis bahan peledak (Kekuatan, bobot isi, VOD), derajat pengukurungan, jumlah dan temperature gas hasil peledakan.

f. 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 (H₂O) dan asap berwarna putih (CO₂). 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.

g. Ketahanan Terhadap Air (*Water Resistance*)

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.

2.8 Pengisian Bahan Peledak

Penggunaan besaran jumlah bahan peledak yang digunakan sangat mempengaruhi hasil dari peledakan terutama fragmentasi batuan. *Powder factor* adalah suatu bilangan yang menyatakan berat bahan peledak yang digunakan untuk menghancurkan batuan (kg/m³). Nilai *Powder factor* sangat dipengaruhi oleh jumlah bidang bebas, geometri peledakan, pola peledakan dan struktur geologi. Beberapa hal yang mempengaruhi pengisian bahan peledak, yaitu (Jihan, 2022):

a. *Loading Density*

Konsentrasi isian atau *loading density* merupakan jumlah isian yang digunakan dalam kolom isian lubang tembak (PC). Perhitungan *loading density* dapat menggunakan rumus:

$$de = 0,508 De^2(SG)$$

Keterangan:

de : *Loading density* (Kg/m)

De : Diameter lubang tembak (Inchi)

SG : *Spesific gravity* bahan peledak yang digunakan

Jadi jumlah bahan peledak yang digunakan dalam satu lubang tembak dapat ditentukan dengan rumus:

$$E = de \times PC$$

Keterangan:

E : Jumlah bahan peledak tiap lubang ledak (Kg)

de : *Loading density* dari bahan peledak yang digunakan (Kg/m)

PC : Panjang kolom isian (m)

b. *Powder factor* (PF)

Powder factor adalah perbandingan antara bahan peledak yang digunakan terhadap jumlah batuan yang diledakkan.

$$Pf = E/W$$

Beberapa parameter yang mempengaruhi nilai *Powder factor* yaitu seperti geometri peledakan, struktur geologi dan karakteristik batuan. Bila bahan peledak yang digunakan terlalu banyak maka akan menimbulkan *air blast* dan *fly rock*, tetapi bila bahan peledak yang digunakan kurang maka akan menghasilkan bongkahan pada batuan dan *back break* disekitar jenjang. Terdapat dua macam satuan yang dapat digunakan dalam menentukan *Powder factor* yaitu:

- Berat bahan peledak per volume batuan yang diledakkan (Kg/m³).
- Berat bahan peledak per berat batuan yang diledakkan (Kg/ton).

2.9 Getaran Tanah (*Ground vibration*)

Getaran tanah (*ground vibration*) adalah getaran bumi yang terjadi akibat perambatan gelombang seismik di bawah tanah. Kegiatan peledakan selalu menghasilkan gelombang seismik. Tujuan peledakan umumnya untuk memecahkan batuan. Kegiatan ini membutuhkan sejumlah energi yang cukup sehingga melebihi atau melampaui kekuatan batuan atau melampaui batas elastis batuan. Apabila hal tersebut terjadi maka batuan akan menjadi pecah. Proses pemecahan batuan akan terus berlangsung hingga energi yang dihasilkan bahan peledak semakin lama akan semakin berkurang dan menjadi lebih kecil dari kekuatan batuan. Sehingga proses pemecahan batuan terhenti dan energi yang tersisa akan menjalar melalui batuan,

karena masih dalam batas elastisitasnya. Hal ini akan menghasilkan gelombang seismik. Peledakan menghasilkan dua jenis energi, yaitu *work energy* dan *waste energy*. *Work energy* merupakan energi peledakan yang menyebabkan terpecahnya batuan. Energi ini terbagi menjadi dua, yaitu *shock energy* dan *gas energy*. Ketika peledakan terjadi, tidak semua energi yang dihasilkan ini disebut *waste energy*. *Waste energy* terdiri dari cahaya, panas, suara dan energi seismik. *Waste energy* (terutama seismik) dapat menimbulkan efek yang berbahaya dan tidak menguntungkan dalam kegiatan peledakan (Jimeno, 1995).

Menurut *Blasting Guideline Manual* (Rosenthal & Marlock, 1987) yang dikeluarkan oleh *US Office of Surface Mining Reclamation & Enforcement* (OSMRE), dinyatakan bahwa setiap kegiatan peledakan menghasilkan getaran dengan tiga kriteria, yaitu: *Peak particle velocity* (PPV), *Peak Particle Acceleration* (PPA) dan *Peak Particle Displacement* (PPD). Berdasarkan beberapa penelitian, *peak particle velocity* (PPV) merupakan kriteria yang paling berpengaruh dalam analisis tingkat getaran. Beberapa penelitian yang menggunakan PPV sebagai salah satu kriterianya yang paling berpengaruh adalah antara lain:

1. USBM (Duvall & Fogelson, 1962)

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$PPV = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q_{Max}}} \right)^{-\beta}$$

2. Ambraseys-Hendron (1968)

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$PPV = K \left(\frac{R}{Q_{Max}^{1/3}} \right)^{-\beta}$$

3. Langefors-Kihlstrom (1978)

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$PPV = K \left(\frac{R^{3/4}}{Q_{Max}^{1/2}} \right)^{-\beta}$$

Dimana K dan β adalah *site constant*, Q_{Max} adalah maksimum *charge per delay*, R adalah jarak antar *blast face* ke titik pengukuran. Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi tingkat getaran tanah hasil dari kegiatan peledakan. Getaran tanah hasil peledakan dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu faktor yang dapat dikontrol dan faktor yang tidak dapat dikontrol. Yang tergolong dalam faktor yang tidak dapat dikontrol adalah faktor geologi, geomekanik batuan dan kondisi alam.

Peak particle velocity (PPV) merupakan kecepatan maksimum yang digunakan untuk menghitung besarnya getaran pada suatu lokasi yang tergantung

pada jarak lokasi tersebut dari pusat peledakan dan dari jumlah bahan peledak yang digunakan per periode (*delay*). Berdasarkan penelitian yang dilakukan dalam usaha menentukan besarnya partikel puncak (PPV) yang dihasilkan dalam sebuah peledakan, maka dapat ditentukan persamaan sebagai berikut (Koesnaryo, 2001)):

$$PPV = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-n}$$

Persamaan di atas menunjukkan persamaan PPV Dimana satuannya dinyatakan dalam bentuk mm/s, D adalah jarak maksimum terhadap lokasi pengamatan yang dinyatakan dalam satuan m, W merupakan bahan peledak maksimum per periode tunda yang dinyatakan dalam satuan kg, serta k dan n merupakan konstanta yang harganya tergantung dari kondisi lokal dan kondisi peledakan (Maryura, 2014).

Getaran tanah hasil dari kegiatan peledakan dipengaruhi oleh 2 faktor utama, yaitu faktor yang tidak dapat dikontrol dan yang dapat dikontrol. Menurut Rosenthal dan Marlock (1987) adapun faktor-faktor yang mempengaruhi tingkat getaran tanah dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut (Koesnaryo, 2001).

Tabel 2. 1 Faktor yang mempengaruhi getaran tanah (Koesnaryo, 2001)			
Variabel yang dapat dikontrol	Pengaruh terhadap tingkat getaran tanah		
	Signifikan	Sedang	Tidak signifikan
Berat isian per <i>delay</i>	x		
<i>Delay interval</i>	x		
<i>Burden</i> dan spasi		X	
<i>Stemming (Jumlah)</i>			x
<i>Stemming (Tipe)</i>			x
Panjang isian dan diameter			x
Sudut lubang bor			x
Arah inisiasi		x	
Variabel yang dapat dikontrol	Pengaruh terhadap tingkat getaran tanah		
	Signifikan	Sedang	Tidak signifikan
Berat isian			x
Kedalaman isian			x

Bare VS covered

primacord

x

Kecocokan isian

x

Variabel yang tidak dapat dikontrol	Pengaruh terhadap tingkat getaran tanah		
	Signifikan	Sedang	Tidak signifikan
Keadaan umum daerah pemukiman			x
Tipe dan kedalaman <i>overburden</i>	x		
Kondisi angin dan hujan			x

Standar Nasional Indonesia Nomor 7571:2023 menetapkan baku tingkat getaran kejut pada beberapa jenis bangunan seperti bangunan kuno, bangunan dengan pondasi dan lain sebagainya dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 2 Baku tingkat getaran peledakan pada tambang terbuka (SNI 7571:2023)

Kelas	Jenis Bangunan	PPV (mm/s)
	Bangunan kuno yang dilindungi undang-undang	
1	benda cagar budaya (Undang-Undang No. 6 Tahun 1992)	2
	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan	
2	adukan semen saja, termasuk bangunan dengan pondasi kayu dan antainya diberi adukan semen	3
	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan	
3	adukan semen yang diikat slope beton	5
	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan	
4	adukan semen slope beton, kolom dan rangka diikat dengan ring balok	7-20

5	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen, slope beton, kolom dan diikat dengan rangka baja	12-40
---	---	-------

2.10 Gelombang Seismik

Gelombang seismik terbagi menjadi dua tipe gelombang yang dapat melewati medium elastik. Gelombang P dikenal dengan gelombang longitudinal, gelombang primer dan gelombang kompresi yang merupakan gelombang yang arah perambatannya searah dengan gerak partikel. Sedangkan untuk Gelombang S juga dikenal sebagai gelombang transversal, gelombang sekunder atau shear wave, yang arah rambat gelombang S ini tegak lurus terhadap gerak partikelnya (Minara, dkk., 2020).

Hasil pengukuran seismograf menampilkan tiga jenis gelombang, yaitu: gelombang vertikal (V), longitudinal atau radial (L) dan transversal (T). Masing-masing gelombang dapat diartikan sebagai berikut (Toha, 2017):

- Gelombang vertikal (V) adalah gerakan partikel naik turun.
- Gelombang longitudinal (L) adalah gerakan partikel sesuai dengan arah rambatan gelombang.
- Gelombang transversal (T) adalah gerakan partikel tegak lurus dengan arah rambatan gelombang

2.11 Analisis *Scaled distance*

Analisis *Scaled distance* adalah salah satu cara untuk menganalisis getaran dengan cara menghitung berat muatan maksimum per penundaan peledakan dan jarak struktur yang aman minimum untuk lokasi peledakan tertentu. Informasi yang disajikan dalam bentuk grafik baris regresi sederhana yang mudah dibaca. Analisis didasarkan pada data hasil peledakan, yaitu skala jarak dan *peak particle velocity* (PPV). Secara matematis konsep analisis *scaled distance* adalah sebagai berikut (Permana, 2019).

$$V = H \times (SD)^{\beta}$$

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}}$$

Keterangan:

-H : Konstanta proporsionalitas

-D : Jarak titik pengukuran ke titik peledakan

- W : Muatan bahan peledak per waktu tunda
- β : Konstanta
- SD : *Scaled distance*
- V : Kecepatan partikel

Cara yang praktis dan efektif untuk mengontrol getaran adalah dengan menggunakan *scaled distance*. Sehingga memungkinkan pelaksana lapangan menentukan jumlah bahan peledak yang diperlukan atau jarak aman untuk muatan bahan peledak yang jumlahnya telah ditentukan. Harga *scaled distance* yang lebih besar akan lebih aman, karena semakin jauh jaraknya akan lebih aman dibandingkan dengan jarak yang lebih dekat (Ramadhan & Isniarno, 2022).

2.12 Analisis Regresi

Analisis regresi didefinisikan sebagai kajian terhadap hubungan satu variabel yang disebut sebagai variabel yang diterangkan (variabel terikat) dengan satu atau dua variabel yang menerangkan (variabel bebas). Analisis regresi digunakan untuk mengukur dan memprediksi pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Analisis regresi dapat memprediksikan seberapa jauh perubahan nilai suatu variabel apabila dilakukan manipulasi (dinaik turunkan) pada variabel lain (Salmani, 2020).

Analisis regresi secara umum dibagi menjadi dua yaitu analisis regresi linear sederhana dan analisis regresi ganda. Regresi linier sederhana adalah analisis regresi yang hanya menggunakan satu variabel penjelas atau variabel bebas. Analisis regresi linear sederhana didasarkan pada hubungan fungsional ataupun kausal satu variabel independen dengan satu variabel dependen. Regresi linier sederhana dilakukan untuk memperkirakan hubungan antara variabel dependen (y), dan variabel penjelas tunggal (x) (Karamazova *et al.*, 2017). Model persamaan regresi dapat dilihat pada Persamaan 2.16. Pada dasarnya, suatu model tidak pernah sepenuhnya menjelaskan suatu variabel terikat, sehingga regresi linier selalu terdapat pengaruh dari kesalahan atau *error* sebagai variabel lain yang tidak diperhitungkan (Sugiyono, 2016).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e \quad (2.15)$$

Analisis regresi linear berganda merupakan lanjutan dari regresi linear sederhana, di mana terdapat dua atau lebih variabel independen sebagai faktor prediktor yang dimanipulasi. Teknik regresi linier berganda digunakan untuk mengetahui ada tidaknya pengaruh signifikan dua atau lebih variabel bebas (X) terhadap satu

variabel terikat (Y) (Sundari, 2019). Model regresi linier berganda berganda diformulasikan pada persamaan 2.16.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad (2.16)$$

dimana:

$\hat{Y}$	=	nilai penduga bagi variabel Y
b_0	=	dugaan bagi parameter konstanta
$b_1, b_2, \dots, b_k$	=	dugaan bagi parameter konstanta $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$
X	=	variabel bebas.

Terdapat beberapa asumsi agar model regresi terpenuhi, antara lain (Sugiyono, 2016)):

1. $E(\varepsilon_i | X_{2i}, X_{3i}, \dots, X_{pi}) = 0$ hal ini berarti bahwa tidak ada *error* yang terdapat pada modl regresi.
2. $Kov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ di mana $i \neq j$, hal ini berarti tidak ada autokorelasi atau bisa dikatakan tidak ada korelasi antar peelitian berurutan menurut waktu atau ruang.
3. $var(\varepsilon_i) = \sigma^2$, hal ini berarti model homoskedasititas atau setiap residual memiliki nilai varians yang sama dan konstan.
4. Tidak ada korelasi antar variabel bebas atau tidak terjadi multikoliniearitas.
5. Residual terdistribusi normal.
6. Model bersifat Linier.

2.12.1 Uji Hipotesis

Pengujian hipotesis dilakukan untuk menganalisis hasil dari model persamaan regresi berganda. Uji hipotesis terbagi atas dua, yaitu (Sugiyono, 2016):

1. Uji F (Uji Serentak)

Uji F digunakan pada pengujian hipotesis pertama untuk mengetahui apakah seluruh variabel bebasnya secara bersama-sama mempunyai pengaruh yang bermakna terhadap variabel terikat. Hipotesis pertama dapat dapat diterima apabila variabel bebasnya secara bersama-sama berpengaruh terhadap variabel terikat dalam hal ini nilai $F_{hitung} \geq F_{tabel}$ dengan derajat kesalahan 5%.

2. Uji T (Uji Parsial)

Uji T digunakan pada pengujian hipotesis kedua untuk mengetahui apakah pengaruh masing-masing variabel bebas terhadap variabel terikat memiliki makna atau tidak. Apabila hasil perbandingan menunjukkan $t_{hitung} \geq t_{tabel}$

dengan derajat kesalahan 5%, maka variabel bebas memberikan pengaruh bermakna terhadap variabel terikat

Analisis regresi dapat membantu para peneliti untuk menganalisa hubungan antara variable independent dan dependen. Variabel dependen atau variabel terikat dalam penerapannya merupakan outcome yang menjadi perhatian, sedangkan variabel independen atau variabel bebas merupakan sesuatu yang dibutuhkan untuk mencapai outcome tersebut. Persamaan PPV di dalam kajian statistik, dapat dianalisis menggunakan metode regresi non linear (power) pada program komputer. Berikut ini adalah persamaan regresi power di dalam kajian statistic secara umum.

$$Y = a(x)^b$$

Keterangan:

- Y : Variabel terikat
- a : Konstanta
- X : Variabel bebas
- b : Konstanta

1. Koefisien Determinasi

Koefisien determinasi (R^2) adalah salah satu nilai statistik yang dapat digunakan untuk mengetahui apakah ada hubungan pengaruh antara dua variabel. Nilai koefisien determinasi menunjukkan persentase variasi nilai variabel terikat Y yang dapat dijelaskan oleh garis regresi yang dihasilkan (Yuanita, 2020).

2. Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi merupakan ukuran untuk mengetahui keeratan hubungan antara satu variabel dengan variabel yang lain. Dua variabel dikatakan berkorelasi apabila perubahan dalam satu variabel diikuti oleh perubahan variabel lain, baik yang searah maupun tidak (Khasanah, 2016).

Untuk penentuan nilai K dan m dilakukan analisis regresi power. Nilai K dan m dalam analisis ini dipengaruhi oleh jarak dan bahan bakar peledak per *delay*. Penentuan nilai K dan m dengan cara mencari hubungan terhadap *scaled distance* dan *peak particle velocity*. Nilai square root *scaled distance* diperoleh dengan melakukan perhitungan yang menggunakan jumlah *charge/delay* dan jarak pengukuran.

Dalam menganalisis data hasil peledakan, dibutuhkan suatu metode analisis yang disebut sebagai analisis regresi multivariate. Analisis tersebut merupakan

analisis statistic yang dikenakan pada data yang terdiri dari banyak variabel dan antar variabel saling berkorelasi. Misal data dari pengalaman pada p variabel, sehingga dapat disusun matriks dengan baris dn p kolom, dinotasikan X (Yudha, dkk., 2022).

Variate adalah suatu kombinasi linear dari variabel-variabel yang memiliki bobot empiris yang telah ditentukan. Suatu variate dari sejumlah n variabel yang terbobot (X_1 sampai dengan X_n). Adapun persamaan dasar dari regresi multivariate adalah:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Keterangan:

Y: Variabel terikat

X_1 : Variabel bebas; $I = 1, 2, \dots, n$

Rumusan di atas dapat dijabarkan menjadi matriks dengan rumusan konstanta dan koefisien sebagai berikut:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Keterangan:

- β : Konstanta dan koefisien

-X : Matriks variabel bebas

- X^T : Matriks transpose variabel bebas

-Y : Matriks variabel terikat

Rumusan di atas dapat dijabarkan menjadi matriks dengan rumusan konstanta dan koefisien sebagai berikut:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

Keterangan:

- β : Konstanta dan koefisien

-X : Matriks variabel bebas

- X^T : Matriks transpose variabel bebas

-Y : Matriks variabel terikat