

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 (E_m), *Uniaxial Compressive Strength* (σ_{cm}), *Friction Angle* (ϕ_m), Kohesi (C_m), dan *Poisson's Ratio* (V_m). Secara berurutan ditunjukkan pada Persamaan (1)–(5).

$$E_m = 0,0097RMR^{3.54} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

$$\sigma_{cm} = 0,0016RMR^{25} \text{ (kPa)} \quad (2)$$

$$\phi_m = 20 + 0,5 RMR \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3)$$

$$C_m = \frac{\sigma_{cm}}{2} - \frac{1 - \sin \phi_m}{\cos \phi_m} \text{ (dPa)} \quad (4)$$

$$V_m = 0,5 - 0,2 \frac{RMR}{RMR + 0,2(100 - RMR)} \quad (5)$$

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).

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

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 kri-

teria keruntuhan berdasarkan persamaan yang dikemukakan Hoek-Brown [4].

$$GSI = RMR - 5 \quad (7)$$

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).

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

dengan

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (9)$$

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

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

Kebutuhan perkuatan yang digunakan pada masing-masing zona dengan mempertimbangkan penerkatan 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 gangguan 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 lubang-lubang 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.	<i>Bolt</i> secara sistematis sepanjang 4 m dengan jarak 1,5–2 m pada atap dan dinding dengan <i>wire mesh</i> 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 1	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
	<i>Good</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>	<i>Fair</i>
<i>Disturbance</i>	0,80	0,50	0,80	0,00	0,50
<i>Erm</i> (Kpa)	$2,29 \times 10^6$	$1,08 \times 10^6$	$1,47 \times 10^6$	$1,08 \times 10^6$	$1,23 \times 10^6$
<i>Ei</i> (Kpa)	$1,10 \times 10^8$	$5,41 \times 10^7$	$7,36 \times 10^7$	$5,41 \times 10^7$	$6,14 \times 10^7$
σ_{cm} (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
Φ_m (°)	38,7	32,4	35,0	32,4	33,9
Ψ (°)	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 penge-lak 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 gangguan, *Erm* modulus deformasi, *Ei* adalah modulus batuan intact, σ_{cm}

adalah *Uniaxial Compression Strength* (UCS), Φ_m 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

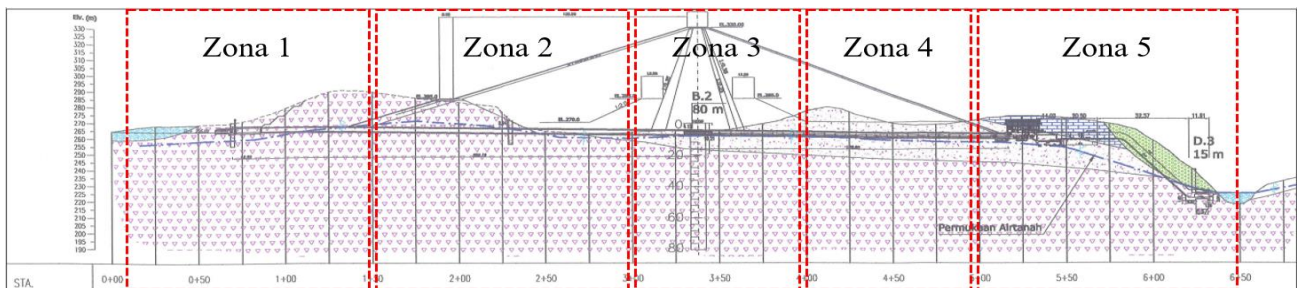
Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 2 menggunakan Plaxis V.20 dapat dilihat pada Gambar 8 dan Tabel 5 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

C. Pemodelan Stabilitas pada Zona 3

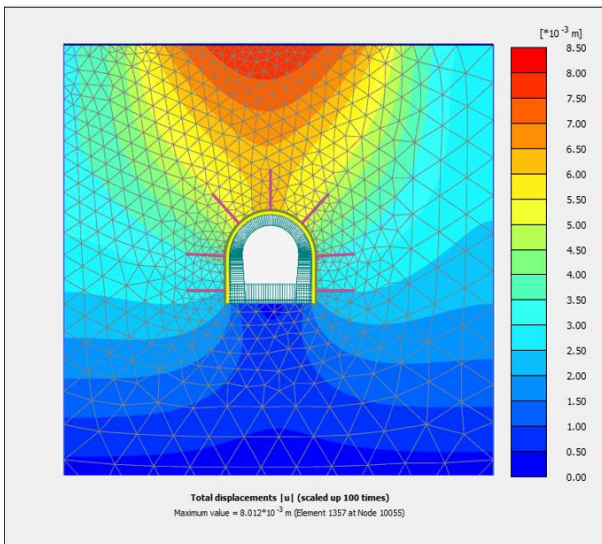
Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 3 menggunakan Plaxis V.20 dapat dilihat pada Gambar 9 dan Tabel 6 yang ditinjau dalam 4 tahapan.

D. Pemodelan Stabilitas pada Zona 4

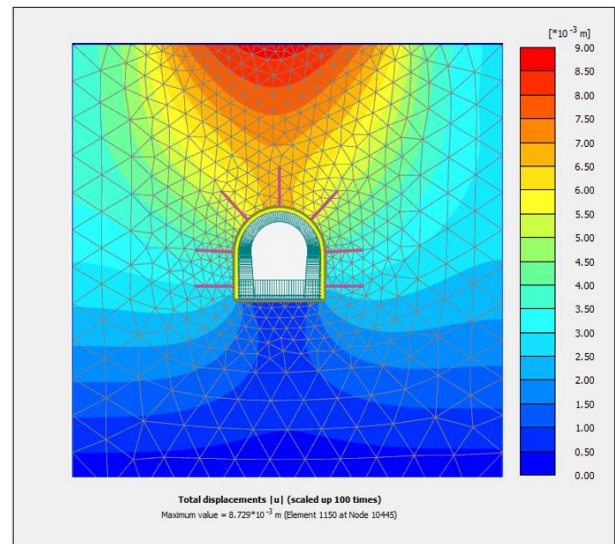
Untuk hasil pemodelan stabilitas terowongan pengelak bendungan Bagong pada Zona 4 menggunakan Plaxis V.20



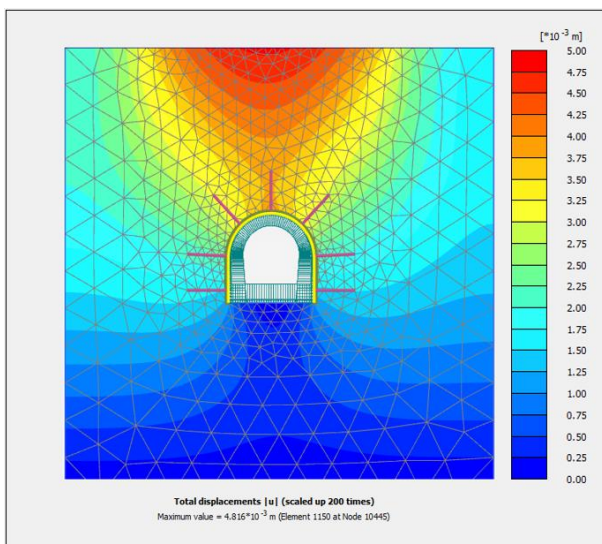
Gambar 7. Pembagian zona pada terowongan bendungan Bagong.



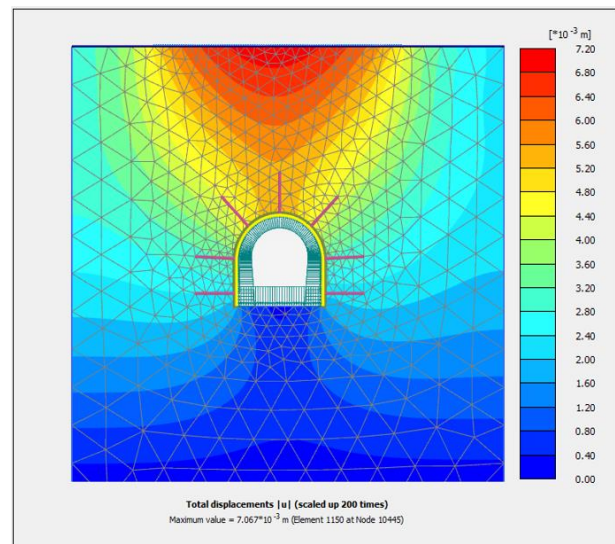
Gambar 8. Pemodelan stabilitas terowongan zona 2.



Gambar 10. Pemodelan stabilitas terowongan zona 4.



Gambar 9. Pemodelan stabilitas terowongan zona 3.



Gambar 11. Pemodelan stabilitas terowongan zona 5.

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 jatuhnya pada atap terowongan. Dengan hasil angka keamanan paling tinggi dan nilai deformasi paling rendah terjadi pada zona 1, karena memiliki nilai

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 yang 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 masing-masing zona. Pada zona 1 yang memiliki nilai RMR sebesar 68 dan faktor keganguan 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

- [1] 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.