

**KRITERIA KERUSAKAN AKIBAT PELEDAKAN PADA PEMBUATAN TEROWONGAN
CIURUG, TAMBANG EMAS PONGKOR, KABUPATEN BOGOR,
PROVINSI JAWA BARAT**

***BLAST DAMAGE CRITERIA OF TUNNELLING IN CIURUG, PONGKOR
GOLD MINE, BOGOR REGENCY, WEST JAWA PROVINCE***

Awang Suwandhi¹, Mega Fatimah Rosana¹, Adjat Sudradjat¹, Ridho Kresna Wattimena²

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Bandung

²Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
awang.suwandhi@gmail.com

ABSTRAK

Untuk mencapai urat (*vein*) bijih di lokasi Central pada Level 500 mdpl, Ciurug, dibuat terowongan baru yang dinamakan RU4C-L500 dengan menerapkan teknik peledakan. Terowongan tersebut dirancang berukuran lebar 4 m, tinggi 4 m dan panjang 100 m sampai ke *cross-cut* menuju urat bijih. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kriteria kerusakan terowongan yang diakibatkan oleh induksi getaran peledakan yang berpotensi menghasilkan *overbreak*, sehingga ukuran terowongan menjadi lebih lebar dari rencana semula. Pendekatan *Blast Damage Index* (BDI) digunakan sebagai metode untuk memperoleh tingkat kerusakan terowongan tersebut. Terowongan menerobos batuan andesit vulkanik yang berdasarkan hasil pengujian memiliki kecepatan rambat gelombang seismik 4157 m/det, densitas 2,37 g/cc dan kuat tarik 8,10 MPa. Batuan tersebut tergolong batuan berkekuatan sedang hingga keras dengan nilai *Rock Mass Rating* (RMR) antara 58,3 sampai 69,5. Data getaran peledakan diukur dengan menggunakan geofon pada jarak yang aman dari titik ledakan dan menghasilkan *Peak Vector Sum* (PVS) berkisar antara 2 mm/s sampai 120 mm/s. Hasil pengolahan data getaran menunjukkan, bahwa nilai BDI sebesar 2 yang mengidentifikasi adanya ambruk terowongan karena induksi getaran peledakan terjadi pada jarak kurang dari 3 m dari titik ledakan. Besar getaran peledakan yang mengambruk batuan andesit vulkanik tersebut mencapai PVS 1170 mm/s. Pada jarak antara 3,0 m sampai 10 m tidak terjadi kerusakan terowongan yang parah dan dapat direhabilitasi. Kondisi tersebut diidentifikasi oleh nilai BDI 0,5 sampai 1. Kemudian pada jarak di atas 10 m induksi getaran peledakan tidak lagi berpengaruh terhadap kerusakan atau kestabilan dinding terowongan.

Kata kunci: Andesit vulkanik, peledakan, *overbreak*, *Blast Damage Index* (BDI), Pongkor

ABSTRACT

To reach one of the ore veins at Level 500 m (above sea) located at Central area, Ciurug, it needs a new tunnel called RU4C-L500 by applying blasting technique. The tunnel is built 4 m width, 4 m height and length up to 100 m toward cross-cut to ore veins. The aim of the research is to obtain damage criteria of the tunnel due to the induction of blast vibration that potentially produces overbreak, which affects enlargement of the planned tunnel dimensions. The Blast Damage Index (BDI) approach is adopted as a method to get a degree of tunnel damage. The tunnel penetrates the volcanic andesite rocks that based on the test results has a seismic wave velocity of 4157 m/s, the density of 2.37 g/cc and the tensile strength of 8.10 MPa. The rocks are classified as moderate to hard rocks with Rock Mass Rating (RMR) values ranging from 58.3 to 69.5. The data of vibration of blast is measured using geophone at a safe distance from blasting point and resulted Peak Vector Sum (PVS) ranging between 2 mm/s to 120 mm/s. Vibration data processing results indicate that a BDI value of 2 which identifies a failure of tunnel due to blasting vibration induction occurs at a distance less than 3 m from the point of explosion. The vibration of blast that demolish the andesitic volcanic rocks is the PVS of 1170

mm/s. At a distance of between 3.0 m and 10 m there is no severe tunnel damage and can be rehabilitated. The condition is identified by a BDI value of 0.5 to 1. Then at a distance above 10 m the blasting vibration induction no longer affects the damage or stability of the tunnel wall.

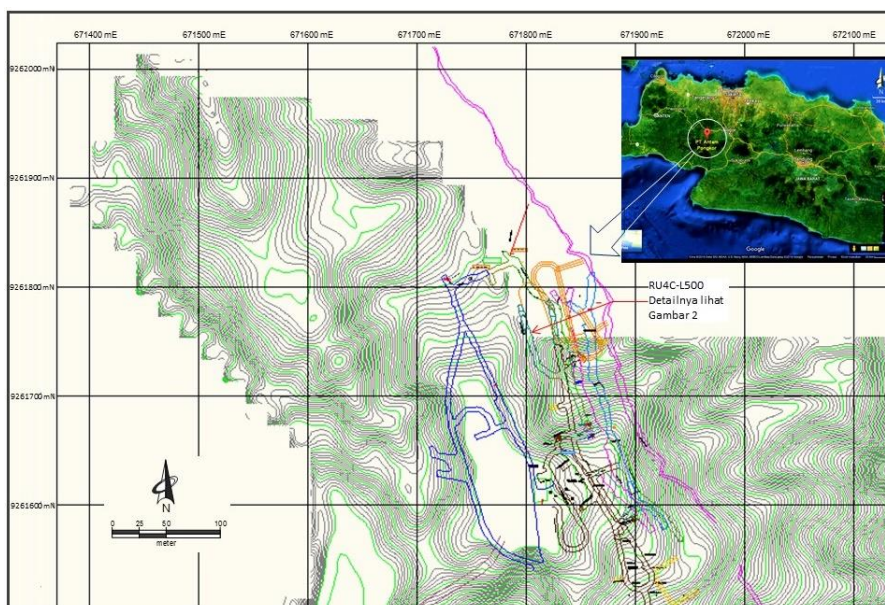
Keywords: Andesite volcanic, blasting, overbreak, Blast Damage Index (BDI), Pongkor

PENDAHULUAN

Penelitian dilakukan di PT Aneka Tambang Unit Bisnis Pertambangan Emas, Pongkor, yang secara administratif termasuk dalam wilayah Kecamatan Nanggung, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat (Gambar 1). Penambangan emas di daerah Pongkor dilakukan di bawah tanah (*underground gold mine*) pada endapan bijih di lokasi Ciurug yang merupakan salah satu lokasi endapan bijih yang masih aktif (Anonim, 2015). Untuk memasuki urat (*vein*) bijih di Ciurug pada Level 500 mdpl (meter dari permukaan laut) dibuat terowongan baru, *Ramp Up 4 Central Level 500* atau RU4C-L500, dari *Ramp Down 4 Central Level 450* atau RD4C-L450 yang sudah ada sebelumnya sampai ke urat bijih dengan jarak mencapai 100 m. Pintu terowongan di dinding RD4C-L450 terletak pada koordinat UTM 9261719 mN, 671831 mE dan level 479 mdpl (Gambar 2). Terowongan dibuat dengan lebar 4 m, tinggi 4 m, panjang 100 m dan kedua bagian sudut atapnya melengkung atau *semi-arch*. Arah

penggalian terowongan pada awalnya menuju ke barat, setelah masuk 12 m sampai 25 m berbelok ke arah utara sampai 100 m dan lantainya sedikit mendaki dengan sudut antara 3° sampai 6°. Kedalaman RU4C-L500 dari permukaan bumi sekitar 312 m (Gambar 3).

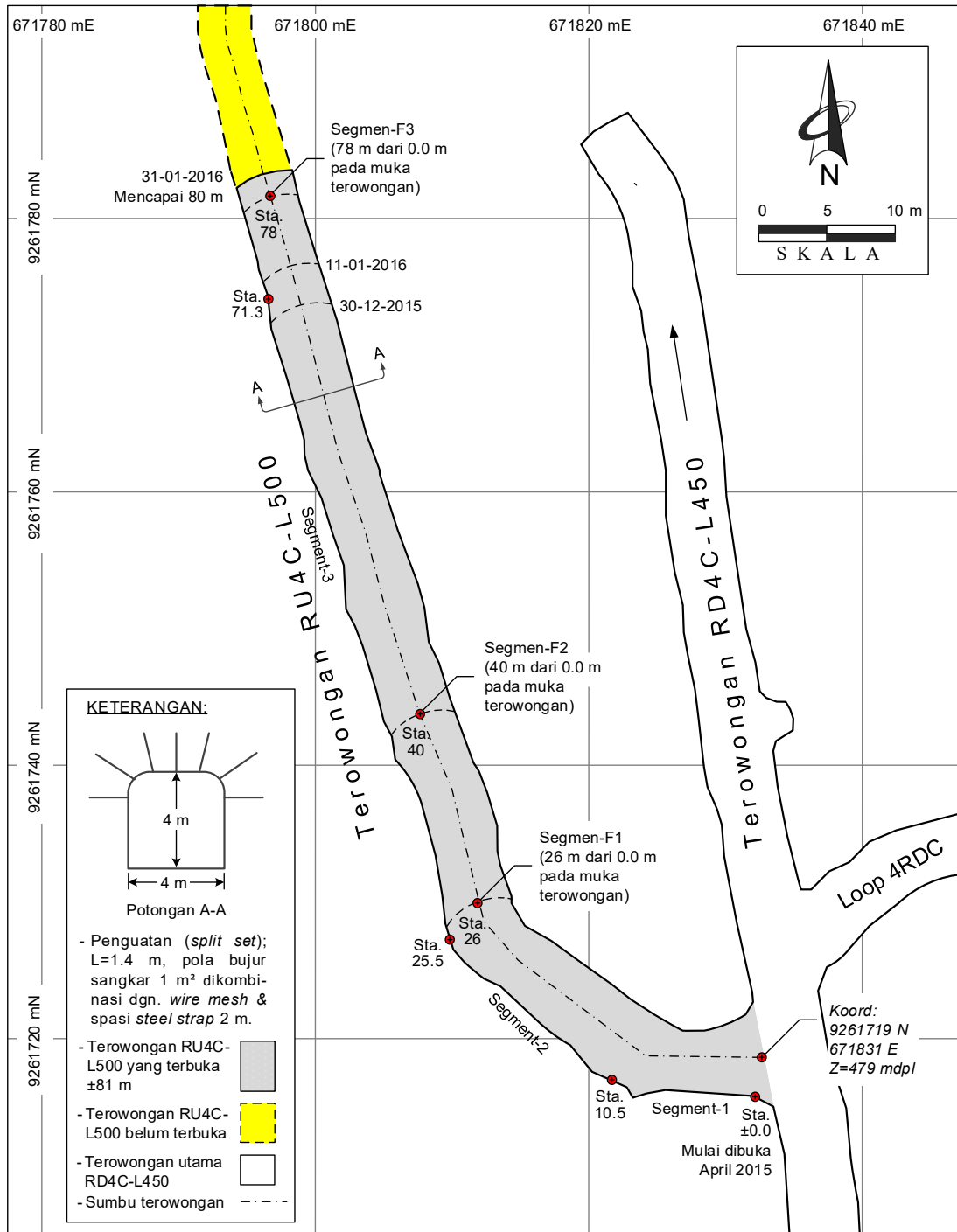
Terowongan RU4C-L500 dibuat dengan teknik peledakan menerobos massa batuan andesit vulkanik yang tergolong batuan berkekuatan sedang hingga keras (Anonim, 2015). Permasalahan yang muncul selama pembuatan terowongan adalah timbulnya *overbreak*, baik pada dinding maupun bagian atap terowongan yang disebabkan oleh getaran peledakan. Akibat *overbreak* ukuran terowongan menjadi lebih lebar dari rencana semula, volume fragmen batuan yang harus dikeluarkan bertambah, proses pengangkutan jadi lebih lama dan biaya pembangunan terowongan meningkat terutama untuk penyediaan sistem penyanggaan.



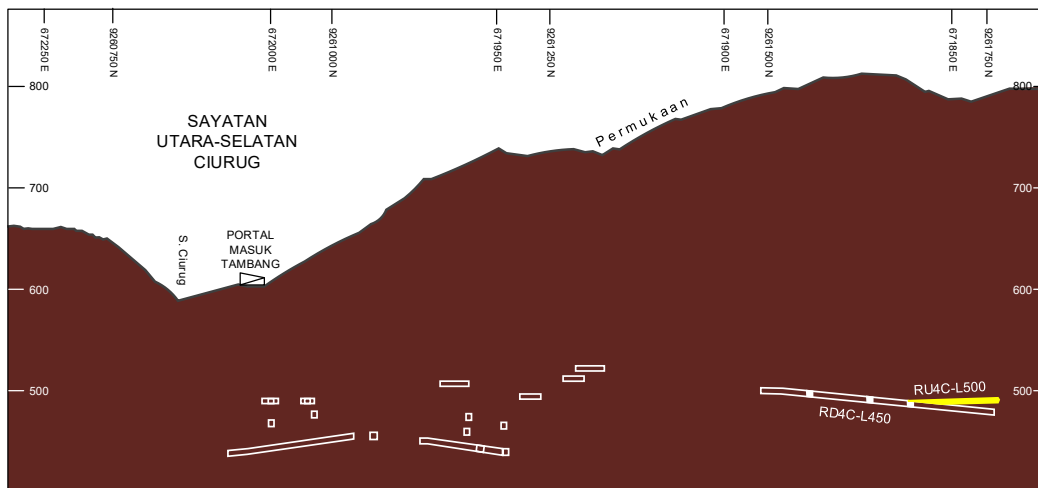
Gambar 1. Peta lokasi penelitian (Anonim, 2015)

Penelitian bertujuan untuk mendapatkan kriteria kerusakan yang akan mengidentifikasi tingkat keparahan runtuhnya dinding dan atap terowongan akibat getaran peledakan di sepanjang terowongan. Adapun metode yang digunakan adalah dengan pendekatan Indeks Kerusakan Peledakan atau *Blast Damage Index* (BDI) akibat peledakan

pada tambang bawah tanah (Yu dan Vongpaisal, 1996). Nilai BDI berkisar antara 0 (nol) sampai 2 atau lebih, dengan keterangan bahwa BDI: 0 menunjukkan tidak ada kerusakan pada dinding terowongan, sedangkan BDI: 2 berarti terjadi ambrukan pada dinding dan atap akibat getaran peledakan.



Gambar 2. Peta terowongan RU4C-L500 dan RD4C-L450



Gambar 3. Kedalaman terowongan RU4C-L500 dari permukaan bumi

GEOLOGI DAERAH PONGKOR

Perkembangan kekar di Pulau Jawa, termasuk daerah Pongkor dan sekitarnya, tidak terlepas dari adanya pergerakan Lempeng Samudera Indo-Australia dan Lempeng Benua Eurasia yang saling bertubrukan (*collision*). Tubrukan kedua lempeng tersebut bersifat konvergen dengan Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dan berorientasi timurlaut-baratdaya. Batas tubrukan lempeng ini ditandai dengan adanya palung samudera di sebelah selatan Jawa Barat yang dikenal sebagai Paritan Jawa atau *Java Trench* (Ben-Avraham, 1973, dalam Hamilton, 1979).

Gerakan penunjaman yang terus berlangsung secara evolutif membentuk gunung-gunung berapi aktif yang membentang sepanjang Pulau Sumatera, Pulau Jawa sampai Kepulauan Nusa Tenggara. Disamping itu, gerakan penunjaman Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia mengakibatkan daerah Pulau Jawa sebagai salah satu daerah yang memiliki tingkat kegempaan yang cukup tinggi di Indonesia, karena berkaitan dengan aktivitas benturan lempeng. Pergerakan lempeng ini menimbulkan struktur tektonik yang merupakan ciri sistem subduksi, yaitu *Benioff Zone*, palung laut, punggung busur luar (*outer arc ridge*), cekungan busur luar

(*outer arc basin*), dan *volcanic arc* atau busur pegunungan (Hall, 2011).

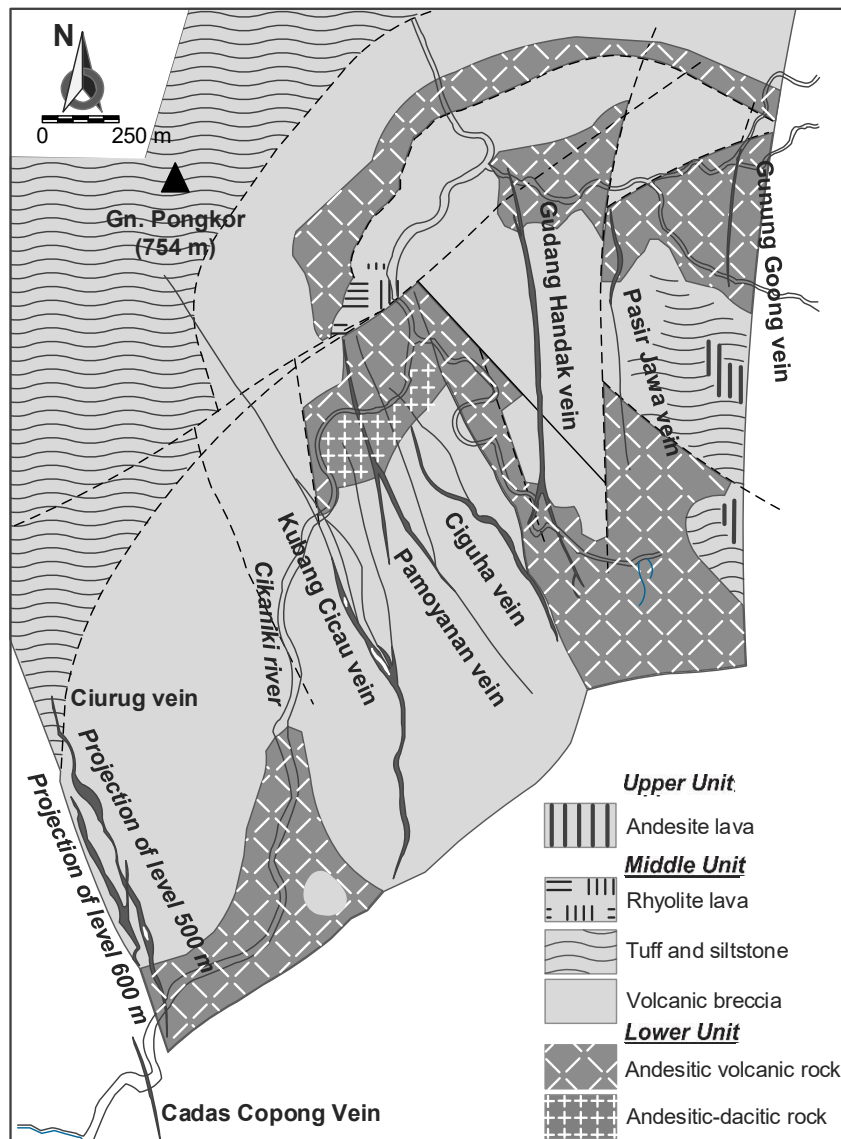
Kompleks Kubah Bayah yang terletak di sebelah barat Pulau Jawa merupakan batuan induk utama (*main host*) tempat pengendapan tipe epitermal bijih emas-perak di Pongkor (Basuki *et al*, 1994; Milesi *et al*, 1999; Syafrizal *et al*, 2005 dan 2007; Warmada *et al*, 2007; dan Yuningsih *et al*, 2014). Lokasi pengendapan epitermal bijih emas-perak lainnya di dalam kompleks Kubah Bayah adalah Cibaliung (Angeles *et al*, 2002; Harijoko *et al*, 2007), endapan emas hidrotermal di Cikidang (Rosana *et al*, 2006), dan di Cikotok serta Cirotan yang saat ini penambangannya sudah ditutup. Bagian dasar Kubah Bayah terbangun oleh serpih dan batupasir, kemudian ditindih oleh sabuk gunungapi tengah berumur Oligosen sampai Miosen Awal, yang sebagian besar terdiri dari batuan volcano-klastik kasar serta diselingi batugamping dan batupasir. Batuan intrusi *intermediate* terbentuk pada Paleogen dan Miosen Bawah. Area Pongkor terdiri dari batuan sedimen gunungapi Miosen dan batuan gunungapi Pliosen-Kuarter di bagian timurlaut sayap Kubah Bayah (Basuki, *et.al*, 1994; Milési, *et al*, 1999).

Endapan emas-perak Pongkor terdapat pada endapan jenis epitermal sulfida-rendah (*low-sulfidation*) dan terdiri atas urat mineralisasi kuarsa utama yang ditafsirkan sebagai depresi gunung berapi-tektonik

(kaldera). Endapan itu sendiri terletak di tepi barat laut struktur melingkar dengan luas 8 km × 6 km. Proses pengendapan berupa erupsi ignimbritik yang menghasilkan aliran piroklastik dan lapili akresi dengan sisipan batu epiklastik (Basuki *et al*, 1994; Milesi *et al*, 1999; Syafrizal *et al*, 2007).

Batuan vulkanik berperan sebagai batuan pembawa mineralisasi endapan emas di Pongkor yang terdiri dari tiga susunan unit, yaitu unit vulkanik atas, tengah dan bawah (Gambar 4). Unit vulkanik bawah memiliki karakteristik batuan vulkanik andesitik kalk-alkali bawah laut meningkat secara lateral

menjadi endapan epiklastik. Unit bagian tengah ditandai oleh banyak sebaran batuan vulkanik dasit di permukaan bumi yang memungkinkan untuk dikenali variasi subunitnya, yaitu subunit basal dengan pertumbuhan tuf lapili ditindih oleh blok tuf lapili dari subunit ignimbrite utama, dan terakhir oleh pembentukan ulang subunit tuf piroklastik berbutir halus bagian atas dan batulanau epiklastik dari sebagian besar subunit atas. Unit bagian atas menutupi unit tengah ke arah utara dan timur penambangan yang umumnya terdiri dari aliran andesit (Milesi *et al*, 1999; Syafrizal *et al*, 2005).



Gambar 4. Peta geologi dan sistem vein endapan Pongkor (Milesi *et al*, 1999, dalam Syafrizal *et al*, 2007)

Mineralisasi dan pengendapan emas primer di Pongkor secara struktur dikontrol dan tumbuh sebagai sistem *vein* yang masih aktif ditambang di Ciurug sampai saat ini. Ketebalan *vein* Ciurug bervariasi dari 2 m dekat permukaan sampai sekitar 24 m di bagian bawah dengan panjang total sekitar 2 km (Syafrizal, *et al*, 2007). Lokasi penambangan berada di sekitar level 500 mdpl dengan batuan induk didominasi oleh batuan andesit vulkanik (Gambar 5).

METODOLOGI

Dalam kaitannya dengan peledakan yang diterapkan pada pembuatan terowongan RU4C-L500, aspek geomekanika batuan harus diketahui. Pengklasifikasian batuan dengan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) yang diusulkan oleh Bieniawski pada tahun 1989, telah banyak dipakai untuk mengklasifikasi massa batuan yang diperlukan dalam pembangunan suatu konstruksi di bawah tanah, khususnya terowongan (Hoek & Brown, 1980, dan Hoek, 2006). Terdapat enam parameter yang diperhitungkan dalam pengklasifikasian massa batuan, yaitu kuat tekan uniaksial, spasi dan kondisi kekar, *Rock Quality Designation* (RQD), kondisi air tanah dan orientasi kekar terhadap sumbu terowongan, kemudian setiap parameter dikuantifikasi dengan cara pembobotan.

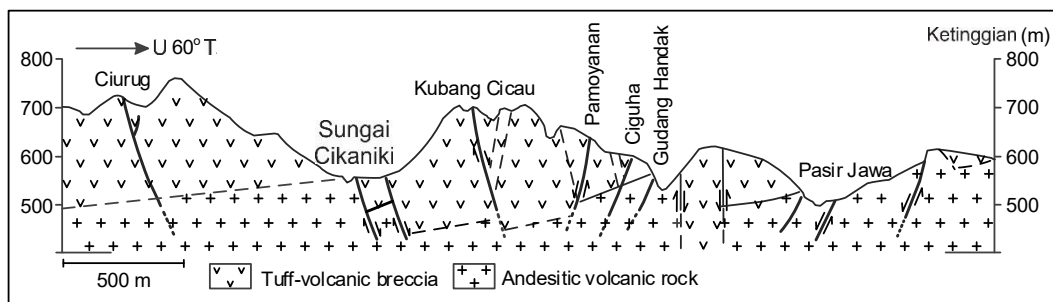
Terowongan RU4C-L500 tepatnya terletak pada level 479 mdpl (Gambar 2 dan Gambar 5). Untuk mengetahui pengaruh peledakan terhadap kerusakan dinding terowongan yang telah terbuka dilakukan pengumpulan data langsung di dalam

terowongan dengan membagi tiga bagian berdasarkan perubahan arah sebagai berikut (Gambar 2):

- Persimpangan RD4C-L450 dan RU4C-L500 pada koordinat UTM 9261719 mN, 671831 mE dan level 479 mdpl ditetapkan sebagai titik awal (= 0,0 m).
- Segmen-1 diukur dari 0,0 m sampai 10,5 m dengan arah penggalian ke barat.
- Segmen-2 lanjutan dari Segmen-1 diukur dari 10,5 m sampai 25,5 m dengan arah penggalian berbelok dari barat ke baratlaut.
- Segmen-3 lanjutan dari Segmen-2 diukur dari 25,5 m sampai 72,0 m dengan arah penggalian berbelok dari baratlaut ke utara-baratlaut.

Kemudian pengumpulan data dari setiap segmen dikerjakan dengan cara:

- Survei garis-bentang atau *scanline* dilakukan pada dinding sebelah kiri dari arah masuk terowongan RU4C-L500 untuk mengukur spasi dan mengamati kondisi kekar.
- Pengambilan conto batuan untuk pengujian jenis, sifat fisik dan mekanik batuan dilakukan pada dinding terowongan dari setiap segmen menggunakan alat bor inti portabel (Gambar 6).
- Pengukuran atau perekaman getaran peledakan dilakukan dengan jarak yang berbeda sepanjang terowongan menggunakan alat Blastmate III, Minimate dan Micromate buatan InstanTel, Canada (Gambar 7 dan Gambar 8).



Gambar 5. Potongan arah baratdaya-timuraut sistem vein Pongkor (Basuki *et al*, 1994, dalam Syafrizal *et al*, 2007)



Gambar 6. Pengambilan conto batuan memakai alat bor inti portabel



Gambar 7. Pengukuran getaran menggunakan alat Blastmate III

Distribusi spasi kekar pada dasarnya memberikan indikasi tentang kualitas massa batuan itu sendiri dan dapat dihubungkan dengan nilai RQD yang dihitung dengan persamaan (1) (Priest and Hudson, 1981) sebagai berikut:

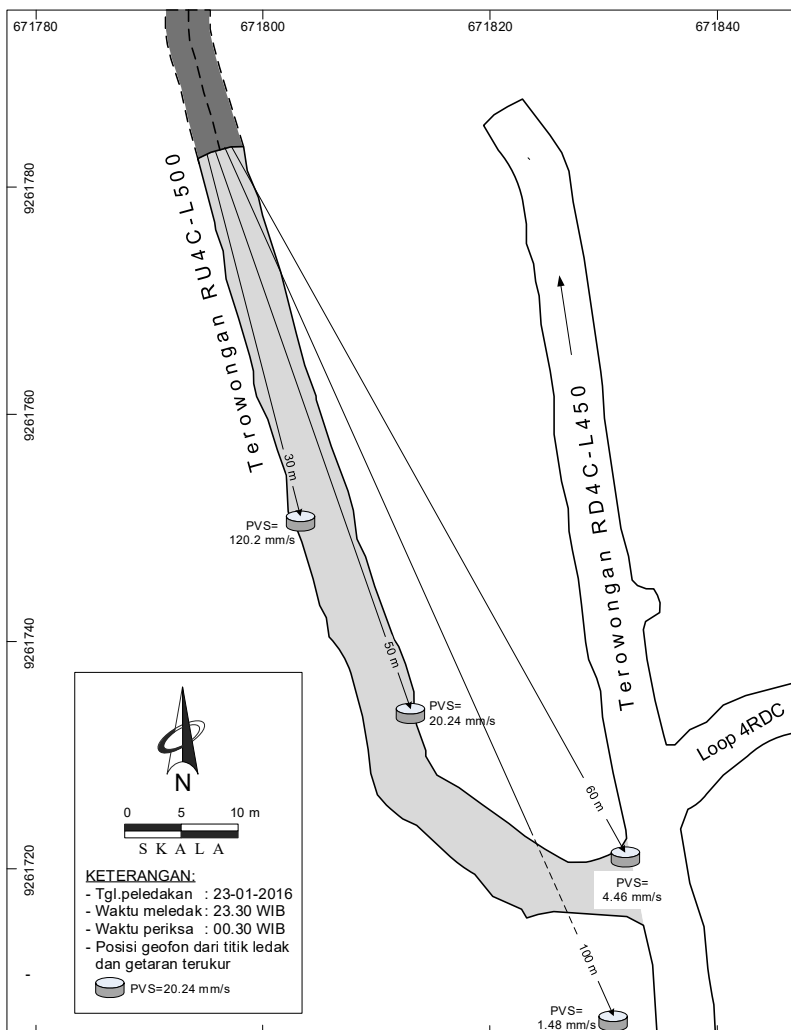
$$RQD_t = 100 e^{-t\lambda} (t\lambda + 1) \quad (1)$$

Di mana:

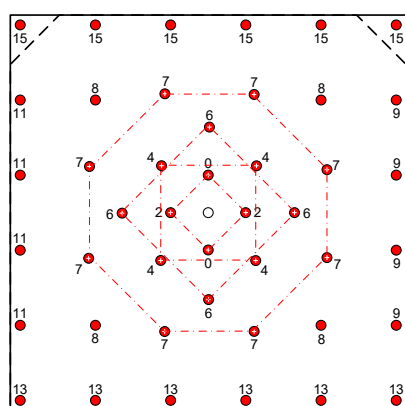
$t = 0,1$; yaitu spasi kekar yang diperhitungkan harus $> 0,1$ m

λ = Frekuensi spasi kekar rata-rata (\bar{x})
populasi kekar = $1/\bar{x}$

Spesifikasi peledakan yang meliputi jumlah dan jenis bahan peledak, pola pengeboran serta pola peledakan yang diterapkan pada setiap peledakan permukaan terowongan maju relatif sama karena pertimbangan bahwa ukuran permukaannya juga sama, yaitu lebar 4 m dan tinggi 4 m (Gambar 9).



Gambar 8. Metode pengukuran getaran peledakan pada terowongan



KETERANGAN:

1. Waktu peledakan:
 - Tanggal 23 Januari 2016.
 - Meledak jam 23:30 WIB.
 - Periksa jam 00:30 WIB.
2. Spesifikasi teknis:
 - a. Dimensi bukaan: 4 m x 4 m
 - b. Diameter lubang 32 mm.
 - c. Kedalaman lubang ledak 1.40 m
 - d. Spasi lubang perimeter 0,75 m
 - e. Jumlah lubang 45, lubang diisi bhn peledak 44 dan 1 lub. kosong.
3. Bahan Peledak:
 - a. Bhn peledak kartrij "dayagel magnum" diameter 30 mm berat 0.182 kg/pcs buatan PT Dahana, Indonesia.
 - b. Detonator dan sumbu ledak:
 - 44 deto nonel delay
 - 1 deto listrik (untuk pemicu)
 - 8 m sumbu ledak (cordtex)

c. Jumlah dan nomor delay deto. serta jumlah bhn peledak:

| Delay detonators | | Bahan peledak | |
|------------------|--------|---------------|-------|
| No. | Jumlah | pcs. | W, kg |
| 0 | 2 | 15 | 2.7 |
| 2 | 2 | 15 | 2.7 |
| 4 | 4 | 28 | 5.1 |
| 6 | 4 | 28 | 5.1 |
| 7 | 8 | 56 | 10.2 |
| 8 | 4 | 28 | 5.1 |
| 9 | 4 | 28 | 5.1 |
| 11 | 4 | 28 | 5.1 |
| 13 | 6 | 42 | 7.6 |
| 15 | 6 | 42 | 7.6 |
| Total | 44 | 310 | 56.4 |

Gambar 9. Spesifikasi peledakan terowongan dengan ukuran permukaan 4 m x 4 m

Pengukuran getaran peledakan menghasilkan besaran dan arah getaran, yaitu getaran ke arah transversal, longitudinal dan vertikal. Ketiga besaran dan arah getaran tersebut akan membentuk suatu vektor dan vektor yang

harus mendapat perhatian adalah vektor yang diperoleh dari getaran tertinggi yang disebut *peak particle velocity* (PPV) atau *peak vector sum* (PVS). Kriteria kerusakan akibat peledakan sangat erat kaitannya dengan besaran PPV atau PVS dan

beberapa ahli telah melakukan pengujian serta menginterpretasi hasilnya pada Tabel 1 (Singh, 2000, dalam Holmberg, 2000).

Yu dan Vongpaisal (1996) mengusulkan *Blast Damage Index* (BDI) atau Indeks Kerusakan Peledakan yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut:

$$BDI = \frac{\text{Tegangan terinduksi}}{\text{Resistensi kerusakan}} = \frac{V \times \gamma \times C}{K_r \times T} \quad (2)$$

Di mana:

V = *peak vector sum* (m/s)

γ = densitas massa batuan (g/cc)

C = kecepatan gelombang kompresi (primer) massa batuan (km/s)

K_r = konstanta kualitas batuan di lapangan, maksimum 1.0

T = kuat tarik dinamik massa batuan (MPa)

Tegangan terinduksi merupakan perkalian dari jumlah vektor kecepatan partikel puncak (pvs) dengan densitas batuan (γ) dan kecepatan gelombang kompresi. Interaksi ketiga parameter tersebut mengakibatkan tegangan tarik dinamis ketika gelombang regangan kompresi (P -

waves) dipantulkan pada bidang-bidang bebas dan menghasilkan fragmentasi batuan atau terjadi keruntuhan.

Resistensi kerusakan adalah kemampuan dari kondisi batuan di lapangan untuk menahan beban dinamis tegangan induksi yang bisa menyebabkan kerusakan akibat ledakan dan dinyatakan dalam bentuk perkalian antara kekuatan tarik dinamik massa batuan dengan kondisi (batuan) di lapangan (Yu dan Vongpaisal, 1996). Ada dua aspek yang harus diperhitungkan dari kondisi lapangan, yaitu (1) kenampakan geologi yang bisa melemahkan massa batuan dan (2) sistem penyanggaan yang memperkuat lubang bukaan. Gabungan kedua aspek tersebut merupakan pengukur kekuatan kondisi lapangan dari kerusakannya akibat ledakan. Apabila gabungan kedua aspek itu cukup kuat menahan tegangan terinduksi, maka keruntuhan tidak akan terjadi. Sebaliknya, apabila gabungan keduanya tidak mendukung kekuatan, misalnya pada kondisi massa batuan terkekarkan atau sistem penyanggaan tidak memadai, maka keruntuhan akibat tegangan terinduksi akan terjadi. Indeks kerusakan peledakan (BDI) dan tipe kerusakannya terdapat pada Tabel 2.

Tabel 1. Kriteria kerusakan akibat peledakan dalam terowongan dari beberapa peneliti

| Peneliti | Peak Particle Velocity | | Kriteria |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|---|
| | In/sec | mm/sec | |
| Bauer & Calder (1970) | <10 | <254 | Tidak ada rekahan batuan utuh |
| | 10-25 | 254-635 | Sedikit rekahan karena tarikan |
| | 25-100 | 635-2540 | Timbul rekahan akibat tarikan yang besar dan rekahan radial |
| | >100 | >2540 | Massa batuan hancur |
| Lanfegors & Kihlstrom (1973) | 12 | 305 | Runtuhan batuan di dinding terowongan yang tidak disemen |
| | 24 | 610 | Timbul formasi rekahan baru |
| Oriard (1982) | 25 | 635 | Kerusakan terjadi pada hampir semua jenis batuan |
| Yu & Crovall (1985) | 10 | 250 | Kerusakan mulai terlihat |
| Fadeev (1987) | | 120 | Terjadi bukaan (rekahan) primer |
| | | 480 | Terjadi bukaan (rekahan) sekunder |
| Adhikari, et al (1994) | RMR=60 | RMR=38 | |
| | mm/sec | mm/sec | |
| | <153 | <52 | Tidak ada kerusakan |
| | 153-217 | 52-195 | Mulai ada rekahan |
| | 127-367 | 195-297 | Jatuhnya batuan kecil yang tidak terikat |
| 367-604 | 297-557 | Timbul rekahan terinduksi | |
| >604 | >557 | Kerusakan yang besar | |
| Singh (2000) | | 50-400 | Kerusakan kecil |
| | | 200-700 | Kerusakan medium (sedang) |
| | | 600-2000 | Kerusakan agak banyak |

Tabel 2. Blast Damage Index (BDI) dan tipe kerusakan (Yu dan Vongpaisal, 1996)

| BDI | Tipe Kerusakan |
|--------|---|
| ≤0,125 | Tidak ada kerusakan penggalian bawah tanah Nilai maksimum yang diijinkan untuk bukaan permanen, misalna ruang crusher, sumuran pertokoan, tempat penampungan bijih, rumah pompa, dan sebagainya |
| 0,25 | Kerusakan tidak terlihat jelas Nilai toleransi maksimum untuk tempat kerja jangka panjang, misalnya sumuran akses, stasiun tim penyelamat, ruang makan, stasiun, pertokoan, lubang ventilasi, <i>ore passes</i> , dan sebagainya |
| 0,5 | Ada sedikit retakan Nilai toleransi maksimum untuk tempat kerja jangka menengah, misalnya <i>main drifts</i> , jalan angkutan utama, dan sebagainya |
| 0,75 | Ada retakan diskontinu berjumlah sedang Nilai toleransi maksimum untuk tempat kerja sementara, misalnya <i>cross-cut</i> , <i>drill drifts</i> , lombong, dan sebagainya |
| 1 | Ada banyak runtunan menerus, memerlukan rehabilitasi yang intensif |
| 1,5 | Ada kerusakan disekeliling lubang bukaan, menyebabkan sulit atau tidak mungkin direhabilitasi |
| ≥2,0 | Terjadi ambrukan, biasanya terdapat pada lubang akses yang tidak dipakai lagi |

Metode BDI dapat digunakan untuk mengestimasi kerusakan konstruksi di tambang bawah tanah akibat induksi peledakan dari tambang bawah tanah (Kumar, 2015). Kriteria kerusakan akibat peledakan pada terowongan RU4C-L500 akan dievaluasi berdasarkan pada metode BDI dan hasil penelitian.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

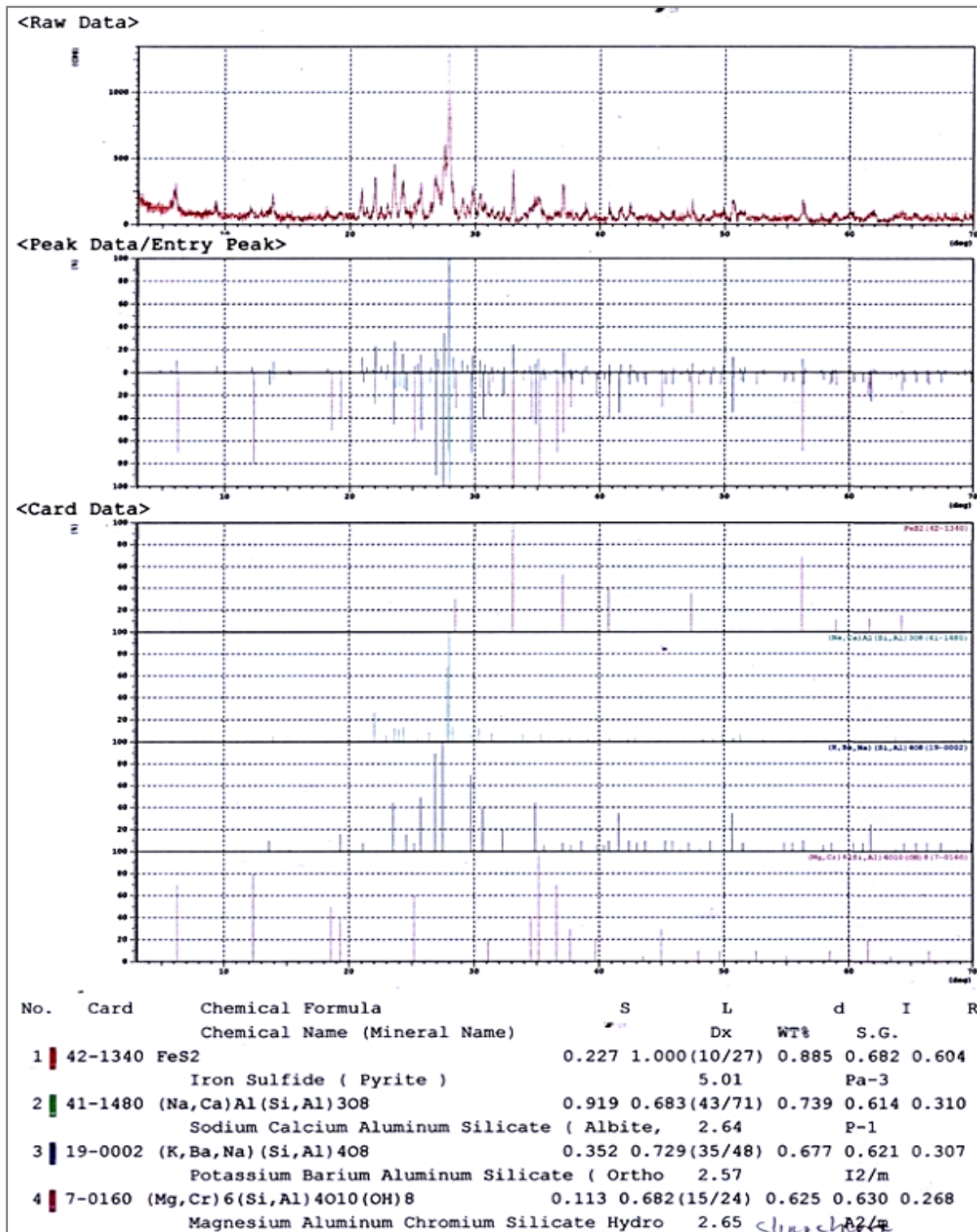
Pengujian sinar-X difraksi (XRD) terhadap sampel batuan di sekitar terowongan RU4C-L500 memperlihatkan dominasi kandungan mineral silika (SiO₂) menyusul plagioklas dengan komposisi kalsium dan sodium (Na,Ca)(Si,Al)₄O₈, albit (Na,Ca)Al(Si,Al)₃O₈, pirit (FeS₂), dan terdapat pula kalsit (CaCO₃). Berdasarkan hasil pengujian XRD jenis mineral dan komposisi kimianya terindikasi bahwa massa batuan yang diterobos terowongan adalah andesit vulkanik (Gambar 10).

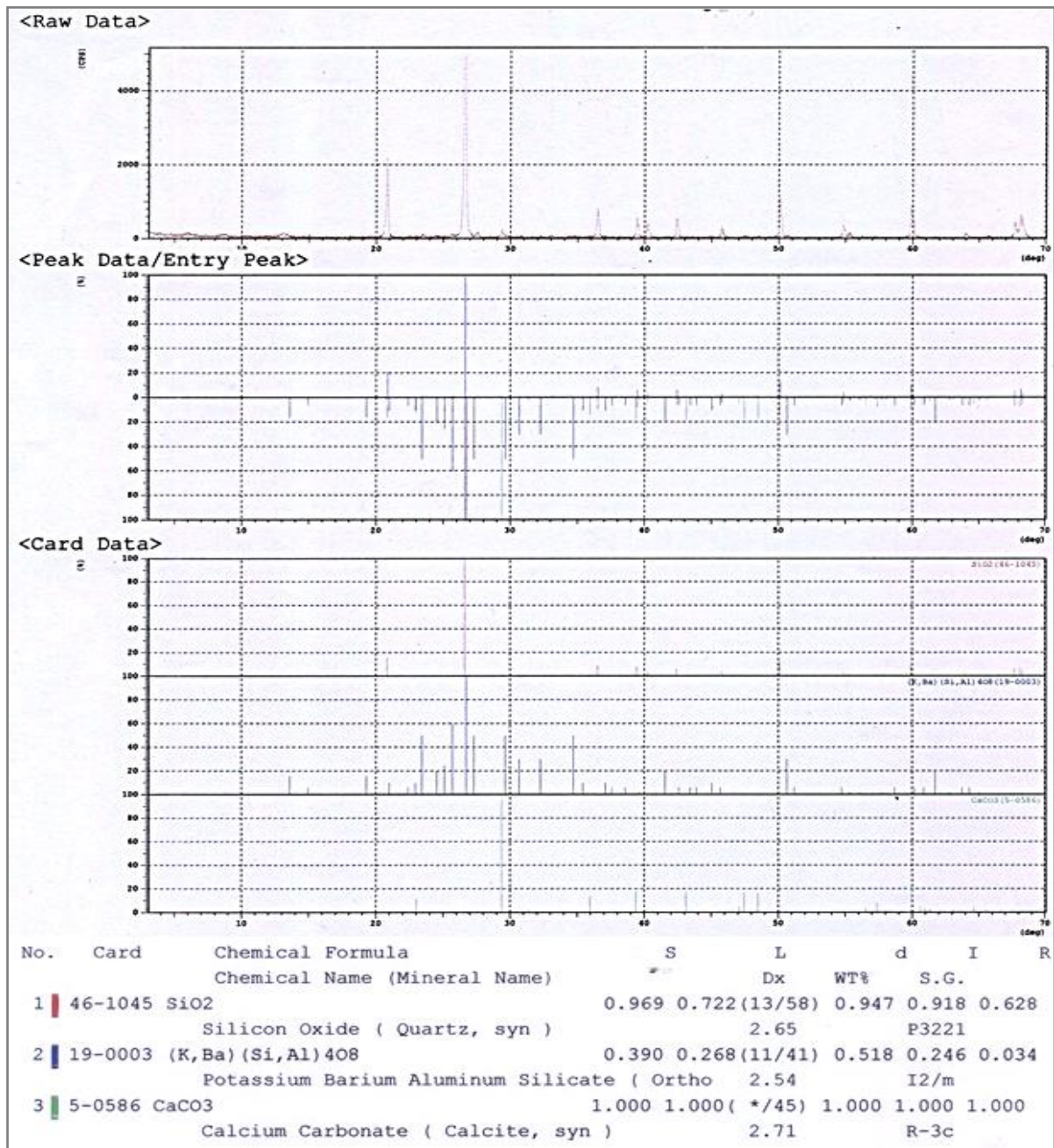
Berdasarkan survei garis-bentang diperoleh data yang diperlukan untuk mengkarakterisasi massa batuan di sekitar terowongan RU4C-L500, yaitu mengetahui spasi kekar, kondisi kekar dan orientasi kekar terhadap sumbu terowongan pada setiap segmen. Spasi kekar dan kondisi kekar berpengaruh terhadap pembentukan fragmentasi hasil peledakan, sedangkan orientasi kekar terhadap sumbu terowongan lebih mengarah pada

kestabilan terowongan. Panjang garis-bentang untuk pengukuran spasi kekar di dalam terowongan pada Segmen-1, Segmen-2 dan Segmen-3 adalah 71,27 m dan pada permukaan F1, F2 dan F3 adalah 12,72 m (Gambar 2). Dengan demikian, spasi kekar diukur dan sekaligus diamati kondisinya sepanjang garis-bentang 83,99 m. Pengukuran menghasilkan spasi kekar terpanjang 2,45 m, terpendek 0,12 m dan spasi rata-rata 0,92 m ± 0,59 m dengan jumlah kekar yang diamati 91 kekar (Gambar 11). Dari Gambar 11 terlihat bahwa spasi kekar 0,40 m dan 0,70 m paling sering ditemukan, yaitu masing-masing 24% dan 23%, sementara spasi kekar 1 m adalah 16% dan spasi kekar di atas 1 m kurang dari 10%. Spasi kekar rata-rata pada Segmen-1 adalah 0,58 m, Segmen-2 sebesar 0,69 m dan pada Segmen-3 adalah 1,57 m. Berdasarkan frekuensi distribusi pada Gambar 11, teramati bahwa spasi kekar pada Segmen-1 dan -2 lebih rapat dibanding pada Segmen-3. Fenomena kerapatan spasi kekar disamping ditengarai akan memperkecil ukuran fragmentasi hasil peledakan, tetapi juga akan menjadi salah satu penyebab *overbreak*. Dari hasil pengukuran fragmentasi peledakan secara random di lapangan diketahui bahwa ukuran fragmen terbesar sekitar 0,30 m. Distribusi fragmentasi tersebut akan menguntungkan karena dapat meningkatkan *digging rate* pada proses pemindahannya.

Bagian yang merugikan dari spasi kekar yang rapat adalah rentan terhadap kemungkinan terjadinya *overbreak* pada dinding dan atap terowongan akibat induksi getaran peledakan (Hoek, 2006). Hasil pengukuran di lapangan pasca peledakan membuktikan adanya penambahan lebar

dan tinggi secara tidak merata dari ukuran yang direncanakan. Realisasinya lebar dan tinggi terowongan bertambah antara 1,0 m sampai 2,0 m, walaupun tidak selalu sama antara penambahan ke arah lebar dan tingginya.





Gambar 10. Hasil pengujian XRD batuan andesit vulkanik

Pengamatan kondisi kekar meliputi panjang kekar, kerenggangan, kekasaran permukaan, ada tidaknya material pengisi pada bidang kekar dan pelapukan permukaan kekar. Kondisi kekar disepanjang terowongan RU4C-L500 pada umumnya memiliki permukaan yang agak kasar, kerenggangan rata-rata kurang dari 1 mm dan pelapukan pada bidang kekar tidak intensif. Sementara kondisi air tanah yang teramati pada permukaan bidang kekar maupun dinding terowongan

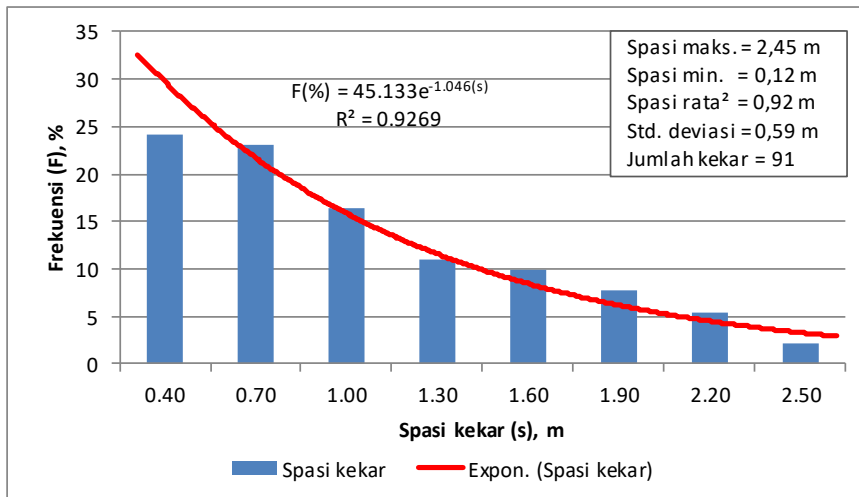
umumnya berada pada kondisi lembab sampai kering.

Nilai parameter kuat tekan atau *uniaxial compressive strength* (UCS) yang diperoleh dari hasil pengujian *core sample* adalah $43,51 \pm 11,87$ MPa dan untuk pengklasifikasian massa batuan andesit vulkanik diambil rata-rata 43,51 MPa. Parameter RQD dihitung menggunakan Persamaan (1) dengan data hasil pengukuran spasi kekar. Seluruh spasi

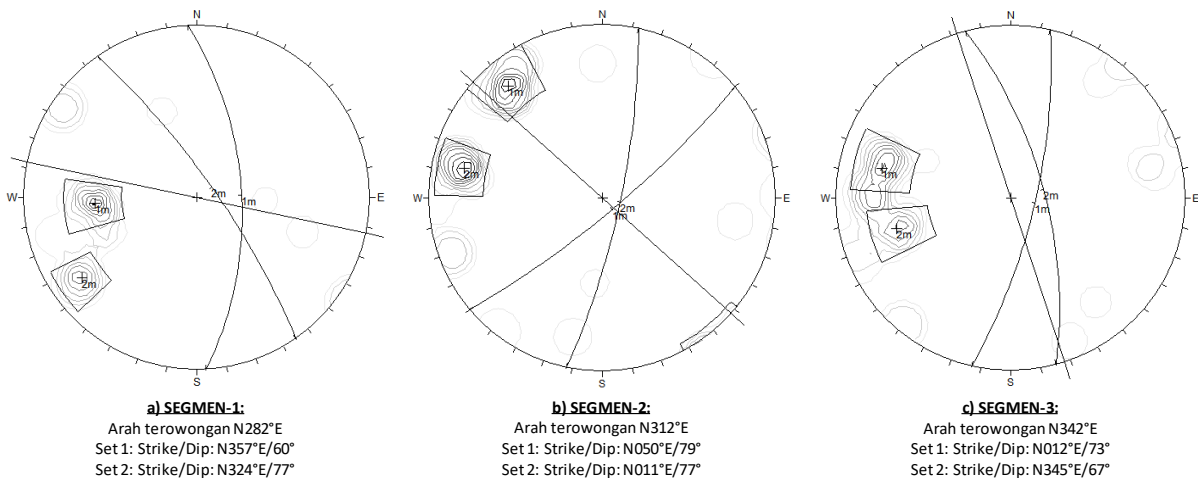
kekar yang terukur di dalam terowongan RU4C-L500 berjumlah 91 spasi dengan spasi kekar terpendek 0,12 m atau $t > 0,10$ m. Dengan demikian seluruh data spasi kekar dapat diperhitungkan untuk memperoleh parameter RQD pada setiap segmen dan hasilnya RQD Segmen-1 99,80%, Segmen-2 99,89% dan Segmen-3 98,66%.

Pengukuran jurus dan kemiringan kekar dilaksanakan bersamaan dengan pengukuran spasi dan kondisi kekar. Hasil pengukuran menunjukkan terdapat dua orientasi kekar utama yang memotong sumbu terowongan RU4C-L500 dengan rincian setiap segmen sebagai berikut:

- (a) Pada Segmen-1 orientasi kekar membentuk sudut lebih kecil dari 90° , yaitu antara 42° sampai 72° (Gambar 12.a),
- (b) Pada Segmen-2, terdapat orientasi kekar yang membentuk sudut mendekati tegak lurus terhadap sumbu terowongan, yaitu antara 59° sampai 98° (Gambar 12.b),
- (c) Pada Segmen-3, orientasi kekar sebagian besar mendekati sejajar dengan sumbu terowongan, yaitu membentuk sudut antara 3° sampai 30° (Gambar 12.c).



Gambar 11. Spasi kekar pada terowongan RU4C-L500



Gambar 12. Orientasi bidang kekar terhadap sumbu terowongan pada setiap segmen

Orientasi bidang kekar terhadap sumbu terowongan berperan sebagai faktor koreksi yang mengurangi bobot klasifikasi massa batuan. Pada Segmen-1 dan Segmen-2 terdapat dua set bidang kekar dengan kemiringan (*dip*) cukup tajam, yaitu antara 60° sampai 79° , dan arahnya melawan (*against*) arah kemajuan terowongan; sedangkan jurus dari dua set kekar pada kedua segmen tersebut berorientasi memotong sumbu terowongan, bahkan ada tiga set kekar yang bisa dikatakan hampir tegak lurus. Efek orientasi jurus dan kemiringan bidang kekar terhadap sumbu terowongan tergolong sedang (*fair*) dan mengakibatkan pengurangan bobot klasifikasi sebagai koreksi terhadap orientasi tersebut sebesar -5. Sedangkan jurus dari dua set bidang kekar pada Segmen-3 bisa dianggap sejajar, bahkan salah satunya sangat mendekati kesejajaran sumbu terowongan. Kondisi tersebut memberikan efek sangat tidak disukai (*very unfavourable*) dengan faktor koreksi sebesar -12 sebagai pengurang bobot klasifikasi.

Bidang kekar yang memotong sumbu terowongan pada Segmen-1 dan Segmen-2 selaras dengan hasil pengamatan spasi kekarnya yang rapat. Peledakan sepanjang Segmen-1 dan Segmen-2 menghasilkan fragmentasi maksimum sekitar 0,30 m, karena energi impact dari gelombang kejut akan membentur tegak lurus dengan dinding bidang kekar, sehingga hasilnya menjadi pecahan fragmen batuan yang berukuran kecil. Sementara pada Segmen-3, yang orientasi bidang kekarnya mendekati sejajar dengan sumbu terowongan, energi impact dari gelombang kejut banyak yang cenderung menyusup ke dalam rekahan-rekahan yang searah dengan jurus bidang kekar tersebut. Dengan demikian, proses pecahnya batuan terjadi karena energi ledakan membelah massa batuan dan menghasilkan ukuran fragmentasi yang relatif lebih besar dibanding pada Segmen-1 dan Segmen-2, yaitu sekitar 0,50 m.

Ditinjau dari aspek keselamatan kerja, Segmen-1 dan Segmen-2 memiliki *stand-*

up time sekitar 1 tahun setiap 10 m panjang terowongan, sedangkan pada Segmen-3 hanya 1 minggu setiap 5 m panjang terowongan (Tabel 3). *Stand-up time* menunjukkan waktu kemampuan terowongan untuk menyangga dirinya sendiri tanpa runtuh (Terzaghi dan Stini, 1958, dalam Hoek dan Brown, 1980). Batas nilai RMR Klas II adalah 61 sampai 80, jadi walaupun Segmen-1 dan 2 tergolong massa batuan Klas II dan Segmen-3 tergolong batuan Klas III, maka atas pertimbangan keselamatan kerja batuan yang diterobos terowongan RU4C-L500 perlu perkuatan dengan pemasangan *rock-bolt* dikombinasi dengan *wire-mesh* dan *split-set*, bahkan pada titik tertentu yang rawan harus dipasang penyangga baja atau *steel-support*.

Pembobotan spasi dan kondisi kekar, kondisi air tanah serta orientasi jurus dan kemiringan bidang kekar terhadap sumbu terowongan didasarkan atas hasil pengamatan di lapangan. Sedangkan bobot parameter kuat tekan uniaksial diperoleh dari pengujian contoh batuan. Hasil pembobotan setiap parameter tersebut menggambarkan nilai RMR pada setiap segmen seperti terlihat pada Tabel 3. Nilai RMR tersebut adalah RMR terkoreksi dari orientasi kekar terhadap sumbu terowongan. Rincian nilai RMR pada setiap segmen adalah sebagai berikut:

- (a) Segmen-1 dengan RMR: 69,5 atau tergolong batuan Klas II (*good rock*),
- (b) Segmen-2 dengan RMR: 66,5 masih tergolong batuan Klas II,
- (c) Segmen-3 dengan RMR: 58,3 yang tergolong pada batuan Klas III (*fair rock*) atau massa batuan dengan kekuatan sedang.

Pada batuan tersebut dikenakan peledakan untuk pembuatan terowongan dengan pola dan spesifikasi peledakan seperti terlihat pada Gambar 9. Alat bor yang digunakan bertipe *jackdrill* berdiameter lubang bor 32 mm dan hanya mampu membuat lubang dengan kedalaman maksimum 1,40 m. Setiap kali

peledakan untuk kemajuan terowongan diperlukan jumlah lubang ledak rata-rata 45 lubang dengan rincian 44 lubang diisi bahan peledak dan 1 lubang ledak kosong. Jumlah bahan peledak total (W_{et}) yang dimasukkan ke dalam setiap lubang ledak antara 290 kg sampai 330 kg dan jumlah bahan peledak per waktu tunda atau *delay time* (W_{ed}) yang diperhitungkan dalam analisis getaran berkisar antara 6,40 kg sampai 10,6 kg (Tabel 4). Ke dalam setiap lubang ledak dimasukkan bahan peledak primer pada bagian dasar lubang. Bahan peledak primer adalah bahan peledak peka detonator yang sudah disisipkan detonator ke dalamnya berfungsi sebagai pemicu awal peledakan (Dick *et al.* 1983). Kemajuan terowongan rata-rata 1 m per siklus sesuai dengan spesifikasi panjang batang bor yang digunakan.

Berdasarkan hasil peledakan diperoleh hubungan antara jarak (D) dari pusat ledakan dengan vektor kecepatan getaran peledakan (PVS) pada jenis batuan andesit vulkanik dengan RMR antara 58 sampai 69 (Gambar 13). Kurva pada Gambar 13 memperlihatkan peluruhan getaran pada jarak yang semakin jauh dari pusat ledakan. Pada jarak kurang dari 10 m dari pusat ledakan dihasilkan getaran di atas 140 mm/s kemudian meluruh secara tajam sampai jarak 30 m menjadi 16 mm/s. Selanjutnya peluruhan getaran terjadi tidak tajam sampai hilang pada jarak di atas 100 m. Dengan menggunakan kurva tersebut dapat diestimasi nilai PVS pada jarak tertentu dalam terowongan dengan mengikuti persamaan $PVS = 11548 D^{-1.933}$.

Tabel 3. Nilai RMR pada Segmen-1, Segmen-2 dan Segmen-3

| No. | Parameter | Segmen 1 | | Segmen 2 | | Segmen 3 | |
|-----|------------------|---|-------|---|-------|---|-------|
| | | Nilai | Bobot | Nilai | Bobot | Nilai | Bobot |
| 1 | UCS | 43,51 | 4 | 43,51 | 4 | 43,51 | 4 |
| 2 | RQD | 99,73 | 20 | 99,55 | 20 | 99,82 | 20 |
| 3 | SK | 1,34 | 15 | 1,02 | 15 | 1,19 | 15 |
| 4 | KK | | 20,7 | | 19,1 | | 18,1 |
| 5 | GW | Kering | 14,7 | Kering-lembab | 13,4 | Kering-lembab | 13,2 |
| 6 | OK | Orientasi kekar dengan dip 45-90° tegak lurus (memotong) arah terowongan membuat sudut 42-72° | | Orientasi kekar dengan dip 45-90° tegak lurus (memotong) arah terowongan membuat sudut 59-98° | | Orientasi kekar dengan dip 45-90° sejajar arah terowongan membentuk sudut 3-30° | |
| | Koreksi km. OK | Sedang (fair) | -5 | Sedang (fair) | -5 | Sangat tidak menguntungkan | -12 |
| 7 | RMR (terkoreksi) | | 69,5 | | 66,5 | | 58,3 |
| 8 | KLAS | II (batuan baik/ good rock) | | II (batuan baik/ good rock) | | II (batuan sedang/ fair rock) | |
| 9 | SUC | 1 tahun / 10 m panjang | | 1 tahun / 10 m panjang | | 1 minggu / 5 m panjang | |
| 10 | c | 300-400 kPa | | 300-400 kPa | | 200-300 kPa | |
| 11 | φ | 30-45° | | 30-45° | | 25-35° | |

Keterangan:

UCS = Kuat tekan uniaksial, MPa

RQD = Rock Quality Designation, %

SK = Spasi kekar

KK = Total bobot kondisi bidang kekar

GW = Kondisi air tanah

OK = Orientasi bidang kekar pada sumbu terowongan

KLAS = Klas massa batuan

SUT = Stand-up Time

c = Kohesi, kPa

φ = Sudut gesek dalam, °

Untuk mengetahui kriteria kerusakan berdasarkan BDI digunakan Persamaan (1) dan dihubungkan dengan jarak yang berbeda-beda. Pada D yang berbeda akan diperoleh PVS yang berbeda pula, sehingga nilai BDI pada setiap jarak tertentu dapat dihitung (Tabel 5). Berdasarkan hasil perhitungan tersebut

selanjutnya dapat dibuat grafik hubungan antara D dan BDI untuk mempermudah interpretasi jenis kerusakan yang terjadi pada dinding terowongan dengan jarak tertentu (Gambar 14). Disamping itu untuk mengestimasi pengaruh peningkatan PVS terhadap BDI bisa dibuat grafik seperti terlihat pada Gambar 15.

Tabel 4. Hasil pengukuran getaran peledakan dalam bentuk *Peak Vector Sum (PVS)*

| No. | Tanggal | Alat ukur | D | W _{et} | W _{ed} | Tran Peak | Vert Peak | Long Peak | PVS (mm/s) | | D ⁶⁾ |
|-----|-------------------------|-----------|-------------------|--------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|--------------------|---------------------------------|
| | | | (m) ¹⁾ | (kg) ²⁾ | (kg/dl) ³⁾ | (mm/s) | (mm/s) | (mm/s) | Hitung ⁴⁾ | Ukur ⁵⁾ | W _{ed} ^{0,19} |
| 1 | 4-Nov-15 | BA18917 | 20 | 290 | 6,40 | 16,64 | 11,81 | 15,62 | 25,70 | 21,53 | 14,06 |
| 2 | | BA15372 | 45 | 290 | 6,40 | 2,286 | 2,159 | 1,524 | 3,494 | 3,208 | 31,63 |
| 3 | 6-Nov-15 | BA18917 | 20 | 290 | 7,30 | 27,30 | 40,64 | 26,03 | 55,45 | 44,37 | 13,71 |
| 4 | | BA15372 | 45 | 290 | 7,30 | 4,445 | 3,556 | 2,794 | 6,341 | 6,181 | 30,84 |
| 5 | 9-Nov-15 | BA18917 | 20 | 310 | 7,30 | 6,398 | 8,684 | 9,588 | 14,43 | 11,53 | 13,71 |
| 6 | | BA15372 | 30 | 310 | 7,30 | 5,334 | 7,112 | 5,699 | 10,56 | 8,325 | 20,56 |
| 7 | | BA16467 | 45 | 310 | 7,30 | 3,175 | 5,715 | 3,429 | 7,382 | 6,487 | 30,84 |
| 8 | 10-Nov-15 | BE18090 | 50 | 310 | 7,30 | 1,905 | 2,715 | 2,191 | 3,975 | 3,147 | 34,27 |
| 9 | | BA18917 | 20 | 314 | 10,2 | 21,34 | 18,29 | 11,81 | 30,49 | 29,35 | 12,86 |
| 10 | | BE18090 | 30 | 314 | 10,2 | 6,223 | 8,763 | 4,826 | 11,78 | 10,77 | 19,30 |
| 11 | | BA16467 | 45 | 314 | 10,2 | 4,000 | 4,366 | 2,842 | 6,568 | 4,960 | 28,95 |
| 12 | | BA15372 | 55 | 314 | 10,2 | 0,889 | 1,016 | 2,159 | 2,546 | 2,170 | 35,38 |
| 13 | 13-Nov-15 | BE18090 | 20 | 294 | 10,4 | 30,48 | 19,18 | 17,40 | 40,00 | 39,41 | 12,82 |
| 14 | | BA15372 | 30 | 294 | 10,4 | 5,080 | 9,906 | 3,302 | 11,61 | 10,19 | 19,23 |
| 15 | | BA18917 | 45 | 294 | 10,4 | 6,699 | 7,080 | 7,382 | 12,23 | 9,046 | 28,84 |
| 16 | | BA16467 | 60 | 294 | 10,4 | 3,937 | 3,683 | 2,508 | 5,946 | 4,630 | 38,45 |
| 17 | 24-Nov-15 | BA15372 | 20 | 318 | 7,30 | 24,84 | 20,22 | 20,61 | 38,09 | 29,34 | 13,71 |
| 18 | | BA16467 | 40 | 318 | 7,30 | 12,06 | 14,99 | 7,620 | 20,69 | 15,01 | 27,42 |
| 19 | | BA18917 | 55 | 318 | 7,30 | 1,270 | 1,889 | 1,667 | 2,821 | 2,110 | 37,70 |
| 20 | 25-Nov-15 | UM7463 | 20 | 294 | 10,2 | 33,04 | 61,91 | 45,57 | 83,67 | 69,96 | 12,86 |
| 21 | | UM7462 | 40 | 294 | 10,2 | 5,178 | 5,328 | 3,712 | 8,305 | 7,444 | 25,73 |
| 22 | | UM7466 | 55 | 294 | 10,2 | 2,049 | 2,719 | 1,750 | 3,828 | 2,908 | 35,38 |
| 23 | 27-Nov-15 | UM7466 | 20 | 310 | 10,2 | 16,51 | 61,16 | 21,75 | 66,98 | 62,75 | 12,86 |
| 24 | | UM7462 | 40 | 310 | 10,2 | 9,398 | 8,001 | 7,493 | 14,44 | 11,55 | 25,73 |
| 25 | | UM7465 | 30 | 310 | 10,4 | 18,07 | 31,42 | 16,12 | 39,67 | 36,66 | 19,23 |
| 26 | 20-Jan-16 | UM7463 | 40 | 310 | 10,4 | 8,260 | 6,053 | 7,905 | 12,94 | 11,46 | 25,63 |
| 27 | | UM7466 | 60 | 310 | 10,4 | 7,488 | 8,552 | 5,123 | 12,47 | 8,676 | 38,45 |
| 28 | | UM7462 | 70 | 310 | 10,4 | 2,514 | 2,049 | 2,278 | 3,963 | 3,421 | 44,86 |
| 29 | 22-Jan-16 | UM7462 | 20 | 330 | 6,40 | 24,50 | 21,78 | 34,28 | 47,43 | 40,18 | 14,06 |
| 30 | | UM7465 | 50 | 330 | 6,40 | 11,70 | 9,159 | 7,433 | 16,61 | 14,89 | 35,14 |
| 31 | | UM7463 | 60 | 330 | 6,40 | 8,237 | 7,858 | 4,169 | 12,12 | 11,30 | 42,17 |
| 32 | | UM7466 | 75 | 330 | 6,40 | 1,978 | 1,561 | 1,056 | 2,732 | 2,358 | 52,71 |
| 33 | 23-Jan-16 | UM7463 | 30 | 310 | 10,6 | 116,5 | 45,96 | 34,81 | 130,0 | 120,2 | 19,16 |
| 34 | | UM7462 | 50 | 310 | 10,6 | 10,30 | 17,32 | 11,52 | 23,21 | 20,24 | 31,93 |
| 35 | | UM7466 | 60 | 310 | 10,6 | 3,783 | 3,641 | 2,301 | 5,733 | 4,460 | 38,31 |
| 36 | | UM7465 | 100 | 310 | 10,6 | 1,340 | 0,607 | 0,993 | 1,775 | 1,480 | 63,85 |
| 37 | 25-Jan-16 ⁷⁾ | UM7462 | 30 | 8,2 | 1,60 | 3,799 | 5,336 | 5,925 | 8,850 | 6,760 | 27,44 |
| 38 | | UM7465 | 50 | 8,2 | 1,60 | 2,475 | 2,822 | 3,925 | 5,431 | 4,550 | 45,73 |
| 39 | | UM7463 | 60 | 8,2 | 1,60 | 2,041 | 3,176 | 1,860 | 4,209 | 3,310 | 54,87 |

Keterangan:

¹⁾Jarak (m)

²⁾Berat total bahan peledak (kg)

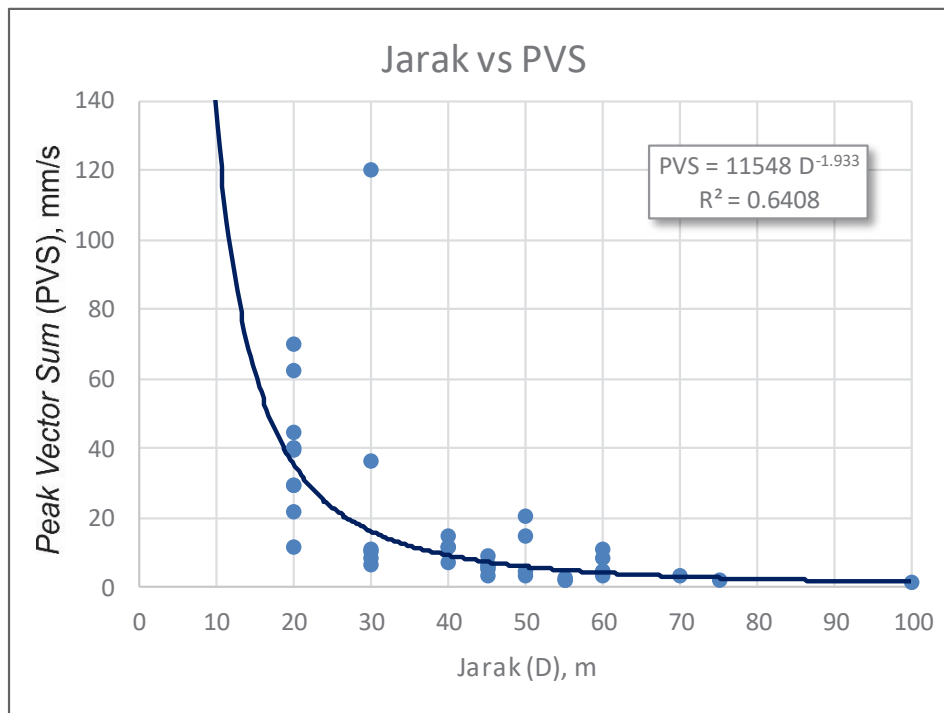
³⁾Berat bahan peledak per waktu tunda (kg/dl)

⁴⁾PVS= (T²+V²+L²)^{0,5}

⁵⁾PVS hasil pengukuran geofone

⁶⁾ $\frac{D}{W_{ed}^{0,19}}$ =Scale Distance (m/kg^{0,19})

⁷⁾Meratakan lantai terowongan



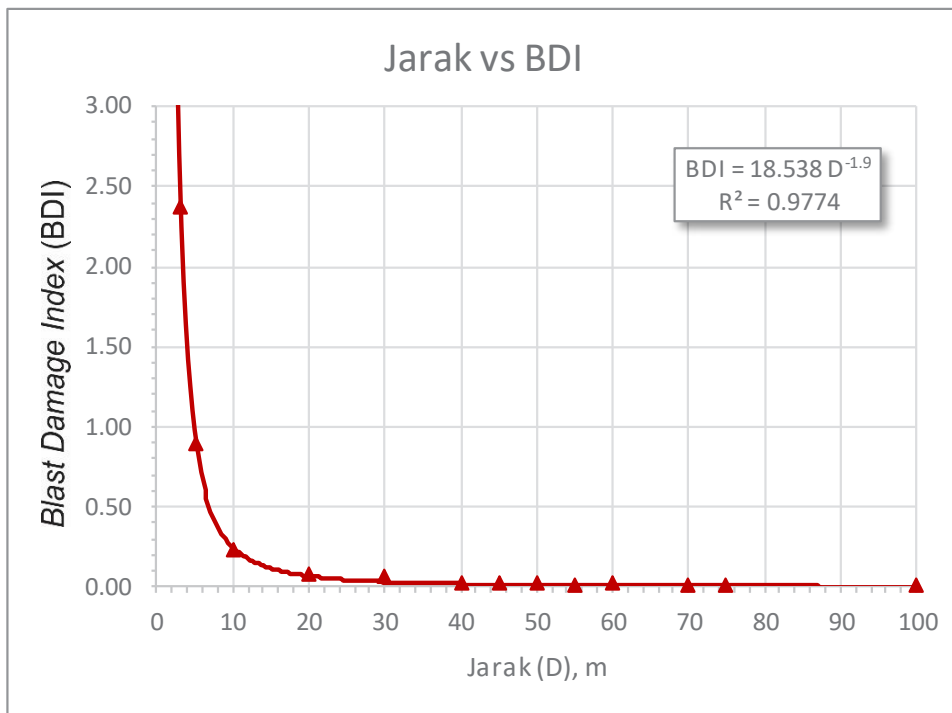
Gambar 13. Grafik hubungan D dan PVS

Tabel 5. Hasil pengukuran BDI pada jarak yang berbeda dari titik ledak

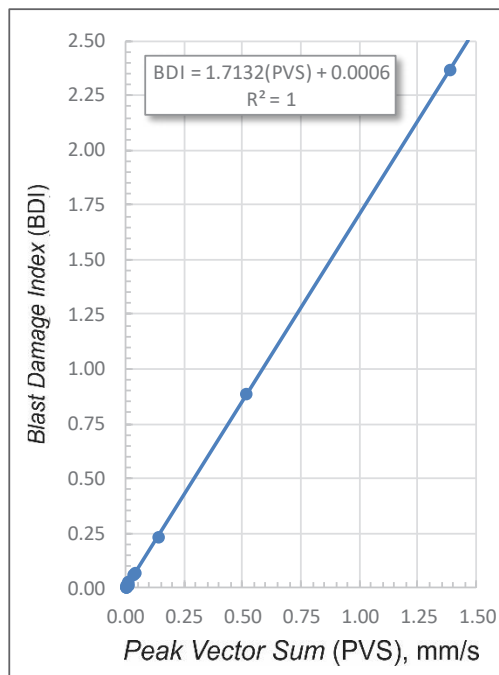
| Jarak (m) | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 70 | 75 | 100 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PVS (m/s) | 3,0242 | 1,3811 | 0,5145 | 0,1347 | 0,0387 | 0,0322 | 0,0114 | 0,0060 | 0,0107 | 0,024 | 0,0065 | 0,0034 | 0,0024 | 0,0015 |
| γ (g/cc) | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 | 2,37 |
| C (km/s) | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,10 | 4,81 | 4,81 | 3,70 | 4,70 | 4,84 | 4,59 | 4,59 | 4,56 |
| K_r | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| T (Mpa) | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 | 8,10 |
| BDI | 5,1828 | 2,3669 | 0,8818 | 0,2309 | 0,0663 | 0,0551 | 0,0228 | 0,0120 | 0,0166 | 0,0037 | 0,0131 | 0,0066 | 0,0045 | 0,0028 |

Grafik pada Gambar 14 dan 15 memberikan gambaran tentang kriteria kerusakan dinding terowongan RU4C-L500 pada batuan andesit vulkanik yang memiliki bobot RMR antara 58,3 sampai 69,5. Grafik pada Gambar 14 memperlihatkan BDI yang naik tajam pada jarak kurang dari 10 m, sedangkan pada jarak di atas 10 m peluruhan BDI terjadi tidak tajam dan terus turun mendekati nol seiring dengan jarak yang semakin jauh dari pusat ledakan. Dengan demikian, berdasarkan grafik itu pula dapat diestimasi jarak kritis (D kritis), yaitu jarak dari pusat ledakan yang mengalami ambruk pada dinding dan atap terowongan akibat induksi getaran peledakan dengan indikator BDI : 2 (Tabel 2). Akibat ambruk akan terjadi *overbreak*

yang menyebabkan terjadi penambahan lebar serta tinggi terowongan menjadi 4,5 m sampai 6 m dan penambahan volume fragmentasi yang harus dipindahkan. Adapun jarak kritis dengan BDI : 2 diestimasi menggunakan persamaan BDI : $18,538 D^{-1,9}$ (Gambar 14) dan hasilnya adalah 3,23 m. Selanjutnya dengan menggunakan grafik pada Gambar 15 dapat diestimasi PVS kritis, yaitu PVS yang menghasilkan getaran peledakan tepat pada nilai $BDI \geq 2$ di mana terjadi ambruk pada bagian dinding dan atap terowongan (Tabel 2). PVS kritis diestimasi menggunakan persamaan BDI : $1,7132 PVS + 0,0006$ (Gambar 15) dan hasilnya adalah 1,17 m/s (= 1170 mm/s).



Gambar 14. Grafik hubungan D dan BDI



Gambar 15. Grafik hubungan PVS dan BDI

Kondisi di atas sebagian besar terbukti dari hasil pengamatan di lapangan memperlihatkan bahwa pada jarak kurang dari 5 m dari pusat ledakan terjadi retakan yang panjang dengan jumlah sedang dan pada jarak kurang dari 3 m dari pusat ledakan terjadi ambrukan dinding dan atap dari terowongan. Dengan demikian,

fragmentasi batuan yang diangkut atau dikeluarkan dari terowongan tidak saja dihasilkan oleh peledakan permukaan terowongan, tetapi juga mendapat tambahan fragmentasi dari runtuh dinding dan atap terowongan sepanjang 3 m dari pusat peledakan tersebut. Apabila peledakan pada permukaan terowongan

terjadi *overbreak*, maka volume fragmentasi batuan akan bertambah lagi. Peningkatan volume hasil peledakan dari *overbreak* dan dari keruntuhan dinding serta atap sepanjang 3 m memberikan dampak, yaitu:

- (a) waktu pemuatan (*mucking*) bertambah lama yang berakibat peningkatan waktu siklus penerowongan,
- (b) lebar terowongan melebihi rancangan semula dan berpotensi terjadi keruntuhan akibat *span* bertambah, sehingga perlu tambahan sistem penyanggaan untuk menjamin keselamatan kerja, dan
- (c) biaya meningkat, baik dari biaya pemuatan karena siklus waktunya bertambah lama maupun dari biaya sistem penyanggaan.

Perbaikan dilakukan dengan mengurangi spasi lubang ledak pada perimeter terowongan, yaitu lubang ledak pada dinding, atap dan lantai, dari 0,75 m menjadi 0,60 m ditambah panjang *look out* pada ujung lubang 0,20 m. Dengan demikian spasi lubang ledak dipermukaan terowongan adalah 0,60 m dan pada ujung lubang ledak, yaitu di dalam batuan pada kedalaman 1,40 m, spasinya menjadi 0,80 m. Dengan proses pengeborannya cukup presisi diperoleh dimensi lebar dan tinggi terowongan rata-rata 4 m. Walaupun demikian, *overbreak* pada titik-titik tertentu sepanjang terowongan RU4C-L500 tetap saja ada karena proses fragmentasi juga dikontrol oleh kerapatan spasi kekar yang bervariasi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kriteria kerusakan pada pembuatan terowongan RU4C-L500 ditandai oleh adanya ambruk dinding dan atap akibat induksi getaran peledakan pada jarak kurang dari 3,0 m dari titik ledakan dengan BDI ≥ 2 yang merupakan getaran kritis dengan PVS mencapai 1170 mm/s. Selanjutnya pada jarak antara 3,0 m sampai 10 m kerusakan terowongan tidak parah karena masih dapat direhabilitasi.

Kondisi tersebut diidentifikasi oleh BDI antara 0,5 sampai 1,0. Induksi getaran peledakan tidak lagi berpengaruh terhadap kestabilan dinding terowongan pada jarak di atas 10 m.

Pengkajian selanjutnya disarankan melakukan pengukuran tambahan volume fragmentasi akibat *overbreak* pada setiap kemajuan terowongan. Adanya peningkatan volume fragmentasi akibat *overbreak* tersebut akan memperpanjang waktu pemuatan dan pengangkutan yang disinyalir akan menambah biaya pembuatan terowongan secara menyeluruh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Atas terlaksananya penelitian ini, kami mengucapkan banyak terima kasih kepada manajemen PT Aneka Tambang (ANTAM), Unit Bisnis Pertambangan Emas Pongkor. Tanpa kesempatan dan ijin yang diberikan manajemen ANTAM, maka penelitian ini tidak akan terwujud. Disamping itu, ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Lab. Petrologi FTG, UNPAD, Lab. Mekanika Batuan FTTM, ITB dan Lab. Mekanika Batuan serta Kimia Puslitbang Tekmira, Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2015. *Bagian Pengembangan Tambang, Bidang Mine Planning & Development*. PT Aneka Tambang, Unit Bisnis Pertambangan Emas, Pongkor, Jawa Barat. (Tidak dipublikasi).
- Basuki, A.D., Sumanagara, A. dan Sinambela, D. 1994. The Gunung Pongkor gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration* 50. Pp. 371-391.
- Dick, R.A., Flether, L, R, Andrea, D.V. 1983. Explosives and Blasting Procedures Manual. *Information Circular 8925. United States Bureau of Mines*. 113 p.

- Hall, R. 2011. Australia–SE Asia collision: plate tectonics and crustal flow. *The SE Asian Gateway: History and Tectonics of the Australia–Asia Collision*. Geological Society, London, Special Publications. pp: 75–109.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. *Underground Excavation in Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.
- Hoek, E. 2006. *Rock Mass Classification. Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer Inc. 102 – 3200 Capilano Crescent North Vancouver, British Columbia Canada V7R 4H7.
- Priest, S.D. and Hudson, J.A., 1981. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Vol. 18. Pp. 183-197.
- Rosana, M.F and Matsueda, H. 2002. Cikidang Hydrothermal Gold Deposit in Western Java, Indonesia. *Resource Geology*, Vol. 52, No. 4. Pp. 341-352.
- Singh, S.P. 2000. The Role of Joints and Rock Mass Quality in Perimeter Control. *Explosives & Blasting Technique*. Holmberg, R. (Ed). A.A Balkema/Rotterdam/Brookfield/2000. Pp. 371 – 375.
- Syafrizal, Imai, A. and Watanabe, K. 2007. Origin of Ore-forming Fluids Responsible for Gold Mineralization of the Pongkor Au-Ag Deposit, West Java, Indonesia: Evidence from Mineralogic, Fluid Inclusion Microthermometry and Stable Isotope Study of the Ciurug – Cikoret Veins. *Resource Geology* Vol. 57, No. 2. Pp. 136-148.
- Syafrizal, Imai, A., Motomura, Y. and Watanabe, K., 2005. Characteristics of Gold Mineralization at the Ciurug Vein, Pongkor Gold-Silver Deposit, West Java, Indonesia, *Resource Geology*, Vol.55. Pp. 225-338.
- Yu T.R. and Vongpaisal S. 1996. New Blast Damage Criteria for Underground Blasting. *The Canadian Institute of Mining Bulletin*. Vol.89, No.998. Pp. 139-145.
- Yuningsih, E.T., Matsueda, H., Rosana, M.F. 2014. Epithermal Gold-Silver Deposits in Western Java, Indonesia: Gold-Silver Selenide-Telluride Mineralization. *Indonesian Journal on Geoscience*, Vol. 1 No. 2. Pp. 71-81.

| | |
|-----------|-------------------|
| Diterima | : 22 Juni 2017 |
| Direvisi | : 29 Agustus 2017 |
| Disetujui | : 31 Agustus 2017 |