

# Analisis Metode Penggalian Terowongan Pengelak pada Lapisan Tanah Pasir di Bendungan Tiga Dihaji

Maulana Septian Dwi Pranata<sup>1</sup>, Suharyanto<sup>2</sup> dan Wahyu Krisna Hidajat<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia 50275

<sup>2</sup> Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia 50275

\* penulis koresponden: maulanaseptian@pu.go.id

**Abstrak:** Pada pelaksanaan pembangunan suatu bendungan, terowongan pengelak merupakan salah satu bangunan yang diharapkan dapat diselesaikan sesegera mungkin, agar air sungai dapat dialihkan dan pekerjaan penimbunan tubuh bendungan dapat dilaksanakan. Pekerjaan terowongan pengelak di Bendungan Tiga Dihaji mengalami kendala pelaksanaan akibat terjadinya *cave-in* dan *sinkhole*. *Cave-in* dan *sinkhole* tersebut terjadi pada lapisan pasir lepas yang berpotongan dengan trase terowongan, tepatnya berada pada STA 0+318 s/d 0+347,8. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari metode penggalian dan perkuatan yang sesuai dengan permasalahan tersebut agar pelaksanaan penggalian terowongan bisa segera diselesaikan. Metode yang digunakan adalah memplotkan data *point index load* yang ada dengan grafik ekskavabilitas dari Pettifier dan Fooker [1], selanjutnya menentukan metode bukaan dan perkuatan terowongan berdasarkan *Japan Society of Engineers* [2] serta melakukan penanganan *cave-in* dan *sinkhole* yang terjadi. Hasil dari penelitian ini didapatkan metode penggalian yang tepat adalah *Hard Digging*. Metode bukaan berdasarkan JSCE adalah *heading* dan *bench* dengan alat penggalian yang digunakan adalah *excavator*. Metode perkuatan bukaan terowongan yang direkomendasikan menggunakan *shotcrete*, *rockbolts*, *steel ribs* dan *invert*. Pekerjaan penanganan *cave-in* dan *sinkhole* yaitu dengan melakukan modifikasi *steel rib* membentuk kanopi, melakukan pengisian *cave-in* dengan *mortar foam* dengan kuat tekan minimum 0,8 MPa dan pengisian *sinkhole* dengan *mortar* biasa dengan kuat tekan minimum 5 MPa.

Diterima: 22 November 2023  
Diperbaiki: 17 Maret 2024  
Disetujui: 08 April 2024

**Kata kunci:** bendungan; penggalian terowongan; *cave-in*; *sinkhole*; JSCE

## 1. Pendahuluan

Bendungan Tiga Dihaji, merupakan salah satu dari 61 bendungan yang sedang dibangun pada periode 2014 – 2024 oleh pemerintah pusat melalui Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) sebagai upaya mendukung program ketahanan energi dan ketahanan pangan nasional. Bendungan ini terletak di Kecamatan Tiga Dihaji, Kabupaten Ogan Komering Ulu (OKU) Selatan, Provinsi Sumatera Selatan. Pelaksanaan pekerjaan yang sedang dilaksanakan pada pembangunan Bendungan Tiga Dihaji sampai pada saat penelitian ini dilaksanakan diantaranya adalah pekerjaan terowongan pengelak, bangunan pengambilan, pengecoran beton *capping*, *grouting* konsolidasi dan pembuatan jalan akses alternatif.

Terowongan pengelak merupakan saluran tertutup yang memiliki fungsi utama untuk mengalirkan air sungai dari hulu menuju ke hilir dengan kombinasi bendungan pengelak selama masa konstruksi. Terowongan pengelak di Bendungan Tiga Dihaji memiliki panjang 596,8 m, dengan jarak antara sisi atas

*crown* tunnel dengan permukaan galian inti tubuh bendungan setinggi 26 m. Penampang terowongan berbentuk tapal kuda dengan *steel lining* berdiameter 7 m.

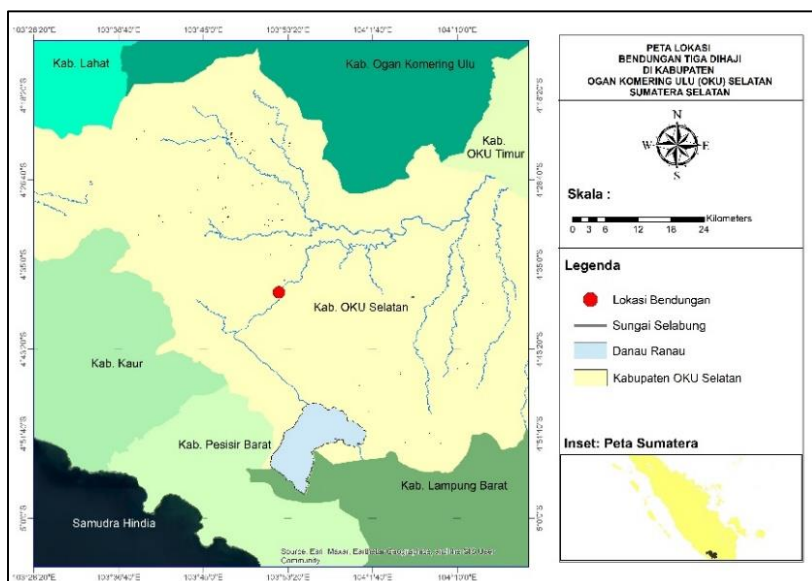
Perancangan terowongan bawah tanah memiliki konsep yang berbeda dengan rancangan struktur bangunan permukaan, seperti bangunan gedung dan jembatan. Menurut E. Hoek dalam Ambarini [3] perancangan struktur bawah tanah seperti terowongan sedapat mungkin menggunakan batuan itu sendiri sebagai material struktur utamanya agar meminimalisir gangguan yang dapat terjadi selama proses penggalian dan meminimalisir penggunaan beton dan penyangga baja. Namun pada pelaksanaannya seringkali diperlukan perkuatan akibat kondisi batuan yang ditemukan.

Pelaksanaan penggalian terowongan Bendungan Tiga Dihaji dilakukan dari kedua sisi yaitu *inlet* dan *outlet*. Hal ini dilakukan sebagai upaya mempercepat pelaksanaan pekerjaan, namun pada pelaksanaannya terdapat beberapa kendala yang menghambat penyelesaian pekerjaan, salah satunya adalah terjadi *cave-in* pada beberapa STA, yaitu pada STA 0+278 s/d 0+289 akibat kondisi batuan di atasnya yang kurang baik dan beberapa *cave-in* yang berkembang menjadi *sinkhole* pada lapisan tanah pasir lepas yang menembus permukaan galian inti tubuh bendungan tepatnya pada STA 0+318 dan STA 0+347,8. Sehubungan dengan permasalahan tersebut diperlukan upaya segera untuk mencari solusi agar pekerjaan dapat kembali dilaksanakan.

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis terkait metode yang sesuai diterapkan pada penggalian terowongan pengelak setelah ditemukan lapisan pasir pada STA 0+318 s/d 0+347,8 pada terowongan pengelak Bendungan Tiga Dihaji dengan menganalisis metode ekskavasi, menganalisis tahapan penggalian terowongan, pemilihan tipe perkuatan dan menganalisis metode perbaikan *cave-in* dan *sinkhole* yang terjadi. Pada penelitian ini akan dikaji metode penggalian terowongan pengelak yang sesuai berdasarkan pedoman dan metode *Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*.

## 2. Metode

Bendungan Tiga Dihaji membendung Sungai Selabung yang mengalir dari Danau Ranau. Bendungan ini secara administratif berada di Desa Sukabumi, Kecamatan Tiga Dihaji, Kabupaten Ogan Komering Ulu (OKU) Selatan, Provinsi Sumatera Selatan atau tepatnya berada pada koordinat 4°37'44,154" LS dan 103°52'36,748" BT. Bendungan Tiga Dihaji dapat ditempuh melalui jalur darat ±7 jam perjalanan dengan jarak ±298 km dari Kota Palembang dan dari Kota Lampung selama ±9 jam dengan jarak ±300 km. Lokasi Bendungan Tiga Dihaji dapat dilihat di **Gambar 1** di bawah ini.



**Gambar 1.** Peta lokasi Bendungan Tiga Dihaji, Kabupaten Ogan Komering Ulu Selatan, Provinsi Sumatera Selatan

### 2.1. Data Teknis Bendungan Tiga Dihaji

Bendungan Tiga Dihaji merupakan bendungan tipe urugan dengan zonal inti tegak. Bendungan ini merupakan salah satu bendungan tertinggi di Indonesia, yaitu dengan tinggi bendungan 122 m. Panjang puncak bendungan ini 950 m. Data teknis Bendungan Tiga Dihaji yang dikaji disajikan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Data teknis Bendungan Tiga Dihaji [4]

No.	Uraian	Keterangan
1	Tipe bendungan	Urugan batu dengan zonal inti tegak
2	Tinggi bendungan	122 m
3	Panjang puncak bendungan	950 m
4	Lebar puncak bendungan	12 m
5	Elevasi puncak bendungan	+323,674
6	Elevasi dasar pondasi	+201,674
7	Tipe pengelak	Terowongan berbentuk lingkaran
8	Struktur pengelak	Beton dilapisi <i>lining</i> baja
9	Panjang pengelak	596,8 m
10	Diameter pengelak	7 m

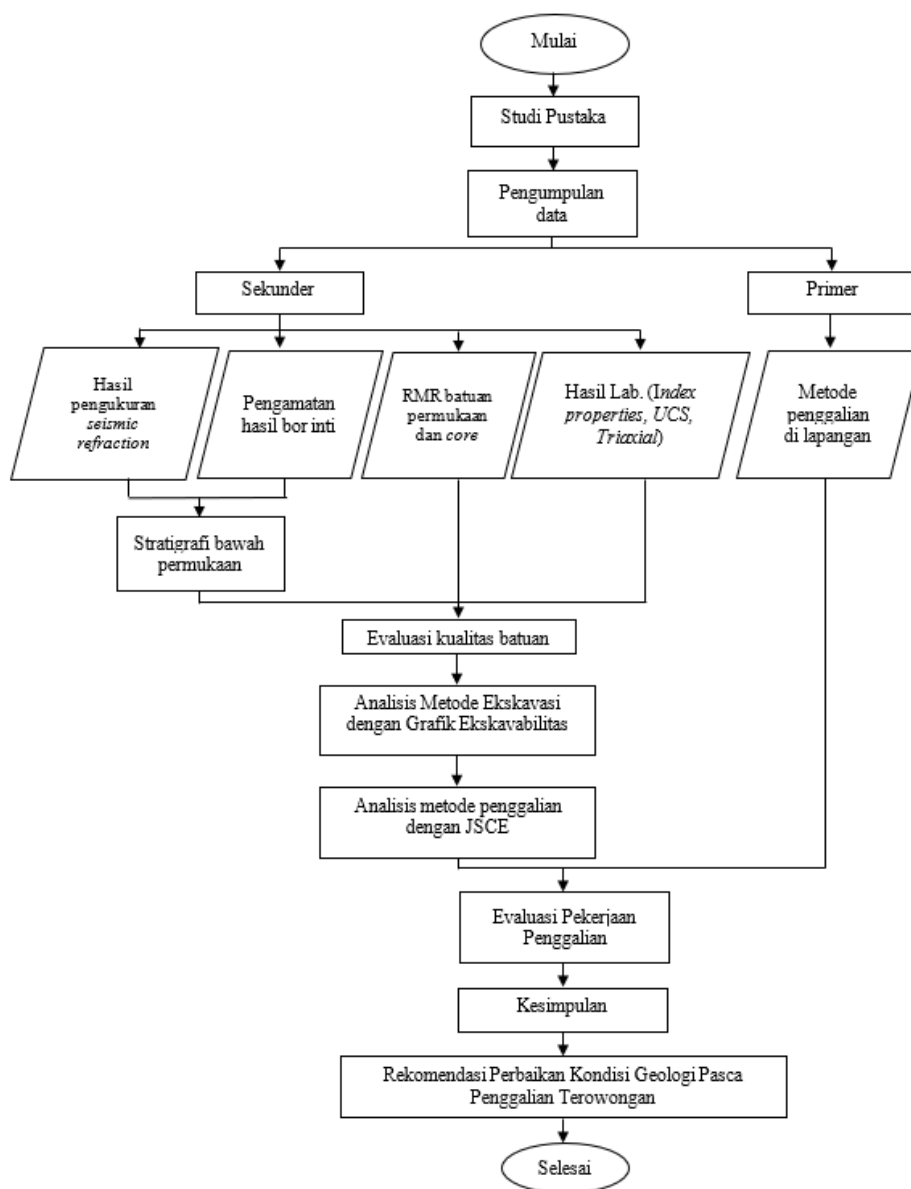
### 2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kualitatif dengan mengambil referensi dari studi – studi terdahulu dan studi di lapangan. Tahapan penelitian ini mencakup tinjauan pustaka, pengumpulan data, evaluasi batuan, analisis metode ekskavasi terowongan, analisis metode bukaan terowongan, analisis metode perkuatan dan penanganan *cave-in* dan *sinkhole* di lapangan. Bagan alir penelitian disajikan pada **Gambar 2**.

Data yang digunakan diperoleh dari BBWS Sumatera VIII yang terdiri dari data teknis, data desain, data hasil kegiatan *seismic refraction*, data pengamatan *log bor* dan pengamatan *Rock Mass Rating* (RMR) batuan di permukaan dan *core drill* serta data *point load index* di lapangan. Data teknis dan desain digunakan untuk mengetahui jenis, tipe dan penampang memanjang serta melintang terowongan pengelak yang menjadi fokus penelitian. Data seismik refraksi dan pengamatan *log bor* digunakan untuk mengetahui kondisi lapisan dan jenis batuan pada daerah penelitian. Data RMR dan *point load index* digunakan untuk mengetahui kekuatan massa batuan.

Evaluasi batuan dilakukan berdasarkan data-data kondisi geologi yang telah dikumpulkan. Kemudian menentukan alat dan metode ekskavasi yang sesuai berdasarkan data nilai *point load index* dan *discontinuity spacing index*. Analisis metode bukaan terowongan dilakukan berdasarkan JSCE yang terdiri dari metode penggalian *full face*, *bench cut* dan *drift advancing* yang ditentukan dari jenis batuan yang terdapat di lapangan. Analisis metode perkuatan dilakukan berdasarkan kelas batuan dari JSCE.

Setelah serangkaian analisis tersebut selanjutnya menjabarkan terkait penanganan-penanganan kejadian *cave-in* dan *sinkhole* yang dilakukan sehingga pekerjaan dapat dilanjutkan. Setelah itu merumuskan rekomendasi dengan melakukan pengamatan kegiatan penggalian terowongan di lapangan yang diharapkan dapat memberikan rekomendasi-rekomendasi terkait kegiatan yang dapat dilakukan agar kondisi geologi yang nantinya akan dijadikan pondasi tubuh bendungan tetap aman dan sesuai dengan kriteria yang ditentukan.



Gambar 2. Bagan alir penelitian.

### 2.3. Klasifikasi dan Evaluasi Batuan

Sifat – sifat fisik batuan yang penting dalam pengamatan pekerjaan terowongan sebagai parameter geomekanik batuan yang berpengaruh terhadap perhitungan kestabilan adalah sifat fisik dan mekanis material. Sifat fisik batuan terdiri atas Kekerasan terhadap goresan, kekerasan terhadap tekanan/pukulan, kekerasan terhadap kikisan, bobot isi batuan, porositas dan permeabilitas. Sedangkan sifat mekanis batuan terdiri dari Kuat tekan, kuat tarik, sudut geser dalam, kohesi dan lain sebagainya [5].

Rock Mass Rating (RMR) atau dikenal juga dengan Geomechanics Classification merupakan metode sederhana yang dikembangkan oleh Bieniawski pada rentang waktu 1972 – 1973. Parameter-parameter pada metode ini didapat dari data lubang bor dan pemetaan struktur bawah tanah. Parameter-parameter tersebut yang selanjutnya dapat mempresentasikan hasilnya ke dalam indeks penilaian sehingga dapat diketahui kualitas dan kelas massa batuan yang diamati [6].

Survei seismik refraksi secara umum adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan data kondisi bawah tanah/permukaan dengan teknik penyelidikan tidak langsung. Tujuan dari survei seismik refraksi antara lain untuk menentukan kedalaman batuan dasar, kedalaman lapisan lapuk, ketebalan *overburden*, letak patahan, zona rekahan, dll. Hasil dari pengujian seismik refraksi berupa kecepatan seismik gelombang refraksi ( $V_p$ ) [7].

#### 2.4. Ekskavasi

Grafik ekskavabilitas mempertimbangkan tipe dari alat ekskavasi dan persyaratan parameter geologi teknik yang meliputi indeks spasi diskontinuitas ( $I_f$ ) dan indeks kekuatan *point load* ( $I_s(50)$ ). Menurut Bieniawski [8], kuat tekan batuan utuh dapat ditentukan dengan pendekatan menggunakan pukulan palu geologi dan atau pisau lipat pada batuan yang diamati, selanjutnya dapat dikonversi dengan nilai kuat tekan dari hasil uji sifat mekanik PLI (*point load index*) dan UCS pada tes di laboratorium. Perhitungan indeks *point load* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan standar yang umum digunakan, yaitu dari ASTM. Grafik hubungan antara nilai indeks *point load* dan spasi diskontinuitas dinamakan grafik ekskavabilitas [9].

#### 2.5. Japan Society of Civil Engineers (JSCE)

Menurut JSCE yang tercantum Pedoman Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan pada media campuran tanah-batuan [10] massa batuan terbagi atas 7 kategori yang dapat digunakan sebagai dasar perencanaan dan pelaksanaan konstruksi terowongan. Penentuan kategori batuan tersebut dimaksudkan sebagai penentuan metode penggalian terowongan, pemilihan sistem perkuatan dan *lining*, serta penentuan metode perkuatan tambahan (*auxiliary*). Tipikal pemilihan jenis perkuatan dan sistem perkuatan berdasarkan JSCE menggunakan pendekatan empiris terdiri dari beton semprot/*shotcrete*, baut batuan/*rockbolt*, penyangga baja/*steel rib* dan lantai kerja beton yang ditentukan berdasarkan kategori batuan/tanah. Kategori batuan yang memerlukan perkuatan terdiri atas batuan keras yang masuk dalam kelas B dan C, batuan lunak yang masuk dalam kelas D, pada kelas D ini terbagi menjadi dua yaitu kelas DI dan DII, batuan media tanah dengan kelas E, zona patahan dan *squeezing ground*. Masing-masing kategori batuan memiliki perkuatan yang berbeda [2].

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Penentuan Jenis Batuan dari Hasil Bor Inti dan Seismik Refraksi

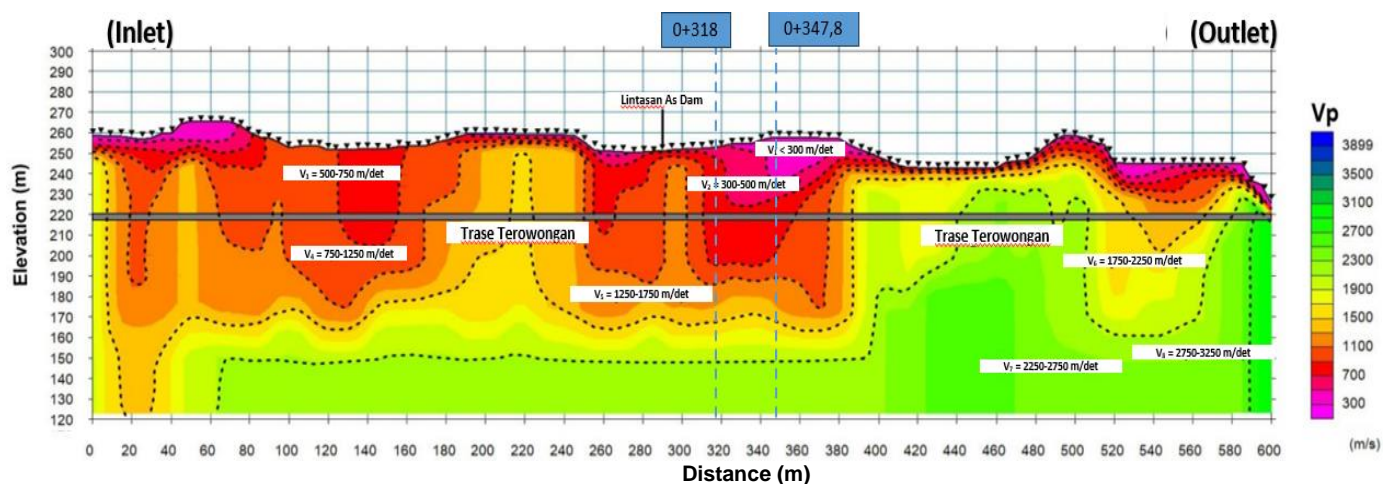
Kualitas batuan pada penelitian ini ditentukan berdasarkan dua pertimbangan, yaitu dari data *log bor* dan pemetaan bawah permukaan dengan seismik refraksi di sepanjang trase terowongan pengelak. Terdapat 7 titik pengeboran yang telah dilakukan, yaitu titik bor, DIV-1, DIV-2, DIV-3, DIV-4, DIV-5, DIV-6, dan DIV-7. Setelah dianalisis dan diplotkan pada gambar terowongan, gambar penampang geologi seperti disajikan pada **Gambar 4**. Dari gambar tersebut diketahui bahwa jenis batuan yang terdapat di sepanjang terowongan pengelak terdiri atas 3 jenis utama, yaitu Tuff (QT), Konglomerat (QR) dan Batulempung selang-seling batupasir (TLP), dengan 2 jenis variasi pada batuan tuff yaitu tuff yang memiliki pelapukan ringan hingga sedang (*slightly weathered-moderately weathered*/SW – MW) dan pelapukan sedang hingga tinggi (*moderately weathered-highly weathered*/MW – HW). Kondisi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [11], namun dengan pendetailan akibat penambahan data investigasi geologi dan pemetaan seismik refraksi sehingga kondisi penampang geologi lebih detail dan dapat memudahkan dalam penentuan metode penggalian.

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi kecepatan gelombang pada metode seismik refraksi antara lain jenis batuan, densitas batuan, kondisi batuan dan kedalaman batuan. Kondisi batuan dipengaruhi oleh sifat fisik batuan yaitu kekerasan, porositas, pelapukan dan kerapatan *joint* [7]. Gambar penampang seismik refraksi disajikan pada **Gambar 3**. Pada gambar tersebut terdapat gradasi warna

yang menunjukkan kecepatan gelombang seismik. Selanjutnya dari nilai kecepatan gelombang tersebut diinterpretasikan menjadi jenis batuan berdasarkan tabel hubungan kecepatan gelombang dan jenis batuan menurut Kohnen [12]. Hasil interpretasi kondisi batuan tersebut disajikan pada **Tabel 2**. Dari tabel tersebut dapat dilihat jika terdapat lapisan pasir lepas dengan nilai  $V_p$  kurang dari 300 atau dengan notasi warna pink.

### 3.2. Analisis Kualitas Massa Batuan

Analisis kualitas massa batuan pada STA 0+318 dan STA 0+347,8 ditentukan dari pengamatan visual dan pengujian di lapangan yang kemudian dilakukan pembobotan dari beberapa parameter berupa nilai kuat tekan batuan/*Unconfined Compressive Strength* (UCS), RQD, jarak diskontinuitas, kondisi diskontinuitas dan kondisi air tanah. Dari hasil analisis didapatkan nilai UCS dengan bobot 1, nilai RQD dengan bobot 8, nilai jarak diskontinuitas dengan bobot 8, nilai kondisi diskontinuitas dengan bobot 10 dan kondisi air tanah mengalir dengan bobot 0. Selanjutnya dari kelima parameter tersebut dijumlahkan sehingga didapatkan nilai RMR 27 atau masuk dalam kategori *poor rock*. Metode ini sejalan dengan studi yang dilakukan sebelumnya tujuan utamanya untuk klasifikasi kualitas massa batuan untuk memandu pekerjaan penggalian di lapangan [13].

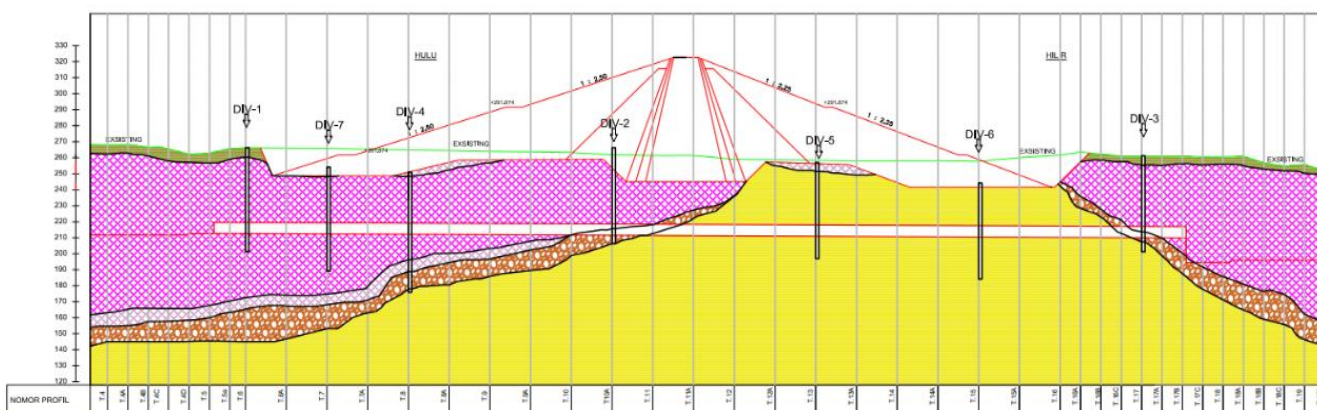


**Gambar 3.** Hasil Pembacaan Seismik Refraksi pada Trase Terowongan Pengelak

**Tabel 2.** Hubungan kecepatan gelombang seismik ( $V_p$ ) dan kondisi batuan (7)

Layer	Warna	$V_p$ (m/detik)	Interpretasi Geologi
1	Pink	<300	Pasir Lepas
2	Light Pink	300-500	Pasir agak kompak
3	Red	500-750	Batupasir pelapukan tinggi
4	Orange	750-1250	Batupasir pelapukan sedang
5	Yellow-Orange	1250-1750	Batupasir pelapukan ringan
6	Yellow	1750-2250	Batupasir sedikit keras
7	Light Green	2250-2750	Batupasir medium keras
8	Dark Green	2750-3250	Batupasir sangat keras





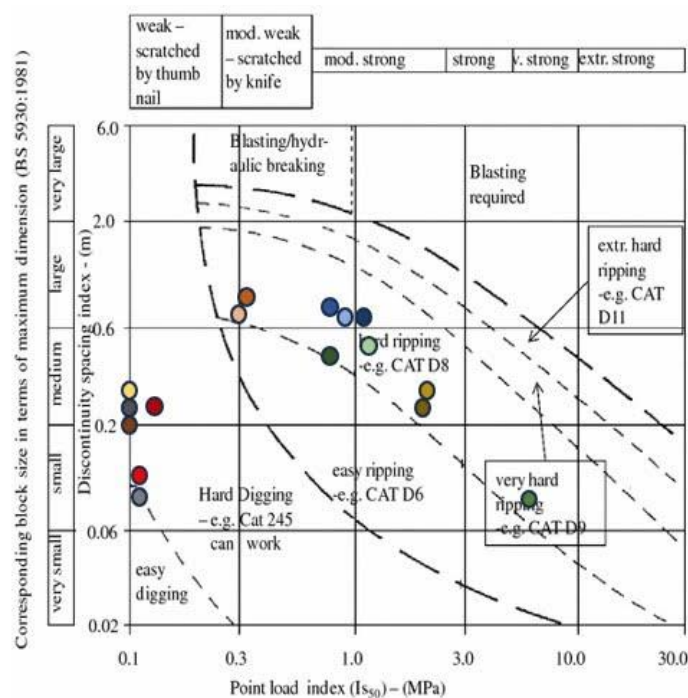
**Gambar 4.** Penampang Geologi Hasil Interpretasi Data Log Bor Hasil Modifikasi dari Laporan Sertifikasi

### 3.3. Metode Ekskavasi

Analisis metode ekskavasi ini bertujuan untuk memperoleh metode penggalian yang efisien. Parameter yang digunakan untuk menganalisis metode ini adalah sifat mekanika batuan berupa indeks *point load* ( $Is(50)$ ) dan indeks spasi diskontinuitas ( $If$ ). Penentuan ini didasarkan pada grafik yang dibuat oleh Pettifer dan Fookes yang dinamakan grafik ekskavabilitas. Analisis yang dilakukan yaitu dengan melakukan uji indeks *point load* dan pengukuran indeks spasi diskontinuitas di beberapa STA sepanjang trase terowongan sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 3**. Selanjutnya dilakukan *plotting* pada grafik ekskavabilitas sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 5**. Masing-masing titik menunjukkan metode penggalian dan alat penggalian yang sesuai. Berdasarkan tabel dan gambar tersebut, secara umum dari 16 titik pengambilan sampel, didapatkan metode penggalian dengan *easy digging*, *hard ripping* dan *hard digging*. Untuk penggalian *hard ripping* dapat digunakan alat *excavator D8*, *excabreaker* maupun *blasting*, sedangkan penggalian *hard digging* dapat menggunakan *excavator*. Lebih spesifik, metode penggalian pada STA yang ditinjau yaitu STA 218 s/d 347,8 adalah *hard digging* hingga *hard ripping*, dengan kondisi batuan bervariasi mulai dari lemah yang dapat dikupas dengan kuku jari (*weak*) hingga cukup kuat (*moderate strong*).

**Tabel 3.** Rekap Nilai  $Is50$  dan  $If$  Sebagai Penentuan Metode Ekskavasi

No.	STA/Lokasi Pengamatan	$Is_{50}$	$If$	Notasi	Metode Ekskavasi
1	STA 0+70	0,94	0,65	[Blue]	<i>hard ripping</i>
2	STA 0+180	1,02	0,63	[Dark Blue]	<i>hard ripping</i>
3	STA 0+251	0,30	0,65	[Light Orange]	<i>hard ripping</i>
4	STA 0+257	0,48	0,75	[Orange]	<i>hard ripping</i>
5	STA 0+267,8	0,82	0,7	[Dark Orange]	<i>hard ripping</i>
6	STA 0+270	0,03	0,20	[Brown]	<i>hard digging</i>
7	STA 0+288	0,15	0,15	[Grey]	<i>easy digging</i>
8	STA 0+323	0,04	0,25	[Dark Grey]	<i>hard digging</i>
9	STA 0+345	0,02	0,3	[Yellow]	<i>hard digging</i>
10	STA 0+349	2,35	0,30	[Olive Green]	<i>hard ripping</i>
11	STA 0+543	2,29	0,25	[Dark Olive Green]	<i>hard ripping</i>
12	STA 0+547,5	1,33	0,5	[Light Green]	<i>hard ripping</i>
13	STA 0+565	4,59	0,15	[Dark Green]	<i>hard ripping</i>
14	STA 0+586	0,84	0,55	[Dark Green]	<i>hard ripping</i>
15	STA 0+518	0,15	0,25	[Red]	<i>hard digging</i>
16	STA 0+596	0,12	0,18	[Red]	<i>hard digging</i>



**Gambar 5.** Plotting Nilai  $I_{s50}$  dan  $I_f$  pada Grafik Ekskavabilitas

### 3.4. Metode Penggalian JSCE

Berdasarkan analisis nilai kualitas massa batuan atau RMR hasil interpretasi gelombang primer ( $V_p$ ) pada pengujian seismik refraksi di trase terowongan pengelak. Selain itu juga dilakukan pengamatan di lapangan serta terjadinya fenomena *cave-in* dan *sinkhole*, maka jika dimasukkan kedalam ketentuan dari JSCE jenis batuan/tanah yang berada pada STA 0+318 s/d 347,8 termasuk ke dalam kategori DI dan DII, dengan pertimbangan kondisi inti pengeboran RQD berbentuk potongan-potongan kecil, tetapi terkadang berbentuk lempung atau pasir yang bercampur dengan pecahan batuan.

Berdasarkan pertimbangan jenis batuan/tanah yaitu kategori DI dan DII, maka jenis penggalian bukaan adalah metode penggalian *heading*, *bench* dan *invert*. Pemilihan ini selain didasarkan dengan jenis batuan/tanah juga kesesuaian metode dengan kondisi media yang cenderung kurang stabil. Metode ini juga cocok karena memiliki kelebihan berupa metode yang dapat beradaptasi atau disesuaikan jika terjadi perubahan kondisi media selain itu juga dapat menghemat peralatan dan pekerja, serta cukup efisien waktu pengerjaannya jika dibandingkan dengan menggunakan *bench* yang panjang.

### 3.5. Penentuan Jenis Perkuatan

Dengan melihat kategori batuan pada STA 0+318 s/d 347,8 adalah batuan lunak atau kelas D, maka perkuatan yang direkomendasikan adalah dengan menggunakan *shotcrete*, *rockbolts*, *steel ribs* dan *invert*, selain itu dengan adanya kejadian *cave-in* maka ditambah perkuatan berupa *forepolling* untuk meminimalisir runtuhnya material. Selain itu perlu dipertimbangkan segera melakukan pengecoran lantai kerja beton atau penutup penampang melintang penggalian.

### 3.6. Penangan Cave-in dan Sinkhole

Salah satu kendala penentuan metode penggalian yang sesuai diterapkan dalam pekerjaan penggalian terowongan pengelak adalah timbulnya kejadian *cave-in* dan beberapa *cave-in* yang berkembang menjadi *sinkhole*. Beberapa metode perbaikan yang telah dilakukan antara lain:



- Pemasangan *steel rib* secara rapat dan melakukan modifikasi menggunakan besi profil sehingga satu set *steel rib* setengah lingkaran dibentuk seperti topi yang bertujuan untuk menahan runtuhnya material secara masif dan material mortar semen yang akan digunakan untuk mengisi rongga *cave-in/sinkhole*.
- Pengisian *cave-in* dengan *mortar foam* dengan kuat tekan minimum 0,8 Ma (8 kg/cm<sup>2</sup>).
- Pengisian *sinkhole* dengan *mortar* biasa dengan kuat tekan 5 MPa.

Pekerjaan pengisian *sinkhole* ini sekaligus sebagai pengganti material pasir lepas dengan *mortar*, dimaksudkan sebagai upaya untuk memperbaiki kondisi pondasi bendungan pada area tersebut secara utuh.

#### 4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah, Metode ekskavasi pada terowongan pengelak yang tepat diterapkan pada STA 218 s/d 347,8 adalah *hard digging*, dengan metode bukaan *heading*, *bench* dan *invert*. Metode perkuatan terowongan dengan menggunakan *shotcrete*, *steel ribs*, *rockbolts*, *invert* dan *forepolling*. Alat penggalian yang digunakan adalah *excavator*. Perbaikan *cave-in* dan *sinkhole* yang telah dilakukan di lapangan antara lain, modifikasi penggunaan *steel rib* semakin rapat dan berbentuk topi menjadi *steel rib canopy*, pengisian *cave-in* dengan *mortar foam* dengan kuat tekan minimum 0,8 MPa dan pengisian *sinkhole* dengan *mortar* biasa dengan kuat tekan minimum 5 MPa.

#### Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah terlibat dan mendukung dalam penelitian ini terutama dari BBWS Sumatera VIII yang telah membantu dalam menyediakan data dan informasi.

#### Daftar Pustaka

- [1] Pettifer GS, Fookes PG. A Revision of the Graphical Method for Assessing The Excavatability of Rock. Quarterly Journal of Engineering Geology. 1994;145–64.
- [2] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Standard Specification for Tunneling – 2006: Mountain Tunnels. Tokyo: JSCE; 2007.
- [3] Ambarini E, Hirnawan F, Guntoro D. Sistem Stabilitas Terowongan Pengembangan Dengan Menggunakan Baut Batuan (Rockbolt) Dan Beton Tembak (Shotcrete) Di Blok Cikoneng Pt Cibaliung Sumberdaya, Kab. Pandeglang-Prov. Banten. Prosiding Teknik Pertambangan. 2015;
- [4] BBWS Sumatera VIII. Kajian Hidrologi Pada Pekerjaan Supervisi Bendungan Tiga Dihaji Kab. OKU Selatan, Sumatera Selatan. 2022.
- [5] Balitbang PU. Laporan Akhir Dinding Terowongan Jalan Tipe Struktur Beton Bertulang. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum ; 1997.
- [6] Andani R. Evaluasi Kondisi Geologi Teknik dan Analisis Kesetabilan Ekskavasi bagi Perencanaan Terowongan Jalan Tol Pekanbaru Sampai Padang [Tesis]. Universitas Gadjah Mada; 2019.
- [7] BBWS Sumatera VIII. Laporan Akhir Seismik Refraksi Bendungan Tiga Dihaji Paket IV di Kabupaten OKU Selatan. Palembang: SNVT Pembangunan Bendungan BBWS Sumatera VIII; 2021.
- [8] Bieniawski ZT. Engineering Rock Mass Classifications: a Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. New York: A Wiley-Interscience Publication; 1989.
- [9] Yunanto A. Evaluasi Kondisi Geologi Teknik Bagi Perancangan Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Cipanas Provinsi Jawa Barat [Disertasi]. [Yogyakarta]: Universitas Gadjah Mada; 2019.
- [10] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Pedoman Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan pada Media Campuran Tanah-batuan. Jakarta: Kementerian PUPR; 2015.

- [11] Zekrinaldi, Anggara F, Setiawan H. Analysis of engineering geology conditions based on the quality of rock mass in the Tiga Dihaji Dam's diversion tunnel, South Sumatera, Indonesia. E3S Web of Conferences. 2021;325.
- [12] Kohnen H. The temperature dependence of seismic waves in ice. Journal of Glaciology . 1974;
- [13] Aprig U, Salia ZR. Analisis Kestabilan Terowongan Pada Tunnel # 11 Kereta Cepat Jakarta – Bandung Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. Jurnal Bina Tambang. 2021;6(5).