Perkuatan Terowongan Pengelak Menggunakan Rockbolt dan Shotcrete Bendungan Bagong Trenggalek

Farid Pandu Wijaya, Kuntjoro, dan Sungkono Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) *e-mail*: kuntjoro_rivers@yahoo.co.id

Abstrak—Terowongan pengelak bendungan Bagong terletak di sisi kanan sungai Bagong (sisi barat), dibangun pada lapisan batuan keras (fresh rock) yang menunjukan relatif stabil. Pelaksanaan konstruksi terowongan pengelak menggunakan metode peledakan (blasting) dalam penggaliannya, yang menyebabkan beberapa potensi risiko berkaitan dengan kestabilan. Sehingga pada tahapan konstruksi terowongan pengelak bendungan Bagong perlu diberikan perkuatan untuk menjaga kestabilan. Perkuatan yang digunakan adalah angkur batuan (Rock bolt), dan beton semprot (Shotcrete). Plaxis V.20 merupakan salah satu perangkat lunak dalam bidang geoteknik yang menggunakan metode elemen hingga yang bisa digunakan untuk memodelkan stabilitas terowongan menggunakan perkuatan Rock bolt dan Shotcrete. Dengan demikian tujuan dari tulisan ini adalah untuk menganalisis stabilitas terowongan. Dari hasil pemodelan diperoleh hasil setiap penambahan perkuatan akan menyebabkan penambahan nilai angka keamanan dan menurunkan nilai deformasi. Besarnya nilai keamanan dipengaruhi oleh nilai massa batuan atau rock mass rating (RMR) dan faktor disturbansi. Pada zona 1 yang memiliki nilai RMR sebesar 68 dan faktor disturbansi sebesar 0,8 didapatkan angka keamanan 6.110 dengan deformasi sebesar 0.0010 m. Pada Zona 2 didapatkan angka keamanan sebesar 1,717 dan deformasi sebesar 0,00801. Pada Zona 3 didapatkan angka keamanan sebesar 1,993 dan deformasi sebesar 0,00482. Pada Zona 4 didapatkan angka keamanan sebesar 2,240 dan deformasi sebesar 0,00873. Pada Zona 5 didapatkan angka keamanan sebesar 1,936 dan deformasi sebesar 0,00707.

Kata Kunci—Metode Elemen Hingga, RMR, Rockbolt, Shotcrete, Stabilitas, Terowongan.

I. PENDAHULUAN

TEROWONGAN pengelak bendungan Bagong merupakan salah satu konstruksi pada bendungan Bagong yang terletak di desa Sumurup, kecamatan Bendungan, Kabupaten Trenggalek, ditunjukkan pada Gambar 1. Bangunan ini berfungsi sebagai saluran yang mengelakkan aliran sungai Bagong ketika masa konstruksi tubuh bendungan Bagong dilaksanakan. Terowongan pengelak bendungan Bagong dari analisis hidrologi dan hidrolika, direncanakan akan memiliki dimensi tapal kuda yang memiliki dimensi penampang basah sebesar 4 meter dan dimensi galian sebesar 5,25 meter. Panjang terowongan sepanjang 543 meter dengan elevasi dasar hulu +262 mdpl. Terletak disisi kanan sungai Bagong (sisi barat), kondisi lapisan tanahnya menunjukkan batuan keras (*fresh rock*) yang mengindikasikan relatif mengurangi potensi longsor.



Gambar 1. Lokasi pekerjaan terowongan bendungan Bagong.

Pelaksanaan konstruksi terowongan pengelak menggunakan metode peledakan (blasting) dalam penggaliannya, yang menyebabkan beberapa potensi risiko berkaitan dengan kestabilan. Sehingga ketika massa konstruksi terowongan pengelak bendungan Bagong perlu diberikan perkuatan untuk menjaga kestabilan. Perkuatan yang digunakan adalah angkur batuan (rock bolt), dan beton semprot (shotcrete). Plaxis V.20 merupakan salah satu perangkat lunak dalam bidang geoteknik yang menggunakan metode elemen hingga yang bisa memodelkan stabilitas terowongan menggunakan perkuatan Rock bolt dan Shotcrete. Parameter yang digunakan sebagai data input pada metode elemen hingga berdasarkan persamaan empiris Rock Mass Rating (RMR). Pemodelan yang dilakukan dengan membagi terowongan menjadi lima zona yang masing-masing dilakukan evaluasi terhadap perkuatan yang dipakai dengan sistem Rock Mass Rating (RMR) menggunakan perangkat lunak Plaxis V.20 dengan luaran berupa angka keamanan dan nilai deformasi. Oleh karena itu, tujuan dari perencanaan ini adalah menentukan desain perkuatan yang digunakan pada masing-masing zona dengan mengetahui faktor keamanan dan nilai deformasi yang terjadi selama tahap konstruksi terowongan dengan mengetahui nilai keamanan > 1.5 [1] dan nilai deformasi < 6% besar dimensi terowongan [2].

II. METODOLOGI

A. Perencanaan

Perencanaan stabilitas terowongan pengelak didasarkan pada metode empiris dari nilai RMR dengan analisis metode elemen hingga menggunakan PlaxisV.20. Proses pemodelan stabilitas terowongan pengelak dimulai dengan menentukan klasifikasi massa batuan dengan analisis geologi, kebutuhan perkuatan, dan geometri terowongan sebagai data *input* pada



Gambar 2. Proses pemodelan stabilitas terowongan pengelak.

Plaxis V.20. Data *input* batuan harus dihitung dengan beberapa persamaan, kebutuhan perkuatan berdasarkan persamaan, beban batuan dihitung berdasarkan persamaan. Akhirnya akan diperoleh hasil luaran berupa desain terowongan dengan sistem perkuatan, angka keamanan, dan nilai deformasi yang terjadi pada terowongan. Tahapan perhitungan stabilitas terowongan ditunjukkan pada Gambar 2.

Dalam perencanaan stabilitas terowongan pengelak dalam menentukan parameter massa batuan digunakan sistem RMR dapat mengetahui beberapa parameter untuk pemodelan dengan metode elemen hingga pada Plaxis V.20 dengan beberapa pendekatan [3]. Parameter-parameter tersebut di antaranya adalah Modulus Deformasi (*Em*), Uniaxial Compressive Strength (σ cm), Friction Angle (ϕ m), Kohesi (*Cm*), dan Poisson's Ratio (*Vm*). Secara berurutan ditunjukkan pada Persamaan (1)–(5).

$$Em = 0,0097RMR3.54 (kPa)$$
 (1)

$$\sigma cm = 0,0016RMR25 (kPa) \tag{2}$$

$$\phi m = 20 + 0.5 RMR$$
 (°) (3)

$$Cm = \frac{\sigma cm}{2} - \frac{1 - \sin \phi m}{\cos \phi m} (dpa) \tag{4}$$

$$Vm = 0.5 - 0.2 \frac{RMR}{RMR + 0.2(100 - RMR)}$$
(5)

Dalam menentukan beban batuan yang berpengaruh pada terowongan di bawah permukaan tanah atau batuan, untuk menentukan nilai beban batuan yang mengelilingi terowongan, dengan menggunakan Persamaan (6).

$$P = (2,32 - 0,035.RMR_{89} + 0,001.H + 0,03.a)MPa (6)$$

Di mana P adalah Beban Batuan yang mengelilingi Terowongan (MPa). H adalah Kedalaman Terowongan di bawah permukaan tanah (m) dan a adalah radius yang terdampak beban batuan terowongan (m). Korelasi RMR dan GSI dengan Persamaan (7), digunakan untuk menghitung kriteria keruntuhan berdasarkan persamaan yang dikemukakan Hoek-Brown [4].

$$GSI = RMR - 5 \tag{7}$$

Hoek mengusulkan untuk mengganti parameter RMR oleh GSI, ketika massa batuan didominasi oleh struktur geologi. Dengan mengkorelasikan antara parameter RMR dan GSI menghasilkan Persamaan (8).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \tag{8}$$

dengan

$$mb = mi \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \tag{9}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \tag{10}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(exp^{-\frac{GS1}{15}} - exp^{-\frac{20}{3}} \right)$$
(11)

Kebutuhan perkuatan yang digunakan pada masingmasing zona dengan mempertimbangkan pemeringkatan pada Sistem RMR dengan klasifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 1.

B. Metode Pelaksanaan

Dari hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak menggunakan Plaxis V.20, metode penggalian yang digunakan dengan mengacu pada faktor kegangguan yang terdapat pada Tabel 2 adalah metode penggalian dengan metode peledakan dan penggalian secara mekanik menggunakan alat berat. Metode peledakan memiliki tahapan yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Marking* adalah kegiatan penandaan lubanglubang bor (*drill/blast hole patterns*), *drilling* adalah kegiatan pembuatan lubang tempat diletakkannya material peledak, *charging* adalah proses pengisian *drill/blast hole* dengan bahan peledak dan material pendukung lainnya. Peledakan, dan *finishing* adalah pengangkutan material hasil peledakan.

Tabel 1. Kebutuhan Perkuatan Terowongan Berdasarkan Nilai RMR							
Kelas Massa Batuan	Teknik Penggalian	Rock Bolts (diameter 25 mm, fully grouted)	Shotcrete	Steel Sets			
II–Baik RMR 61–80	Seluruh permukaan, tebal 1–1,5 m. Perkuatan penuh 20 m dari muka.	Di tempat itu, bolt pada atap sepanjang 3 m, jarak 2,5 m dengan <i>wire mesh</i> .	50 mm pada atap di tempat yang diharuskan.	Tidak ada			
III–Sedang RMR 41–60	Bagian atas dan <i>bench</i> tebal 1,5–3 m pada bagian atas. Perkuatan dipasang setelah peledakan. Perkuatan lengkap 10 m dari muka.	Bolt secara sistematis sepanjang 4 m dengan jarak 1,5–2 m pada atap dan dinding dengan wire mesh pada atap.	50–100 mm pada atap dan 30 mm pada sisinya.	Tidak ada			

Tabel 1.
Parameter Masukan pada Perangkat Lunak Plaxis V.20

Properti	Zona I	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
STA	0+37 - 1+50	1+50 - 3+00	3+00 - 4+00	4+00 - 5+00	5+00 - 6+50
Lithology	Breksi Andesit	Breksi Andesite	Limestone	Breksi Andesite	Limestone
RMR	68,00	55,00	60,00	55,00	57,00
GSI	63,00	50,00	55,00	50,00	52,00
	Good	Fair	Fair	Fair	Fair
Distubance	0,80	0,50	0,80	0,00	0,50
Erm (Kpa)	$2,29 \times 10^{6}$	$1,08 \times 10^{6}$	$1,47 \times 10^{6}$	$1,08 \times 10^{6}$	$1,23 \times 10^{6}$
Ei (Kpa)	$1,10 \times 10^{8}$	$5,41 \times 10^{7}$	$7,36 \times 10^{7}$	$5,41 \times 10^{7}$	$6,14 \times 10^{7}$
σcm (Kpa)	$3,90 \times 10^{4}$	$2,30 \times 10^{4}$	$2,86 \times 10^{4}$	$2,30 \times 10^{4}$	$2,51 \times 10^{4}$
Poisson's Ratio	0,317	0,328	0,324	0,328	0,326
mb parameter	2,100	1,572	1,305	1,757	1,932
S parameter	0,004	0,001	0,001	0,001	0,002
a parameter	0,669	0,673	0,671	0,673	0,672
γ dry (kN/m3)	14	14	14	14	14
γ sat (kN/m3)	19	19	19	19	19
Φm (°)	38,7	32,4	35,0	32,4	33,9
$\Psi(^{\circ})$	8,7	2,4	5,0	2,4	3,9
Cm (Mpa)	0,337	0,268	0,295	0,274	0,284
Thickness (m)	32,4	37,9	42,3	41,5	37,4
Load (Kpa)	444,87	905,40	734,81	909,03	834,91

C. Metode Kerja Rock Bolt

Pada pelaksanaan pemasangan material *rock bolt* yang digunakan untuk menstabilkan konstruksi terowongan pengelak memiliki tahapan pekerjaan pemboran lubang, persiapan material *rock bolt*, Persiapan material injeksi (*grouting*), Penanaman angkur dan injeksi, Injeksi, dan penempatan material atau aksesoris yang diilustrasikan pada Gambar 4.

D. Metode Kerja Shotcrete

Pada pelaksanaan pemasangan material *shotcrete* yang digunakan untuk memproteksi permukaan konstruksi terowongan pengelak memiliki tahapan persiapan material *shotcrete*, pengecekan garis kesesuaian desain bidang galian, pemasangan *wiremesh* dengan *wheephole*, dipasang beton *decking* sebagai pemisah antara permukaan *wiremesh* dengan batuan, dan selanjutnya penyemprotan *shotcrete* yang diilustrasikan pada Gambar 5.

III. HASIL DAN DISKUSI

Pemodelan yang dilakukan pada terowongan pengelak bendungan Bagong ini dilakukan dengan membagi terowongan menjadi 5 zona yang ditunjukkan pada Gambar 7. Dengan parameter batuan yang diperoleh dari pendekatan menggunakan Persamaan (1)–(11) hingga diperoleh hasil seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 yang nantinya data tersebut sebagai data parameter masukan pada Plaxis V.20, sedangkan parameter perkuatan ditunjukkan pada Tabel 3.

Dengan Rock Mass Rating (RMR), Geological Strength Index (GSI), disturbance adalah faktor kegangguan, Erm modulus deformasi, Ei adalah modulus batuan intact, σcm adalah Uniaxial Compression Strength (UCS), Φm adalah fraction angle, Ψ adalah dilatasi angle.

Untuk data teknis *Shotcrete* memiliki nilai E Modulus sebesar 26,5 MPa, Poisson's *Ratio* sebesar 0,2, dan *Uniaxial Compression Test* sebesar 26,75 MPa. Pada pemodelan yang dilakukan pada masing-masing zona dilakukan dengan 4 tahapan, yaitu tinjauan sebelum diberi perkuatan, setelah diperkuat *rock bolt*, setelah diperkuat *rock bolt* dan *shotcrete*, dan setelah ditambah beban gempa. Pada masing-masing tahapan akan menghasilkan luaran berupa angka keamanan dan nilai deformasi.

A. Pemodelan Stabilitas pada Zona 1

Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 1 menggunakan Plaxis V.20 dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 4 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

B. Pemodelan Stabilitas pada Zona 2

Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 2 menggunakan Plaxis V.20 dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 5 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

C. Pemodelan Stabilitas pada Zona 3

Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 3 menggunakan Plaxis V.20 dapat dilihat pada Gambar 9 dan Tabel 6 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

D. Pemodelan Stabilitas pada Zona 4

Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 4 menggunakan Plaxis V.20



Gambar 3. Tahapan penggalian dengan metode peletakan.



Gambar 4. Ilustrasi pemasangan rock bolt.



Gambar 5. Ilustrasi pemasangan shotcrete.



Gambar 6. Pemodelan stabilitas terowongan zona 1.

dapat dilihat pada Gambar 10 dan Tabel 7 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

E. Pemodelan Stabilitas pada Zona 5

Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 4 menggunakan Plaxis V.20 dapat dilihat pada Gambar 11 dan Tabel 8 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

Data Teknis Rock Bolt							
Teknis Rock Bo	lt	Keterangan					
Kualitas Steel	700 N/m ²						
Diameter Baut		25 mm					
Beban Batas (yield load) Steel		140 kN					
Beban Ultimate (ultimate load) Steel	180 kN					
Regangan Aksial Ultimate stee	el	14%					
Berat baut tanpa face plate dar	n mur	2 kg/m					
panjang baut	Bervariasi						
Diameter lubang bor	35–38 m						
Angka Keamana	n dan Deformasi Zon	a 1					
Tahapan Tiniau	Angka keamanan	Deformasi (m)					
Sebelum diberi perkuatan	2 504	0.00591					
Rock Bolt	5 980	0,00125					
Rock Bolt Shotcrete	6,110	0.00110					
Gempa Rock Bolt, Shotcrete	5,394	0.00150					
Sempa, Reen Bon, Sheler ere	0,071	0,00120					
7	Fabel 5.						
Angka Keamana	n dan Deformasi Zon	ia 2					
Tahapan Tinjau	Angka keamanan	Deformasi (m)					
Sebelum diberi perkuatan	1,403	0,01230					
Rock Bolt	1,633	0,00927					
Rock Bolt, Shotcrete	1,717	0,00801					
Gempa, Rock Bolt, Shotcrete	1,667	0,00945					
Anglia Kaamana	l'abel 6. n dan Dafammasi Zan						
Aligka Kealilalia		Defermenti (m)					
lanapan linjau	Angka keamanan	Deformasi (m)					
Sebelum diberi perkuatan	1,440	0,00911					
Rock Bolt	1,906	0,00501					
ROCK BOIL, Shotcrete	1,995	0,00482					
Gempa, Rock Bou, Shoicrele	1,823	0,00340					
7	Tabel 7						
Angka Keamana	n dan Deformasi Zor	na 4					
Tahapan Tinjau	Angka keamanan	Deformasi (m)					
Sebelum diberi perkuatan	1,797	0,01220					
Rock Bolt	2,162	0,00938					
Rock Bolt, Shotcrete	2,240	0,00873					
Gempa, Rock Bolt, Shotcrete	5,394	0,00150					
<u>^</u>							
Tabel 8.							
Angka Keamanan dan Deformasi Zona 5							
Tahapan Tinjau	Angka keamanan	Deformasi (m)					
Sebelum diberi perkuatan	1,797	0,01220					
Rock Bolt	2,162	0,00938					
Rock Bolt, Shotcrete	2,240	0,00873					
Gempa, Rock Bolt, Shotcrete	5,394	0,00150					

Tabal 3

F. Hasil Analisis dan Pembahasan

Dalam menentukan kebutuhan material dan desain pemasangan perkuatan pada masing-masing zona pada terowongan pengelak mengacu pada Tabel 1. Sehingga diperoleh hasil pemodelan yang dilakukan pada masing-masing zona menunjukkan bahwa setiap ditambahkan perkuatan akan mengalami kenaikan angka keamanan yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan penurunan nilai deformasi yang ditunjukkan pada Gambar 10. Namun ketika ditambah beban gempa, angka keamanan akan mengalami penurunan dan nilai deformasi akan mengalami kenaikan pada masing-masing zona.

Hasil analisis angka Keamanan dan Deformasi pada pemodelan menggunakan Plaxis V.20 bisa dikatakan pemodelan yang dilakukan di masing-masing zona dalam kondisi aman. Mengacu pada nilai keamanan mohr coulomb yaitu suatu konstruksi terowongan dikatakan aman ketika angka keamanannya >1,5 [2]. Pada pemodelan menggunakan Plaxis V.20, pemodelan terowongan di masing-masing zona dengan



Gambar 7. Pembagian zona pada terowongan bendungan Bagong.



Gambar 8. Pemodelan stabilitas terowongan zona 2.



Gambar 9. Pemodelan stabilitas terowongan zona 3.

pemasangan perkuatan *rock bolt* dan *shotcrete* mencapai nilai >1,5 ditunjukkan pada Gambar 12. Selanjutnya untuk nilai deformasi, batas maksimal suatu deformasi adalah sebesar 6% dari besar dimensi bukan suatu terowongan [2]. Sehingga pada perencanaan ini, karena dimensi galian sebesar 5,25 m, maka deformasi maksimal yang diizinkan adalah sebesar 0,315 m. Hasil dari pemodelan stabilitas menggunakan *rock bolt* dan *shotcrete* pada masing-masing zona menghasilkan nilai yang memenuhi syarat izin yang ditunjukkan pada Gambar 13.

Pada keseluruhan zona menunjukkan bahwa potensi keruntuhan yang terjadi berupa jatuhan pada atap terowongan. Dengan hasil angka keamanan paling tinggi dan nilai deformasi paling rendah terjadi pada zona 1, karena memiliki nilai



Gambar 10. Pemodelan stabilitas terowongan zona 4.



Gambar 11. Pemodelan stabilitas terowongan zona 5.

RMR tertinggi. Sedangkan zona yang memiliki angka keamanan dan nilai deformasi paling kritis terjadi pada zona 2 dengan nilai RMR terkecil.

Hasil analisis pemodelan yang dilakukan pada Plaxis V.20, penambahan perkuatan tetap dilakukan walaupun pada tahapan (*phase*) sebelumnya kondisi dari pemodelan yang ditinjau sudah dalam kondisi aman. Hal ini karena, jika mempertimbangkan pelaksanaan konstruksi terowongan pada masa penggalian, metode yang digunakan adalah peledakan (*blasting*). Peledakan yang dilakukan pada terowongan dapat memengaruhi kondisi batuan pada lokasi pekerjaan terowongan, hal tersebut akan memengaruhi kestabilan terowongan. Sehingga penambahan perkuatan pada kondisi batuan yang *intact*, yaitu kondisi batuan yang tidak mengalami kondisi rekahan yang signifikan tetap dilakukan untuk menjaga kestabilan terowongan dan menghindari keruntuhan akibat penggalian menggunakan metode peledakan tersebut.

IV. KESIMPULAN

Dalam perencanaan stabilitas terowongan pengelak pada Bendungan Bagong yang dilakukan ini, sistem RMR digunakan untuk mengevaluasi massa batuan pada terowongan sekaligus digunakan sebagai metode empiris untuk menentukan konfigurasi sistem perkuatan *rock bolt* dan *shotcrete* yang digunakan. Semakin besar nilai RMR maka semakin sedikit perkuatan yang digunakan.

Dari hasil analisis stabilitas menggunakan metode elemen hingga pada Plaxis V.20 menunjukkan bahwa setiap tahapan vang ditinjau akan memiliki hasil angka keamanan dan nilai deformasi yang berbeda. Setiap penambahan perkuatan pada pemodelan pada masing-masing zona akan menaikkan angka keamanan dan menurunkan nilai deformasi. Sedangkan penambahan beban gempa akan menurunkan angka keamanan dan menaikkan nilai deformasi pada masingmasing zona. Pada zona 1 yang memiliki nilai RMR sebesar 68 dan faktor kegangguan 0,8 didapatkan angka keamanan 6,110 dengan deformasi sebesar 0,0010 m. Pada Zona 2 didapatkan angka keamanan sebesar 1,717 dan deformasi sebesar 0,00801. Pada Zona 3 didapatkan angka keamanan sebesar 1,993 dan deformasi sebesar 0,00482. Pada Zona 4 didapatkan angka keamanan sebesar 2,240 dan deformasi sebesar 0,00873. Pada Zona 5 didapatkan angka keamanan sebesar 1,936 dan deformasi sebesar 0,00707. Secara umum dari pemodelan yang dilakukan dalam kondisi baik pada masing-masing zona, dari sebelum dipasang perkuatan hingga tahap pemasangan perkuatan.

Pemodelan stabilitas yang dilakukan pada masing-masing zona telah memenuhi persyaratan minimum angka keamanan (*Safety Factor* > 1,5) dan Nilai deformasi (Def < 6% D). Zona 2 memiliki hasil yang paling kritis dibandingkan dengan Zona yang lainnya, sedangkan zona 1 memiliki hasil angka keamanan paling tinggi dengan nilai deformasi paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa nilai RMR akan memengaruhi angka keamanan dan nilai deformasi yang terjadi pada pemodelan yang dilakukan, semakin besar nilai RMR maka semakin besar pula angka keamanan dan semakin kecil nilai deformasi yang dihasilkan.

Pemasangan perkuatan pada terowongan pengelak tetap dilakukan meskipun angka keamanan pada tahapan konstruksi sebelumnya pada hasil pemodelan menunjukkan kondisi aman karena mempertimbangkan metode penggalian yang digunakan pada terowongan pengelak bendungan Bagong menggunakan metode peledakan yang dapat memengaruhi kestabilan konstruksi pada terowongan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional, "Persyaratan Perancangan Geoteknik SNI 8460:2017," Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2017.
- [2] H. Y. Liu, J. C. Small, dan J. P. Carter, "Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 23, no. 4, hal. 399–420, Jul 2008, doi: 10.1016/J.TUST.2007.06.009.
- [3] S. M. Abbas dan H. Konietzky, "Introduction to geomechanics: Rock mass classification systems," Department of Rock Mechanics, Technical University Freiberg, Germany, 2017.
- [4] D. S. Agustawijaya, *Geologi Teknik*, 1st ed. Yogyakarta: Andi Offset, 2019. ISBN: 978-623-01-0188-5.