



Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)

Alamat Prosiding: snip.eng.unila.ac.id



Tinjauan Deformasi Terowongan Bendungan Way Apu berdasarkan Kajian Seismik Refraksi, Petrografi, XRD dan Face Mapping RMR

Yanuar Aulia Kamal^a, Ratna Widyawati^b, Dikpride Despa^c^a Program Studi Insinyur, Universitas Lampung, Jl. Prof. Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145^{b,c} Program Studi Program Profesi Insinyur Universitas Lampung, Jalan Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Masuk 10 Agustus 2023

Diterima 10 September 2023

ABSTRAK

Kata kunci:
Terowongan
X-Ray Diffraction
Petrografi
Seismik Refraksi
Rock Mass Rating

Proses penggalian terowongan mengakibatkan kestabilan geologi area tersebut mengalami gangguan seperti longsoran atau ambrukkan. Besarnya tingkat kestabilan galian ini dipengaruhi oleh kondisi geologi, yaitu sifat fisik dan sifat mekanik massa batuan serta struktur geologi seperti sesar (patahan), kekar dan lipatan serta kondisi air tanah. Gangguan ketabilan geologi tersebut tentunya mengakibatkan deformasi atau displacement (perpindahan) massa batuan. Parameter geologi yang menentukan deformasi tersebut ditunjukkan pada hasil Seismik Refraksi, Petrografi, X-Ray Diffraction (XRD), Rock Mass Rating (RMR). Deformasi terjadi di sepanjang terowongan dengan ditandai geological overbreak, runtuhannya serta longsoran galian terowongan sampai dengan pergerakan steelrib. Runtuhannya terjadi dari yang terkecil 8 cm hingga yang terbesar 40 meter. Pada hasil Seismik refraksi menunjukkan sesar minor pada sekitar STA +375 dan +500, dimana pada sekitar STA tersebut terjadi beberapa runtuhannya, bahkan di antara sesar minor tersebut terjadi runtuhannya terbesar sampai dengan 40 meter. Kondisi tekstur batuan yang tercermin dalam petrografi merupakan batuan metamorf dengan kekar batuan yang rapat ditunjukkan dengan kondisi batuan yang terlihat remuk. Kondisi sisipan mineral kaolin yang terdapat di hasil XRD menunjukkan karakteristik antar kekar yang licin, sehingga dengan penggalian pekerjaan terowongan ini mengakibatkan jatuhnya material lepas antar kekar batuan. Pada parameter RMR yang didapatkan langsung dari hasil face mapping menunjukkan pada kondisi RMR rendah terjadi deformasi struktural yang cukup besar.

1. Pendahuluan

Bendungan Way Apu merupakan bendungan secara administratif terletak di Kabupaten Buru dan Kabupaten Buru Selatan, Provinsi Maluku. Pulau ini dikelilingi oleh laut Seram di bagian Utara, laut Banda di bagian Selatan, laut Buru di bagian Utara dan selat Manipa di sebelah Timur. Dalam proses pembangunan bendungan dibutuhkan terowongan yang berfungsi sebagai pengelakkan air sungai saat pekerjaan di badan sungai dikerjakan.

Proses penggalian terowongan mengakibatkan kestabilan geologi area tersebut mengalami gangguan seperti longsoran atau ambrukkan. Besarnya tingkat kestabilan galian ini dipengaruhi oleh kondisi geologi, yaitu sifat fisik dan sifat mekanik massa batuan serta struktur geologi seperti sesar (patahan), kekar dan lipatan serta kondisi air tanah. Gangguan ketabilan geologi tersebut tentunya mengakibatkan deformasi atau displacement (perpindahan) massa batuan.

Untuk mengamati pengaruh kondisi geologi tersebut, maka dilakukan pengumpulan data primer dan sekunder serta dibandingkan dengan deformasi dan perilaku

yang terjadi pada proses penggalian terowongan. Data sekunder tersebut adalah peta geologi regional, data perencanaan. Sedangkan data primer yang diambil adalah seismik refraksi, Petrografi, *X-Ray Diffraction* (XRD) dan pengukuran nilai *rock mass rating* (RMR).

1.1. Kondisi Geologi Regional

1.1.a. Stratigrafi Regional

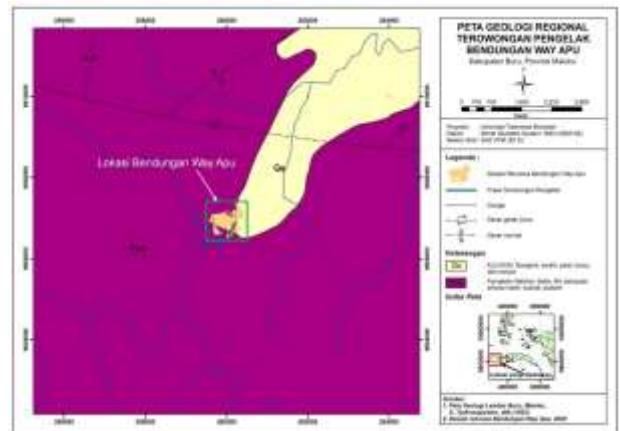
Kondisi geologi regional di lokasi Bendungan Way Apu dan sekitarnya terdiri atas formasi-formasi berikut ini:

- Aluvium (Qa): bongkah, kerikil, pasir, lanau, dan lumpur. Endapan ini tersebar di sepanjang pantai, terutama di daerah lembah sungai Way Apu, Way Mala, Way Kuma, dan Way Duna.
- Kompleks Wahluwa (Pzw): sekis, filit, batupasir arkosa malih, kuarsit, dan pualam. Formasi batuan ini terdiri atas sekis muskovit-biotit-yakut dan eksis klorit-muskovit pada bagian permukaannya. Pada umumnya di bagian bawah dari formasi batuan ini terdiri atas arkosa malih dan kuarsit. Terdapat juga

sekis amfibol dengan hornblenda, tremolit, aktinolit, dan felspar, dan genes epidot-plagioklas-kuarsa ortoklas. Filit, terutama bersusunan klorit, muskovit serosit, felspar, dan kuarsa. Grafit, pada umumnya terdapat pada sekis dan filit. Pualam berwarna kelabu terkadang berkarbon memperlihatkan struktur ductile flow deformation dengan ketebalan antara 20-100 cm. Urat kuarsa yang terbentuk merupakan hasil segerasi kuarsa yang umumnya terdapat pada daerah antiklin dan sinklin. Batuan pembentuk pada bagian atas Kompleks Wahlua termasuk ke dalam daerah malihan daeei sekis hijau dan fasies empidot amfibolit berdasarkan kenampakan satuan dengan kemungkinan umur Karbon Akhir hingga Perm Awal. Tersebar luas dari bagian Utara, Tengah, dan Timur Pulau Buru yang membentuk morfologi pegunungan. Singkapan yang baik terdapat di bagian Timur Pegunungan Wahlua ($126^{\circ}45'$ – $127^{\circ}10'$ BT dan $3^{\circ}10'$ – $3^{\circ}42'$ LS).

1.1.b. Struktur Geologi

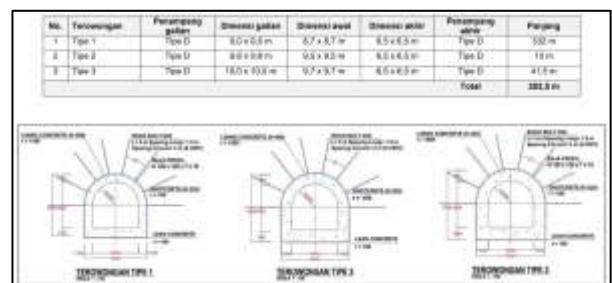
Struktur yang terlihat membentuk lipatan dengan antiklin dan sinklin yang tidak beraturan dengan variasi tinggi amplitudo antara sentimeter hingga puluhan meter. Poros lipatan pada batuan sedimen Pra-Tersier, pada awalnya memiliki arah sesuai dengan pola arah cekungan yaitu Barat Laut-Tenggara, namun dikarenakan adanya gaya dari arah Timur Laut-Barat Daya yang menyebabkan adanya proses tektonik dan mengakibatkan adanya proses perlipatan dan pengangkatan pada akhir Tersier. Sesar banyak ditemukan di sekitar Sungai Way Apu, Danau Rana, Teluk Bara, dan sekitar Kampung Mageswain. Danau Rana merupakan lekukan tektonik (terban) yang dibatasi oleh sesar yang diduga masih aktif pergerakannya. Sesar yang berarah dari Timur Laut-Barat Daya, pegerakannya berlawanan dengan arah gerak jarum jam: yang berarah Barat Laut-Tenggara mengikuti arah gerak jarum jam. Di tepi Selatan Danau Rana ditemukan jalur terbesikan dan terkadang milonit batuan malihan. Sesar mendatar yang masih aktif ditemukan di Pantai Utara dan di sekitar Sungai Way Apu yang menyebabkan timbulnya mata air panas anak sungai Way Dalan sebelah Barat yang suhunya mencapai 80°C . Sesar ini berumur Kuarter Bawah.



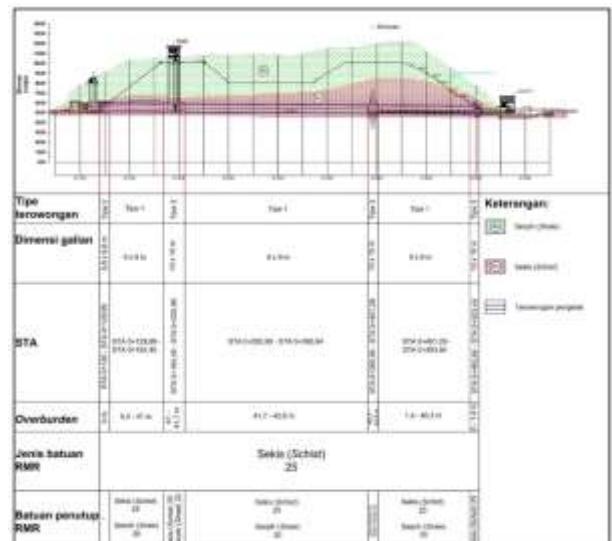
Peta Geologi Regional Lokasi Penelitian

1.1.c. Dimensi Terowongan

Dimensi terowongan yang dikerjakan memiliki diameter galian 9 meter dan panjang 385 meter. Geometri terowongan berbentuk tapal kuda dengan perkuatan baja *steel rib* tebal 150mm, jarak antar *steel rib* 60-100cm, *shotcrete* tebal 10cm, dan perkuatan rockbolt dengan panjang 5 meter berjumlah 8 batang, pemasangan rockbolt dilaksanakan dengan jarak antar layer 60-100cm.



Tabel Pembagian Dimensi Terowongan



Potongan Memanjang Rencana Terowongan

3. Metodologi

Dalam pelaksanaan penelitian ini, metodologi yang dilakukan adalah:

3.1. Pengumpulan data primer

- a. Seismik Refraksi
- b. Petrografi
- c. X-Ray Diffraction (XRD)
- d. Rock Mass Rating (RMR)
- e. Pengamatan Deformasi
- f. Pembuatan Hubungan antara Hasil Seismik Refraksi, Petrografi, X-Ray Diffraction (XRD), Rock Mass Rating (RMR) dan Deformasi

3.2. Seismik Refraksi

Seismik refraksi merupakan salah satu metode geofisika yang diterapkan di lokasi penelitian untuk mengetahui perlapisan batuan, zona patahan (sesar) dan tingkat pelapukan batuan berdasarkan nilai cepat rambat gelombang dengan satuan km/s. Seismik refraksi dilaksanakan sepanjang trase terowongan. Penyelidikan bawah permukaan menggunakan metode seismik refraksi adalah sangat tepat karena pelaksanaannya lebih efesien dan cakupan areal yang relatif lebih luas dalam hal mengetahui data kualitas dari massa batuan bawah permukaan seperti ketebalan pelapukan, zona hancuran dan struktur geologi lainnya. Kualitas batuan tadi dihitung dan dikelompokan ketebalannya berdasarkan dari sebaran kecepatan gelombang seismik.



Proses Pelaksanaan Seismik Refraksi

3.3. Petrografi

Petrografi merupakan analisa batuan menggunakan mikroskop polarisasi yang berujuan untuk mengetahui jenis batuan, struktur batuan, tesktur batuan dan komposisi mineral pada batuan secara mikroskopis.



Proses Pelaksanaan Petrografi

3.4. X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan analisa batuan untuk mengetahui komposisi mineral yang terkandung dalam batuan, salah satunya komposisi mineral lempung yang terkandung di dalam batuan maupun rekahan batuan.



Proses Pelaksanaan X-Ray Diffraction (XRD)

3.5. Rock Mass Rating (RMR)

Rock mass rating atau kualitas massa batuan merupakan metode pemetaan geoteknik terowongan yang berfungsi sebagai acuan dalam penggalian terowongan guna menentukan jenis proteksi baik

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Seismik Refraksi

Setelah dilakukan seismik refraksi, kondisi batuan gabungan antara batuan kelas IV (*poor rock*) dan batuan kelas III (*fair rock*), dengan mayoritas batuan kelas IV (*poor rock*).

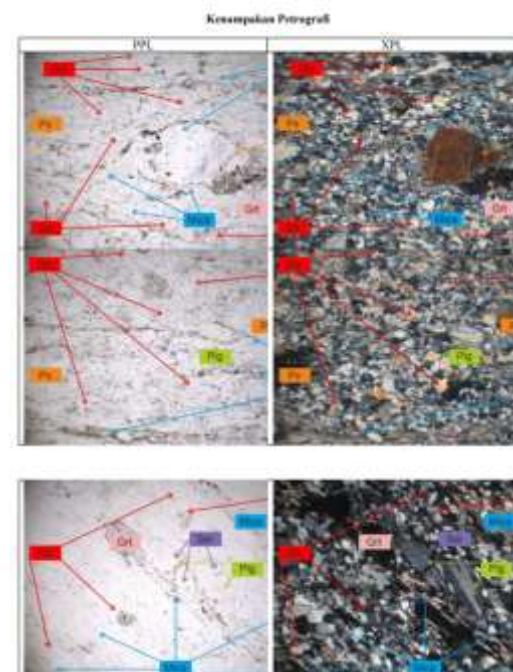
Kualitas massa batuan sepanjang trase terowongan dibagi menjadi tiga kelas yakni kelas III (RMR 43-60), kelas IV (RMR 25-37), dan kelas V (RMR <20) berdasarkan data seismik refraksi. Batuan sepanjang trase terowongan dibagi menjadi tiga nilai seismik yakni <1 km/s, 1-1.3 km/s, dan 1.3-1.5 km/s. Secara deskripsi mikroskopis, jenis batuan yang ada didalam terowongan merupakan batuan metamorf dengan nilai seismik refraksi 1-1.3 km/s yang memiliki potensi deformasi plastis dan deformasi plastis (JSCE, 2007, dalam Surat Edaran Menteri PUPR No. 30 Tahun 2015).

Terdapat 2 indikasi lokasi patahan (sesar) minor yang tersebar di dalam area galian terowongan yang mengindikasikan potensi deformasi cukup besar disekitar area tersebut.

No	Kode	Karakteristik	Parameter Geoteknik		Karakteristik	Parameter Geoteknik	Karakteristik	Parameter Geoteknik
			W	D				
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
33								
34								
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41								
42								
43								
44								
45								
46								
47								
48								
49								
50								
51								
52								
53								
54								
55								
56								
57								
58								
59								
60								
61								
62								
63								
64								
65								
66								
67								
68								
69								
70								
71								
72								
73								
74								
75								
76								
77								
78								
79								
80								
81								
82								
83								
84								
85								
86								
87								
88								
89								
90								
91								
92								
93								
94								
95								
96								
97								
98								
99								
100								
101								
102								
103								
104								
105								
106								
107								
108								
109								
110								
111								
112								
113								
114								
115								
116								
117								
118								
119								
120								
121								
122								
123								
124								
125								
126								
127								
128								
129								
130								
131								
132								
133								
134								
135								
136								
137								
138								
139								
140								
141								
142								
143								
144								
145								
146								
147								
148								
149								
150								
151								
152								
153								
154								
155								
156								
157								
158								
159								
160								
161								
162								
163								
164								
165								
166								
167								
168								
169								
170								
171								
172								
173								
174								
175								
176								
177								
178								
179								
180								
181								
182								
183								
184								
185								
186								
187								
188								
189								
190								
191								
192								
193								
194								
195								
196								
197								
198								
199								
200								
201								
202								
203								
204								
205								
206								
207								
208								
209								
210								
211								
212								
213								
214								
215								
216								
217								
218								
219								
220								
221								
222								
223								
224								
225								
226								
227								
228								
229								
230								
231								
232								
233</								

Kode Sampel : TUNNEL OUTLET (TO-001)
 Nama Batuan : *Sericite-plagioclase-garnet-pyroxene-mica-quartz-granofels* (The Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks, 2007)

Deskripsi Cutting Batuan	
Sampel batuan merupakan batuan monominerik berwarna coklat dan coklat jingga, dan warna orde 2 (XPL) dengan mineral berukuran sedang-sangat halus (2 sampai <0,1 mm). Sampel dengan struktur foliasi (folia) dan tidak memperlihatkan kemiringan batuan dan pada metasomatisasi, memiliki individu kristal berupa lepidolitik. Komposisi mineral pentingannya adalah kuarsa (75%), silika (9%), pyroxene (8%), garnet (4%), plagioklas (3%), dan sericit (1%).	
Tekstur	Struktur
<ul style="list-style-type: none"> a. Umum : <ul style="list-style-type: none"> - Ukuran kristal: Halus sampai sangat halus <0,1 - 0,1 mm - Bentuk mineral: subbedul - anhedral - Bentuk individu kristal: lepidolitik - sericitik b. Bentuk batuan umumnya lepidolitik c. Tekstur berdasarkan ketahanan metasomatisasi: kristalik-blak. d. Tekstur khas: parafoliasik 	Foliasi (foliation).
Fosil	
<ul style="list-style-type: none"> a. Kuarsa Mineral berwarna coklat (PPL) dan abu-abu dan jingga (XPL) berukuran halus (0,1 - 1 mm), bentuk kristal anhedral, tidak ada plektrikisme, relif <i>low positive</i> dan tidak memiliki foliasi. Kelimpahan 75%. b. Plagioklas Mineral berwarna coklat (PPL) dan jingga dan corak orde 2 (XPL) berukuran halus sampai sedang (0,1 mm - 2 mm), bentuk kristal subbedul - anhedral, tidak ada plektrikisme, relif <i>high positive</i>, dan foliasi tidak teratur. Kelimpahan 8%. c. Garnet Mineral berwarna abu-abu muda (PPL) dan batuan (XPL), berukuran halus (1 mm) dengan ukuran kristal yang terdiri berupa perlepidolitik, tidak ada plektrikisme, relif <i>high positive</i>, dan tidak memiliki foliasi. Kelimpahan 4%. d. Sericit Mineral berwarna coklat (PPL) dan batuan (XPL) berukuran halus (1 mm) dengan bentuk kristal anhedral, tidak ada plektrikisme, dan foliasi tidak teratur. Kelimpahan 1%. 	
Morfologi/Massa Densitas	
<ul style="list-style-type: none"> a. Mika Mineral berwarna abu-abu (PPL) dan warna orde 2 (XPL) berukuran sangat halus (<0,01 mm), bentuk individu kristal anhedral, tidak ada plektrikisme, ukuran kristal berupa lepidolitik, relif <i>low positive</i>, dan foliasi tidak teratur. Kelimpahan 9%. b. Silika Mineral berwarna oranye (PPL) dan jingga orde 2 (XPL) berukuran sangat halus (<0,01 mm), dengan bentuk kristal anhedral, tidak ada plektrikisme, dan foliasi tidak teratur. Kelimpahan 1%. 	
Tipe Metasomatisasi	
Metasomatisasi lokal	



Data Hasil Petrografi

3.3. X-Ray Diffraction (XRD)

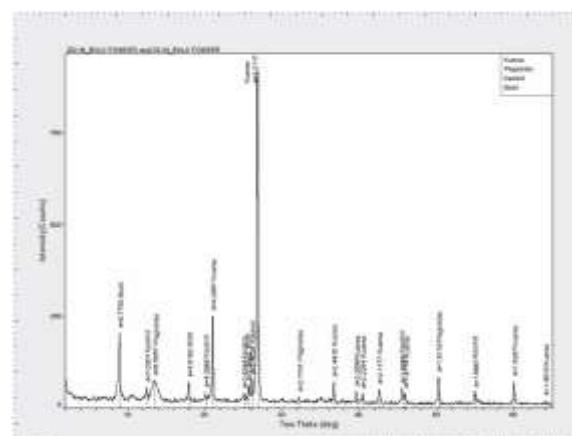
Data XRD dari tiga sampel batuan yang diuji menunjukkan mineral lempung yang terkandung pada batuan terowongan yakni mineral lempung kaolin.

Di lokasi terowongan, dilakukan pengujian XRD sampel yang diambil berdasarkan karakter fisik sampel batu yang bercampur mineral lempung halus berwarna putih dan bertekstur halus serta licin. Dari hasil bacaan diafftogram XRD terdapat beberapa mineral yang terkandung dalam batuan, yakni kuarsa, biotit, plagioklas dan mineral lempung kaolin.

Mineral lempung kaolin dapat menyebabkan pegerakan massa batuan akibat sifat fisiknya yang halus, ketika berinteraksi dengan air, mineral lempung tersebut berpotensi besar menyebabkan deformasi didalam terowongan. Mineral lempung kaolin umumnya tumbuh dibidang-bidang rekanan batuan (kekar) dan bidang foliasi yang menjadi bidang perlemahan dari batuan, sehingga menyebabkan potensi deformasi yang cukup besar.

Nama Sampel / Sample Name	2-Theta	d(Å)	I%	FWHM	Mineral / Mineral
2 XRD-02-IN INLET TEROWONGAN	9.039	9.775	20.4	0.244	Biotit
	12.58	7.0307	3.1	0.2	Kaolinit
	13.6	6.5057	5.5	0.704	Plagioklas
	18.018	4.9192	5.8	0.247	Biotit
	20.179	4.3968	2	0.133	Kaolinit
	21.162	4.2067	25.5	0.165	Kuarsa
	25.14	3.5394	2.1	0.25	Kaolinit
	25.739	3.4584	3.5	0.128	Biotit
	26.159	3.4058	6.3	0.277	Kaolinit
	26.9	3.3117	100	0.197	Kuarsa
	32.282	2.7701	1.7	0.174	Plagioklas
	36.779	2.4416	6.3	0.246	Kuarsa
	39.681	2.2693	3.5	0.223	Kuarsa
	40.501	2.2254	3	0.222	Kuarsa
	42.66	2.1177	4.7	0.293	Kuarsa
	45.621	1.9869	4.7	0.417	Kaolinit
	46	1.9714	3	0.536	Kuarsa
	50.321	1.8118	8.3	0.241	Plagioklas
	55.054	1.6667	3.4	0.323	Kaolinit
	60.079	1.5387	6.8	0.221	Kuarsa
	64.103	1.4515	1.2	0.319	Kuarsa

Tabel Hasil Pengujian XRD Pada Sampel Batuan Terowongan



Grafik Diaftogram Hasil Pengujian XRD Pada Sampel Batuan Terowongan

3.4. Rock Mass Rating (RMR)

Berdasarkan hasil face mapping, nilai RMR yang relatif rendah dengan nilai rata-rata 28 dengan kondisi batuan yang relatif remuk akibat intensitas kekar rapat yang tercemarkan pada data nilai RQD rata-rata 30%. Kemudian data face mapping terowongan mengahsilkan bacaan nilai RMR rata-rata 28 menunjukkan secara geoteknik batuan masuk dalam kategori batuan kelas IV (jelek).



3.5. Pengamatan Deformasi

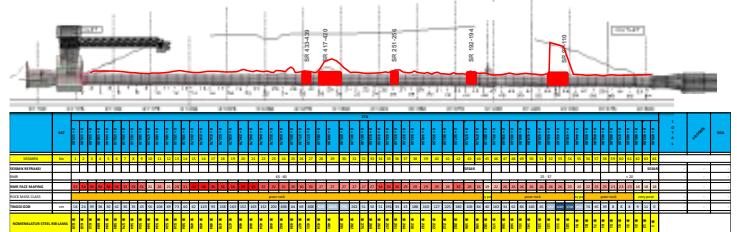
Deformasi terjadi di sepanjang terowongan dengan ditandai geological overbreak, runtuhan serta longsoran galian terowongan sampai dengan pergerakan steelrib.

Runtuhan terowongan terjadi dari yang terkecil 8 cm hingga yang terbesar 40 meter.

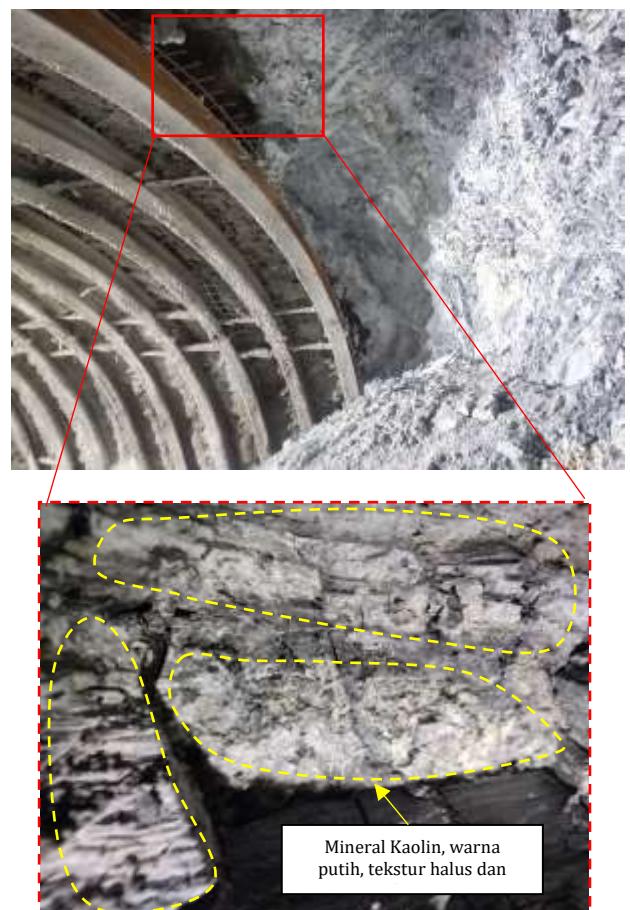
3.6. Hubungan antara Hasil Seismik Refraksi, Petrografi, X-Ray Diffraction (XRD), Rock Mass Rating (RMR) dan Deformasi

- Pada hasil Seismik refraksi menunjukkan sesar minor pada sekitar STA +375 dan +500, dimana pada sekitar STA tersebut terjadi beberapa runtuhan terowongan, bahkan di antara sesar minor tersebut terjadi runtuhan terbesar sampai dengan 40 meter.
- Kondisi tekstur batuan yang tercermin dalam petrografi merupakan batuan metamorf dengan kekar batuan yang rapat ditunjukkan dengan kondisi batuan yang terlihat remuk.
- Kondisi sisipan mineral kaolin yang terdapat di hasil XRD menunjukkan karakteristik antar kekar yang licin, sehingga dengan penggalian pekerjaan terowongan ini mengakibatkan jatuhan material lepas antar kekar batuan.

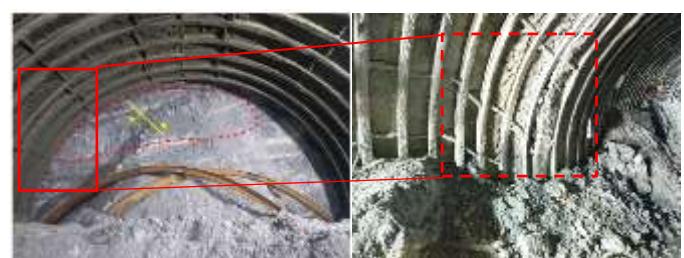
- Pada parameter RMR yang didapatkan langsung dari hasil face mapping menunjukkan pada kondisi RMR rendah terjadi deformasi struktur yang cukup besar.



Hubungan antara Hasil Seismik Refraksi, Petrografi, X-Ray Diffraction (XRD), Rock Mass Rating (RMR) dan Deformasi



Kondisi Isian Mineral Lempung Kaolin pada Batuan di Lokasi Deformasi



Pola Patahan Batuan di Sekitar Area Deformasi Steel Rib

4. Kesimpulan

Terdapat hubungan antara hasil Seismik Refraksi, Petrografi, X-Ray Diffraction (XRD), Rock Mass Rating (RMR) dan Deformasi

- 4.1. Deformasi terjadi di sepanjang terowongan dengan ditandai geological overbreak, runtuhan serta longsoran galian terowongan sampai dengan pergerakan steelrib. Runtuhan terowongan terjadi dari yang terkecil 8 cm hingga yang terbesar 40 meter.
- 4.2. Pada hasil Seismik refraksi menunjukkan sesar minor pada sekitar STA +375 dan +500, dimana pada sekitar STA tersebut terjadi beberapa runtuhan terowongan, bahkan di antara sesar minor tersebut terjadi runtuhan terbesar sampai dengan 40 meter.
- 4.3. Kondisi tekstur batuan yang tercermin dalam petrografi merupakan batuan metamorf dengan kekar batuan yang rapat ditunjukkan dengan kondisi batuan yang terlihat remuk.
- 4.4. Kondisi sisipan mineral kaolin yang terdapat di hasil XRD menunjukkan karakteristik antar kekar yang licin, sehingga dengan penggalian pekerjaan terowongan ini mengakibatkan jatuhnya material lepas antar kekar batuan.
- 4.5. Pada parameter RMR yang didapatkan langsung dari hasil face mapping menunjukkan pada kondisi RMR rendah terjadi deformasi struktur yang cukup besar.

Daftar pustaka

- Bieniawski, Z.T.. (1989). Engineering Rock Mass Classifications. Pennsylvania: Wiley
- Triwibowo, Bambang. (2008). Tunneling "The New Austrian Tunneling Method" Cirata Project. Jakarta: Cirata Project
- Kurniawan, Paulus dan Basuki Hadimuljono. (2020). Applied Geotechnics for Engineers 1. Jakarta: Penerbit Andi