

Volume. 5 Nomor.1 Periode Maret - Agustus 2019

- 1. Rancangan Geometri Lereng Penambangan Nikel Laterit pada Pit Bravo Romeo 2 PT Sulawesi Cahaya Mineral, Sulawesi Tenggara ... R. Hariyanto, Mahardika Damar Kunjana, Peter Eka Rosadi
- Analisis Fuel Consumption Alat Angkut Komatsu HD 785-7 dan Caterpillar Cat 777E pada Pengangkutan Lapisan Tanah Penutup di Pit Roto Tengah PT Kideco Jaya Agung Kalimantan Timur ... Danang Priambodo, Edy Nursanto, Dwi Poetranto
- The Wave Effect Analysys Caused by Blasting Toward Highwall Slope Stability at Coal Mining, Pit 3000 Block 05 Sb 1, Pt. Trubaindo Coal Mining, Kutai Western District, East Kalimantan Province ... Guntur Suryo Putro, Bambang Wisaksono, S Koesnaryo
- 4. Kajian Teknis Unit Peremuk Batu Andesit untuk Memenuhi Target Produksi dan Fraksi -30+20 Mm Di Pt. Amir Hajar Kilsi Kec. Pamotan, Kab. Rembang Provinsi Jawa Tengah...Sudaryanto, Gunawan Nusanto, Satria Mukhlis
- 5. Rancangan Teknis Penambangan Batubara Di Pit IV PT CMSB Kecamatan Tering Kabupaten Kutai BaratKalimantan Timur...Hartono, Abdul Rauf, Rezki Rahmawan
- 6. Rancangan Geometri Lubang Ledak Top Air Deck ... Arfani Kurniawan, Barlian Dwi Nagara, Nur Ali Amri
- 7. Pengaruh Metoda Peggalian NATMTerhadap Kestabilan Terowongan Ganda Cisumdawu Di Kabupaten Sumedang Provinsi Jawa Barat ... Singgih Saptono, Indun Titisariwati, Dika Pandu Atmaja
- 8. Estimasi Perhitungan Sumberdaya Batu Andesit dengan Menggunakan Metode Geolistrik Resistivity 2D di Desa Banyuasinspare Kecamatan Loano, Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah ...Winda, Wawong Dwi Ratminah, Heru Suharyadi
- 9. Kajian Teknis Produksi Alat Muat Dan Alat Angkut Untuk Memenuhi Target Produksi Batubara Di Site KBB Sarolangun, PT. Caritas Energi Indonesia, Kabupaten Sarolangun, Provinsi Jambi ... Anton Sudiyanto, Ketut Gunawan, Sherly Aprilia
- 10. Kajian Hidrogeologi Dan Penentuan Metode Penyaliran Pada Lubang Bukaan Bekas Penambangan Bijih Mangan Di Kliripan, Desa Hargorejo, Kecamatan Kokap Kabupaten Kulonprogo ... Suyono, Halimah Tusak Diah, Priyo Widodo, Hartono
- 11. Overview Metode Gumbel dan Metode Thomas Fiering Dalam Sistem Penyaliran Tambang ... Tedy Agung Cahyadi, Deka Citra Dinata
- 12. Kajian Teknis Kebutuhan Alat Muat dan Alat Angkut Untuk Memenuhi Target Produksi Ore dan Waste Pada Bulan Mei-Desember 2018 di PT Sago Prima Pratama J-Resources Sebuku Nunukan Kalimantan Utara ... Bagus Wiyono, Indah Setyowati, Muhammad Fadhil Goldi
- 13. Kajian Tekis Produksi Alat Gali Muat Volvo EC 480DL dan Alat Angkut DT CWE Quester 28064R Bulan September 2018 di Operasi Penambangan Batubara 4 Satker Penbara Blok Timur PT. Bukit Asam Tbk Kabupaten Muara Enim Provinsi Sumatra Selatan ... Kresno, Faizal Agnetto, Sudaryanto
- 14. Kajian Teknis Sistem Penyaliran Tambang Batubara Pada Pit C2 di PT. Sapta IndraSejati Jobsite Sambarata PT. Berau Coal Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Timur ... Hasywir Thaib Siri, Moh. Ilham Saputro, Waterman Sulistyana
- 15. Estimasi Sumberdaya Batu Andesit Dengan Metode Cross Section di PT. Harmak Indonesia Dusun Clapar 3, Hargowilis, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Daeah Iistimewa Yogyakarta ... Eddy Winarno, Arif Kurniawan, Suyono
- 16. Analisis Working Geometry Front Overburden Terhadap Cycle Time Backhoe di Pit D2PT Sapta Indra Sejati Jobsite Binnungan, Berau, Kalimantan Timur... Prio Widodo, Mega Dwi Aprilia, Rika Ernawati
- 17. Kajian Teknis Metode Double Decking pada Kedalaman Lubang Bor 8 m untuk Mengurangi Isian Bahan Peledak per Delay Peledakan dengan Batasan PPV 3 mm/s di Tambang Batubara PT Kaltim Prima Coal ... Barlian Dwinagara, Indun Titisariwati, Zukhrufa Awalia Rahma
- 18. Kajian Teknis Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Area Pengolahan Hasil Penambangan Batugamping PT Sugih Alamanugroho Kecamatan Ponjong Kabupaten Gunung Kidul Daerah Istimewa Yogyakarta ... Dyah Probowati, Michael Adicaksono Bramantio
- 19. Analisis Nilai Rimpull dan Load Factor terhadap Produksi Dump Truck CAT 793C pada Pit Tembaga Phase 6 Batu Hijau PT Newmont Nusa Tenggara ... Inmarlinianto, Winda, Goldy Putra U. S.
- 20. Analisis Interaksi Double Tunnel dengan Finite Element Method: Pengaruh Posisi Terowongan dan Tahapan Penggalian di Terowongan Cisumdawu ... M. Rahman Yulianto, Singgih Saptono, Sudaryanto
- 21. Analisis Kelayakan dan Kepekaan Ekonomi pada Penambangan Bijih Nikel di Tambang Pomalaa PT Antam Tbk. UBPN SULTRA, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara ... Wawong D.R., Peter E.R., Cahyo T.L.
- 22. Model Pengolahan Bijih Emas Menggunakan Metode Heap Leaching Dari Sample Urat Urat Emas di Desa Kertajaya Kecamatan Simpenan Kabupaten Sukabumi Provinsi Jawa Barat ... Nurkhamim, Arrina Khanifa, Andrawina, Deta Hibatul Wafi
- 23. Estimasi Sumberdaya Tanah Urug Menggunakan Metode Kontur di lup Tanah Urug Ngadimin, Desa Hargomulyo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY ... Hananto Dwi Kurniawan, Abdul Rauf, Inmarlinianto
- 24. Kajian Teknis Unit Peremuk Batu Andesit untuk Memenuhi Kebutuhan Agregat di PT SCD Readymix, Desa Wirokerten, Kec. Banguntapan, Kab. Bantul... Untung Sukamto, Satria Legowo, Oki Trinugroho

JURUSAN TEKNIK PERTAMBANGAN

M-UPN "VETERAN" YOGYAKAR'



JURNAL Teknologi Pertambangan

DAFTAR ISI

1.	Rancangan Geometri Lereng Penambangan Nikel Laterit pada Pit Bravo Romeo 2 PT Sulawesi Cahaya Mineral, Sulawesi Tenggara R. Hariyanto, Mahardika Damar Kunjana, Peter Eka Rosadi
2.	Analisis Fuel Consumption Alat Angkut Komatsu HD 785-7 dan Caterpillar Cat 777E pada Pengangkutan Lapisan Tanah Penutup di Pit Roto Tengah PT Kideco Jaya Agung Kalimantan Timur – Danang Priambada, Edu Numanta, Dud Pastanata
3.	The Wave Effect Analysys Caused by Blasting Toward Highwall Slope Stability at Coal Mining, Pit 3000 Block 05 Sb 1, Pt. Trubaindo Coal Mining, Kutai Western District, East Kalimantan
4.	Province Guntur Suryo Putro, Bambang Wisaksono, S Koesnaryo
5.	Tengah Sudaryanto, Gunawan Nusanto, Satria Mukhlis
6.	Rancangan Geometri Lubang Ledak Top Air Deck Arfani Kurniawan, Barlian Dwi Nagara,
_	Nur Ali Amri
7.	Pengaruh Metoda Peggalian NATMTerhadap Kestabilan Terowongan Ganda Cisumdawu Di
	Rabupaten Sumedang Provinsi Jawa Barat Singgih Saptono, Indun Titisariwati, Dika
8.	Estimasi Perhitungan Sumberdaya Batu Andesit dengan Monggunakan Matada Caskistrik
0.	Resistivity 2D di Desa Banyuasinspare Kecamatan Loano, Kabupaten Purworgio, Jawa
	Tengah Winda, Wawong Dwi Ratminah, Heru Suharvadi
9.	Kajian Teknis Produksi Alat Muat Dan Alat Angkut Untuk Memenuhi Target Produksi
	Batubara Di Site KBB Sarolangun, PT. Caritas Energi Indonesia, Kabupaten Sarolangun,
4.0	Provinsi Jambi Anton Sudiyanto, Ketut Gunawan, Sherly Aprilia
10.	Kajian Hidrogeologi Dan Penentuan Metode Penyaliran Pada Lubang Bukaan Bekas
	Kulonprogo Suyono Holimoh Tucah Diah Daina Mila I. J. Kulonprogo
11.	Overview Metode Gumbel dan Metode Thomas Figring Dolom Sistem Deversion The L
	Tedy Agung Cahvadi, Deka Citra Dinata
12.	Kajian Teknis Kebutuhan Alat Muat dan Alat Angkut Untuk Memenuhi Target Produksi Ore
	dan Waste Pada Bulan Mei-Desember 2018 di PT Sago Prima Pratama J-Resources Sebuku
	Nunukan Kalimantan Utara Bagus Wiyono, Indah Setyowati, Muhammad Fadhil Goldi
12	Keijen Takia Dradakai Alda Gili Mara Wila 72 teana da ang (98-107)
13.	28064B Bulan September 2018 di Operasi Barenkaran Bitakaran Bitakaran Bulan September 2018 di Operasi Barenkaran Bitakaran Bitakar
	Timur PT, Bukit Asam Thk Kabupaten Muara Enim Provinsi Sumatra Solatan, Krasma Esizak
	Agnetto, Sudaryanto
14.	Kajian Teknis Sistem Penyaliran Tambang Batubara Pada Pit C2 di PT. Sapta IndraSejati
	Jobsite Sambarata PT. Berau Coal Kabupaten Berau Provinsi Kalimantan Timur Hasvwir
	Thaib Siri, Moh. Ilham Saputro, Waterman Sulistyana
15.	Esumasi Sumberdaya Batu Andesit Dengan Metode Cross Section di PT. Harmak Indonesia
	Yogyakarta Eddy Winarno Arif Kurniawan Suyana
	(135-140)

16. Analisis Working Geometry Front Overburden Terhadap Cycle Time Backhoe di Pit D2PT Sapta Indra Seiati Jobsite Binnungan, Berau, Kalimantan Timur Prio Widodo, Mega Dwi Aprilia, Rika Ernawati (141-150)

17. Kajian Teknis Metode Double Decking pada Kedalaman Lubang Bor 8 m untuk Mengurangi Isian Bahan Peledak per Delay Peledakan dengan Batasan PPV 3 mm/s di Tambang Batubara PT Kaltim Prima Coal Barlian Dwinagara, Indun Titisariwati, Zukhrufa Awalia Rahma

- 18. Kajian Teknis Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Area Pengolahan Hasil Penambangan Batugamping PT Sugih Alamanugroho Kecamatan Ponjong Kabupaten Gunung Kidul Daerah Istimewa Yogyakarta Dyah Probowati, Michael Adicaksono Bramantio............ (158-171)
- 19. Analisis Nilai Rimpull dan Load Factor terhadap Produksi Dump Truck CAT 793C pada Pit Tembaga Phase 6 Batu Hijau PT Newmont Nusa Tenggara Inmarlinianto, Winda, Goldy Putra U. S. ______ (172-180)
- 20. Analisis Interaksi Double Tunnel dengan Finite Element Method: Pengaruh Posisi Terowongan dan Tahapan Penggalian di Terowongan Cisumdawu M. Rahman Yulianto,
- 21. Analisis Kelayakan dan Kepekaan Ekonomi pada Penambangan Bijih Nikel di Tambang Pomalaa PT Antam Tbk. UBPN SULTRA, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara

22. Model Pengolahan Bijih Emas Menggunakan Metode Heap Leaching Dari Sample Urat Urat Emas di Desa Kertajaya Kecamatan Simpenan Kabupaten Sukabumi Provinsi Jawa Barat

- 23. Estimasi Sumberdaya Tanah Urug Menggunakan Metode Kontur di Jup Tanah Urug Ngadimin, Desa Hargomulyo, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY ... Hananto Dwi
- 24. Kajian Teknis Unit Peremuk Batu Andesit untuk Memenuhi Kebutuhan Agregat di PT SCD Readymix, Desa Wirokerten, Kec. Banguntapan, Kab. Bantul... Untung Sukamto, Satria

Analisis Interaksi *Double Tunnel* dengan *Finite Element Method*: Pengaruh Posisi Terowongan dan Tahapan Penggalian di Terowongan Cisumdawu

M. Rahman Yulianto, Singgih Saptono, Sudaryanto

UPN "Veteran" Yogyakarta Afiliasi/Institusi Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta, Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta 55283 Indonesia e-mail: mhrahmanc@gmail.com

ABSTRACT

The advancing of development requires the use of underground area for the construction of transportation infrastructure facilities. Construction of double-tunnel at the same time, with the position of tunnel which is adjacent to the others tunnel may be done horizontally manner. The excavation method which is used in soft soil tunnel construction is three-bench seven-step excavation method that can stabilize the tunnel face but it does not require any additional support, it has been widely used in tunnels with large cross-sections for highway. Since, both the tunnels spacing and the excavation sequence affect the displacement and stresses in the lining, it is major interest to study the influence of these factors on the tunnel design. Numerical simulations are conducted to reveal displacement characteristics and obtain optimal construction approach for tunnels with reliable result. This paper presents analysis of this issue with a particular interest for the optimization of both tunnels spacing of the double-tunnels and the excavation sequence. The analysis conduct in two dimensions of analysis. Keywords: weak rock, double tunnels, NATM, finite element

ABSTRAK

Kemajuan dalam pembangunan membutuhkan penggunaan area bawah tanah untuk pembangunan infrastuktur fasilitas transportasi. Pembangunan terowongan ganda pada waktu yang bersamaan dengan posisi terowongan yang saling berdekatan dilakukan secara horizontal. Metode penggalian yang digunakan dalam konstruksi terowongan tanah lunak adalah metode penggalian *three-bench seven-step* yang dapat menstabilkan pemuka terowongan dengan penampang besar untuk jalan raya. Karena jarak antar terowongan dan tahapan penggalian yang diterapkan mempengaruhi besarnya perpindahan dan tegangan pada terowongan, maka hal tersebut merupakan kepentingan utama untuk dipelajari pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap desain terowongan. Simulasi numerik dilakukan untuk memperlihatkan karakteristik perpindahan dan mendapatkan pendekatan optimal untuk pembangunan terowongan dengan hasil yang dapat dipercaya. Makalah ini menyajikan analisis terhadap masalah diatas untuk optimalisasi jarak antar terowongan pada terowongan ganda dan tahapan penggalian yang diterapkan. Analisis yang dilakukan adalah analisis dua dimensi. Kata kunci: batuan lemah, terowongan ganda, NATM, *finite element*

I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kemajuan pada pembangunan infrastruktur mendorong penggunaan area bawah tanah untuk pembangunan fasilitas infrastruktur transportasi, salah satunya adalah pembangunan terowongan jalan tol Cisumdawu. Lokasi pembangunan terowongan Cisumdawu berada di Seksi II Rancakalong-Sumedang, Fase 1 dan 2 pada Sta. 12+628 - 13+100, tepatnya di daerah Cigendel, Kecamatan Pamulihan. Penerowongan ini menembus bukit dengan kondisi material batuan lemah dan/atau tanah lunak (Verruijt, 2001). Terowongan Cisumdawu merupakan terowongan ganda (double tunnel) dan termasuk terowongan dangkal. Sehingga, metode penggalian vang tepat sangat diperlukan agar kegiatan penggalian tidak mengganggu aktivitas yang berada di atas permukaan.

Penggalian terowongan berpengaruh langsung terhadap kekuatan batuan sekitar, dikarenakan adanya perubahan distribusi tegangan pada batuan. Bidang bebas pada terowongan akan mengalami deformasi dan memungkinkan tercapainya keseimbangan baru pada terowongan. Perilaku ini ditunjukkan dengan adanya perpindahan pada dinding dan atap terowongan. Interaksi dari dua terowongan akan mempengaruhi keadaan tegangan dan perpindahan di sekitar terowongan, perpindahan permukaan tanah dan beban penyangga. Sehingga perlu dipelajari interaksi dua terowongan paralel dan pengaruh interaksi tersebut pada tegangan dan perpindahan di sekitar terowongan serta beban penyangga. Hal tersebut dicapai dengan melakukan serangkaian analisis numerik menggunakan finite element method terhadap model terowongan ganda untuk rentang berbagai parameter. Hasilnya disajikan dalam dua bagian, pada bagian pertama parameter utama yang diteliti adalah pengaruh jarak antar dua terowongan.

Sedangkan pada bagian kedua, parameter utama yang diteliti adalah pengaruh tahapan penggalian terowongan. Pada analisis ini pengaruh kedalaman terowongan dan kondisi penyangga juga dipertimbangkan.

Permasalahan

Penggalian *double tunnel* mengakibatkan interaksi yang terjadi antar terowongan sehingga perlu diketahui faktor apa saja yang mempengaruhi interaksi pada *double tunnel* tersebut. Posisi dan tahapan penggalian terowongan berpengaruh terhadap keamanan penggalian *double tunnel* dan perpindahan di sekitar terowongan. Penentuan metode penggalian didasarkan pada karakteristik dan sifat material tanah pada daerah penggalian tersebut serta geometri terowongan.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan antara lain :

- 1. Menganalisis faktor-faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas terowongan tanah lunak.
- 2. Mengetahui metode penggalian terowongan tanah lunak.
- 3. Menganalisis stabilitas terhadap metode penggalian *New Austrian Tunneling Method* yang telah diterapkan.

Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Lokasi penelitian berada pada tol Cisumdawu STA 12+628 s/d STA 13+100.
- 2. Analisis yang dilakukan berada pada STA 12+825.
- 3. Analisis yang dilakukan hanya terbatas pada pengaruh terhadap posisi terowongan dan tahapan penggalian.
- 4. Perhitungan numerik yang dilakukan menggunakan *Finite Element Method*.
- 5. Analisis yang dilakukan berdimensi 2 (2D) dengan pendekatan regangan bidang menggunakan program RS2 (RockSoil2) versi 9.0 berlisensi sebagai alat bantu perhitungan.
- 6. Perhitungan penyanggan terbatas pada penyanggaan sementara.
- 7. Kriteria keruntuhan yang digunakan Mohr-Coloumb.

Manfaaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah mendapatkan pengalaman dalam penanganan penyanggaan sementara dan metode penggalian pada pembuatan terowongan jalan tol di material tanah lunak.

II. TINJAUAN UMUM

Letak Kesampaian Daerah

Lokasi penelitianberada di Desa Cigendel, Kecamatan Pamulihan, Kabupaten Sumedang merupakan salah satu bagian wilayah Provinsi Jawa Barat. Secara geografis terletak pada 107°49'59,05" BTs/d107°49'52,50" BT dan 6° 51'59" LSs/d6° 52' 11,59" LS. Kecamatan Pamulihan berbatasan langsung dengan



Gambar 1 Letak Kesampaian Daearah Lokasi Penelitian

Keadaan Geologi

Fisiografi

Secara garis besar lokasi proyek terowongan Cisumdawu terletak pada zona Bandung, yang merupakan daerah gunung api. Zona ini merupakan suatu depresi jika dibanding dengan zona Bogor dan zona Pegenungan Selatan yang mengapitnya yang terlipat pada zaman tersier. Zona Bandung sebagain besar terisi oleh endapan vulkanik muda produk dari gunungapi disekitarnya. Gunung-gunung berapi terletak pada dataran rendah antara kedua zona itu dan merupakan dua barisan di pinggir zona Bandung pada perbatasan zona Bogor dan zona Pegunungan Selatan. Walaupun zona Bandung merupakan suatu depresi, ketinggiannya masih cukup besar, misalnya depresi Bandung dengan ketinggian 650 – 700 mdpl. Zona Bandung sebagian terisi oleh endapan-endapan alluvial dan vukanik muda (kwarter), tetapi di beberapa tempat merupakan campuran endapan tertier dan kwarter. Pegunungan - pegunungan tersier tersebut adalah pegunungan Bayah, bukit di lembah Cimandiri-Sukabumi, bukit-bukit Rajamandala dan bukit-bukit Kabanaran. Pegunungan itu telah tertoreh-toreh dan tererosikan dengan kuat, sehingga merupakan permukaan yang agak datar(peneplain). Peneplain itu terus melandai ke Barat ke Selat Sunda. Padabeberapa tempat di Selatan pantai zona Bandung lautnya curam, terdiri atas depresi Cianjur Sukabumi, depresi Bandung, depresi Garut dan depresi Citanduy para ahli geologi menyebutnya sebagai cekungan antar pegunungan (cekungan intra montana).

Stratigrafi

Jenis batuan yang ada di area proyek terowongan jalan bebas hambatan Cisumdawu merupakan hasil dari gunung api muda tak teruaraikan, berupa pasir tufaan, lapilli, breksi, lava, anglomerat. Sebagian berasal dari Gunung Tangkuban parahu dan sebagian dari Gunung Tampomas. Antara Sumedang dan Bandung, batuan ini membentuk dataran-dataran kecil atau bagian-bagian rata dan bukit-bukit rendah yang tertutup oleh tanah yang berwarna abu-abu kuning dan kemerah-merahan.

III. Dasar Teori

Klasifikasi Massa Tanah

Klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok dan subkelompok berdasarkan pemakaiannya (Das, 1995). Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang mudah untuk menjelaskan secara singkat sifatsifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terinci. Ada beberapa macam sistem klasifikasi tanah yang umumnya digunakan sebagai hasil pengembangan dari sistem klasifikasi yang sudah ada. Beberapa sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butiran dan batas-batas Atterberg. Sistem-sistem tersebut adalah sistem klasifikasi AASHTO dan sistem klasifikasi Unified. Sistem klasifikasi AASHTO pada umumnya dipakai oleh departemen jalan raya di semua negara bagian di Amerika Serikat. Sedangkan sistem klasifikasi Unified pada umumnya lebih disukai oleh para ahli geoteknik untuk keperluan-keperluan teknik yang lain.

Tegangan In-Situ

Tegangan in situ vertikal pada tanah/batuan merupakan fungsi kedalaman. $\sigma_v = \gamma h$

Keterangan :

= tegangan vertikal
= berat isi tanah/batuan
= kedalaman

Tegangan horizontal yang bekerja pada elemen batuan pada kedalaman z di bawah permukaan jauh lebih sulit diperkirakan daripada tegangan vertikal. Biasanya, rasio tekanan horisontal rata-rata terhadap tegangan vertikal dilambangkan dengan huruf k sedemikian rupa sehingga diperoleh persamaan:

 $\sigma_h = k \sigma_v = k \gamma z$

keterangan : σ_h = tegangan horizontal

k = rasio tegangan horizontal rata-rata

terhadap tegangan vertikal,
$$k = v/(1-v)$$

v = Poisson ratio.

Pengukuran tegangan horisontal di lingkungan sipil dan pertambangan di seluruh dunia menunjukkan bahwa rasio k cenderung tinggi pada kedalaman dangkal dan menurun pada kedalaman (Brown dan Hoek, 1978, Herget, 1988).

Tegangan Induksi

Sebelum penggalian dilakukan, massa batuan berada dalam kondisi setimbang. Dan setelah penggalian dilakukan, kesetimbangan tersebut menjadi terganggu dan dapat mengubah distribusi tegangan awal. Akibat adanya penggalian, maka tegangan dari massa yang digali akan dialihkan/ditransfer ke sisi terowongan. Akibat transfer tegangan ini, terjadi akumulasi tegangan di permukaan galian terowongan. Untuk mengetahui distribusi tegangan di sekitar terowongan dapat digunakan persamaan Kirsch (1898). Ilustrasi tegangan terinduksi akibat penggalian terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Kondisi tegangan pada kondisi awal (b) Kondisi setelah penggalian terowongan (Szechy, 1973)

Kirsch (1898) menurunkan rumus tegangan radial (σ_r) , tegangan tangensial (σ_{θ}) dan tegangan geser $(\tau_{r\theta})$ disekitar terowongan dalam persamaan berikut ini.

$$\begin{split} \sigma_r &= \left[\left(\frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \right] \\ &+ \left[\left(\frac{\sigma_v - \sigma_H}{2} \right) \left[1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \right] \\ \sigma_\theta &= \left[\left(\frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} \right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2} \right) \right] \\ &+ \left[\left(\frac{\sigma_v - \sigma_H}{2} \right) \left[1 + \frac{3R^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \right] \\ \tau_{r\theta} &= \left[- \left(\frac{\sigma_v - \sigma_H}{2} \right) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \\ keterangan : \end{split}$$

keterangan :

R = Jari-jari terowongan

 θ = Sudut yang dibentuk ke titik pengamatan searah putaran jarum jam.

Deformasi Terowongan

Menurut Bray (1967), penggalian yang menghasilkan tegangan besar (tegangan tangensial lebih besar dari setengah *unconfined compressive strength*), akan menyebabkan perlemahan hingga lokasi tertentu. Perlemahan tersebut merupakan area plastis (*plastic zone*). Diasumsikan bahwa terowongan melingkar dengan jari-jari r_0 yang dikenai tekanan hidrostatik p_0 dan tekanan internal penyangga p_i seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Area plastis dan elastik menurut Bray (Goodman, 1989)

Keruntuhan massa batuan disekitar terowongan terjadi ketika tegangan internal yang disediakan oleh

penyangga kurang dari tegangan penyangga kritis p_{cr} , yang didefinisikan oleh:

$$p_{cr} = \frac{2p_o - \sigma_{cm}}{1+k}$$

Jika tegangan penyangga internal p_i lebih besar dari tegangan penyangga kritis p_{cr} , maka tidak terjadi keruntuhan, perilaku massa batuan disekitar terowongan adalah elastis dan perpindahan elastis radial kedalam dari dinding terowongan yang ditunjukkan oleh persamaan:

$$u_{ie} = \frac{r_o(1+\nu)}{E_m} (P_o - P_i)$$

keterangan:

 E_m = modulus young atau modulus deformasi v = poisson ratio

saat tekanan penyangga internal p_i kurang dari tekanan penyangga kritis p_{cr} , keruntuhan terjadi dan jari-jari zona plastis r_p disekitar terowongan adalah

$$r_p = r_0 \left[\frac{2(p_0(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{(k-1)}}$$

untuk kegagalan plastis, total perpindahan radial kearah dalam dari dinding terowongan adalah

$$u_{ip} = \frac{r_0(1+v)}{E} \left[2(1-v)(p_0 - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_0}\right)^2 - (1-2v)(p_0 - p_i) \right]$$

Kurva yang digambarkan pada Gambar 5 dan Gambar 6 didefinisikan pada persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d_p}{d_0} = \left(1,25 - 0,625 \frac{p_i}{p_0}\right) \frac{\sigma_{cm} \left(\frac{p_i}{p_0} - 0,57\right)}{p_0}$$
$$\frac{\delta_i}{d_0} = \left(0,002 - 0,0025 \frac{p_i}{p_0}\right) \frac{\sigma_{cm} \left(2,4\frac{p_i}{p_0} - 2\right)}{p_0}$$

Keterangan:



Ukuran zona plastis dibandingkan dengan tekanan penyangga (E. Hoek, dkk., 1993)



Deformasi terowongan dibandingkan dengan tekanan penyangga (E. Hoek, dkk., 1993)

Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, diperlukan penentuan sudut gesek dalam \emptyset dan kohesi c untuk setiap massa batuan dan rentang tegangan. Berikut persamaan untuk sudut gesek dalam \emptyset dan kekuatan kohesi c:

 $\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci}$



Perhatikan bahwa nilai σ_{3max} , batas atas dari tegangan batas dimana hubungan antara kriteria Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb dipertimbangkan, harus ditentukan untuk setiap kasus individual. Kekuatan geser Mohr-Coulomb τ , untuk tegangan

normal yang diberikan σ , ditemukan dengan substitusi dari nilai-nilai *c* dan Ø ke persamaan:

 $\tau = c + \sigma \tan \emptyset$

plot yang setara, dalam hal tegangan mayor dan minor, didefinisikan oleh:

 $\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 = \frac{2c\cos\emptyset}{1-\sin\emptyset} + \frac{1+\sin\emptyset}{1-\sin\emptyset} \sigma_3$

IV. Hasil Penelitian

Klasifikasi Tanah

Berdasarkan hasil klasifikasi tanah menggunakan USCS (*Unified Soil Classification System*) dari pengujian laboratorium didapatkan hasil bahwa perlapisan tanah hasil pemboran didominasi oleh tanah dengan klasifikasi (MH – OH) dengan tipe material lanau organik kompresibilitas tinggi dan lempung organik. Berdasarkan hasil diskripsi visual terhadap hasil boring didapatkan hasil bahwa perlapisan tanah didominasi oleh jenis tanah *Sandy Clayey Silt* dan *Clay Sandy Silt* seperti yang tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Klasifikasi Tanah

į	7.00	Soh	400	i k Dig	ni.Reix	- B	12.12.6			
ł	14-14-1	1946.0	1000	Jacob .	Jenaphog	- MAG	10	$ \mathcal{L}_{\mathcal{T}} $	and the	tale Years
ł		143	- 24	125	20	1.1	175 B	28		
i	10.82	3,2%	436	1427	66.62	155,09	10.00	75 A	NERSONA	Service Teeping 2050
1	1.100	14.00	975	ŝ.	1	ፖንያብ	84 W	14 ,21	8428-00	tical a theory of the
1	DOFE	022	9.69	10.00	94,19	1414	8. B	-11 3 0	REFERENCE	Denda Degos Adar
į	1,759-6	2,2	0,0	92	\$1,75	30.0	$T_{\rm e} T^{\prime}$	K435	9675962	Saving Skywy 1627
	1000	7226	3,55	18,00	2	15.01	8	104/0	10THEORY	and states and
1	1.4	200	66,85	85 P.	01 (R)	120	100	10.55	083842	Charge Standy 1992
1	100	23,37	39,65	2.73	100	ŝ,	53,30	\mathbf{M}_{i}	RECEIPTO	the set internet.
į	1687	47,84	2,0	-16,99	19,9	19 <u>1</u> 92	20.00	N.49	800000	Grade Chrone WG.
1	KOHA	14	3 2	-Add	96.53	din jak	26,22	10,75	2002000	Sectorslands
í	100	2008	M.94	$\mathcal{B}(0)$	а 1	1 00	2	1991	167676742	These Pages (MDC)
	KSR4-	e a constante da constante constante da constante constante da const	6,56.	4240	80,99	10,600	X ,99	2530.	ISH SHOW	Staty Step (3.6 E
ł	097	20,00	$M_{\rm eff}^{\rm out}$	4.50	01,97	20/F	20,24	242	600222660	Constants SI27

Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Tanah

Pengujian sifat fisik batuan ini merupakan pengujian yang tidak merusak contoh batuan tersebut *(undistructive test).* Pengujian ini memperoleh paramater sifat fisik tanah diantaranya nilai dari kadar air, berat isi asli, berat isi kering, berat jenis, kejenuhan, angka pori, dan porositas. Berikut adalah hasil uji sifat fisik terhadap contoh batuan hasil pemboran pada lokasi penelitian.

Tabel 2. Data Sifat Fisik Material Tanah

Nn	Kodaburan	Kadar	Bobox in	Bobortal Jertag	Herar Jents	Rejension	Angka Port	Porosias
CODOR	010	(%)	(price)	(grider)		(94)		(46)
12081	5,50	49,98	1,60	1.02	2,65	89,11	1,48	- 59,25
1/06.2	10,00	55,75	1,40	L.00.	2,67	91,M	1,01	61,62
1/126.5	25,50	:64,01	1,58	0.96	2.68	46,34	1,78	10,46
1/126-4	20,00	:64,09	1,57	0.96	2.65	96,24	1,75	63,64
1306.5	25.50	62,09	1.59	0.96	1.65	97,15	1.85	62.73
D51	30.00	64,54	1,62	0.99	1.67	100.65	1.71	63.10
D51	35,50	60,57	1,60	0,99	1,65	95,99	1,89	32.11
D51	40,00	61,86	1,53	0.58	2.67	\$0,63	1.82	64,33
D54	45,50	-99,27	1,63	1.02	2.68	98,30	1.01	61,73
085	50,00	63,51	1,63	1,00	2.67	101,48	1,67	62,92
DSt	55,50	74,40	1,48	0.88	1.68	92,28	2,16	45,39
1057	80.00	37.75	1.62	1.17	3.67	78.84	1.28	56.10

Dari hasil pengujian laboratorium pada conto hasil pemboran dengan total kedalaman 60 m didapatkan nilai kohesi terbesar yaitu 1,179 kg/cm2 pada kedalaman 5 m - 5,5 m dengan nomor sampel UDS 1 diperoleh melalui *Triaxial Unconsolidated*

Undrained Test, kohesi terkecil yaitu 0,02 kg/cm2 pada kedalaman 29,5 m - 30 m dengan nomor sampel DS 1 diperoleh melalui *Direct Shear Test*, nilai sudut gesek dalam terbesar yaitu $36,52^{0}$ pada kedalaman 49,5 m – 50 m dengan nomor sampel DS 5 diperoleh melalui *Direct Shear Test*, dan nilai sudut gesek dalam terkecil yaitu 3,731⁰ pada kedalaman 5 m – 5,5 m dengan nomor sampel UDS 1 diperoleh melalui *Triaxial Unconsolidated Undrained Test* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Sifat Mekanik Material Tanah

264		Taked		Tesselutu		Disc See UU		Unconfact		
diminit.	- 9	2.0	w.	:2:	4	12	-+	17. C	· 6.	5
222	22.2	Here's	14-1	A	ule, i	diam'r	5 10 3	Ale setter 1	Sec. 14	Alquere,
7061		1. A.			3.734	1.125	12.00	•	P. 194	2,358
1.05	- 23.	1.152	- 233	- 262	7.0.0	1.5	12	- 26	1.147	TYPE :
2006.1		1.			8.223	1/81	- 0		0.525	2,512
1.361	74.00	0.6/	28,212	154	-	14-1	· · + .	- ÷ -	1.757	2494
3706.1	18.359	0.05	27.855	2.4			1283	12262	0.227	211
D6 1	+	-	1410	24	-	:+-:	27.56	0.022		1.00
0.1		1.1			1.5	1.0	2933	19823	1-121	DES
26.3		1.2	- 410	2.2	140	14-1	15.19	0.035	0.000	1.7.4
0.4		-							10.17	100
.0.7	_	10			1		24. 2	700.06	1.2.5	2,1.36
23.6	- e2	-	- x22	100	-	- 240	15.32	0.027	0.000	0.01
0.1	- 940	- 77		- 200		- 200	2.463	101010	11.41	400

Penggalian Terowongan

Metode NATM

Penggalian Metode terowongan Cisumdawu menggunakan New Austrian Tunneling Method dan digunakan sistem penyanggaan guna menahan beban dan memperkuat batuan agar tidak terjadi keruntuhan. Terowongan Cisumdawu digali pada tanah lunak, sehingga diperlukan metode penggalian yang tepat agar tidak terjadi keruntuhan saat proses penggalian berlangsung. Pada penggalian terowongan Cisumdawu digunakan metode New Austrian Tunneling Method dengan sistem penggalian 3 bench and 7 steps. Skema pola penggalian yang dapat diterapkan pada penggalian terowongan Cisumdawu dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 8

Pola Tahapan Penggalian Terowongan I); II); III)

Sistem Penyangga

Sistem penyangga sementara yang digunakan pada konstruksi terowongan Cisumdawu terdiri dari beberapa penyangga, diantaranya adalah *Wire Mesh*, *Steel Fibre Reinforcement Shortcrete*, dan *Steel Rib*. Berikut adalah sifat mekanik dari masing-masing penyangga yang digunakan pada terowongan Cisumdawu. a) Wire Mesh

Tabel 4 Data Hasil Uji Sifat Mekanik *Wire Mesh*

Mentiscki Aula 10	Atmonito Kalendi Ora-E	Hereiter seletat 6.15	Franz Eronagong Randrak Karos	Hoope level (52)	Reve Juka Ref	Provide United Preside	inter State	Citarios Padr Pecalad
Stances Made	129	A.96	00400 1005	1000	59	10100	346	100000
Strength ND	40	496	20	14,01	200	10,21	-	98;90

b) Steel Fibre Reinforcement Shortcrete

Tabel 5 Data Hasil Uii Sifat Mekanik SFRS

	Dua Hush Of Shat Wekalik ShAS												
Mo	-065 4007	spect COL 19942	This Tassify Qabath	twad Bað	Cumposion Honghia. Greinath								
1	1	12,52	22267	33,55	193316								
3	7	123,155	2567	43,33	2.74,262								
5	28	12,54	2555	36,58	305,53								
c)	Stool R	ih		-	-								

c) Steel Rib

Tabel 5 Data Hasil Uji Sifat Mekanik *Steel Rib*

	North	a New Yorks				second sub-sections		
anie Alies	Apress rokal te	00000 940000	Section Sector Sector	Marsala Karschefte Mark	uterna GØ	Sada Metale M	Manadan Congristing	
18994 (5774)	Ste gang	କର୍ଷ୍ଣକ	4-3.90 2 316	NA SANGAS BANKAS	। छ श्र	8	¥8	

Pemodelan



Tahapan Permodelan Phase2

V. Pembahasan

Untuk mendapatkan model 2 dimensi, dilakukan sayatan melintang tegak lurus terhadap arah kemajuan terowongan sesuai dengan lokasi yang diteliti. Data sifat fisik dan sifat mekanik batuan, data perlapisan batuan dan data penyangga yang digunakan tertera pada tabel di bab sebelumnya (Bab IV Hasil Penelitian). Beberapa parameter yang didapatkan pada analisis numerik antara lain sigma 1, Sigma 3, *total Displacement*, dan *strength factor*.

Hubungan Stabilitas Terowongan terhadap Tahapan Penggalian

Pada analisis ini akan dibahas mengenai pengaruh pola penggalian terowongan pada tanah lunak menggunakan *New Austrian Tunneling Method* dengan tiga pola penggalian yang berbeda terhadap nilai *strength factor* pada setiap tahapan penggalian tersebut. Tiga pola penggalian tersebut diterapkan pada material yang sama yaitu material yang berada pada lokasi terowongan Cisumdawu.



Gambar 10 Pola Penggalian I



Gambar 11 Pola Penggalian II



Gambar 12 Pola Penggalian III

Berdasarkan hasil perhitungan nilai *strength factor* pada masing-masing pola penggalian, dapat kita lihat bahwa dengan pola penggalian tersebut menunjukkan nilai *strength factor* dengan kondisi beragam. Pola penggalian III, menunjukkan kondisi yang lebih aman daripada pola penggalian I dan II, karena kondisi rawan yang timbul lebih sedikit daripada kondisi rawan yang timbul pada pola penggalian I dan II.

PerbandinganStabilitasTerowonganBerdasarkan Variasi Jarak Antar TerowonganPadaPadapembahasandibawahiniakandibahasmengenaiperbedaannilaipadamasing-masingparameter tegangan mayor (σ_1), tegangan minor (σ_3),totalperpindahan,danstrengthfactorterhadapvariasi jarak spasi antar terowongan 1D, 2D dan 3D.

a) Analisis tegangan mayor (σ_1)

Nilai tegangan mayor (σ_1) pada terowongan kiri, tidak terdapat perbedaan nilai yang signifikan dengan masing-masing kondisi spasi jarak antar terowongan tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa masingmasing titik di sekitar terowongan menerima tegangan mayor (σ_1) yang relatif sama walaupun memiliki perbedaan variasi jarak antar terowongan tersebut. Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa terdapat 4 titik lonjakan tegangan mayor (σ_1) pada semua kondisi. Titik-titik tersebut merupakan titik sambung penyangga antara *upper-middle*, dan *middle-lower*. Hal tersebut meunjukkan bahwa pada titik sambung penyangga menerima tegangan mayor (σ_1) yang lebih besar daripada titik lainnya.



Perbandingan Tegangan Mayor (σ_1) pada Terowongan Kiri Cisumdawu dengan Variasi Jarak Antar Terowongan

b) Analisis tegangan mayor (σ_3)

Nilai tegangan minor (σ_3) pada terowongan kiri, tidak terdapat perbedaan yang signifikan dengan masing-masing kondisi spasi jarak antar terowongan tersebut. Hal tersebut menunjukkan bahwa masingmasing titik di sekitar terowongan menerima tegangan minor (σ_3) yang relatif sama walaupun memiliki perbedaan variasi jarak antar terowongan tersebut. Pada Gambar 5.14 merupakan grafik yang menunjukkan perbandingan tegangan minor (σ_3) pada terowongan kiri Cisumdawu dengan variasi jarak antar terowongan.



Perbandingan Tegangan Minor (σ_3) pada Terowongan Kiri Cisumdawu dengan Variasi Jarak Antar Terowongan

c) Analisis total perpindahan

Parameter total perpindahan menunjukkan perbedaan yang mencolok pengaruh jarak penggalian antar terowongan terhadap nilai total perpindahan yang terjadi. Pada parameter ini nilai total perpindahan terkecil terjadi pada kondisi jarak antar terowongan yang terpanjang yaitu 3 D. Begitu juga sebaliknya, pada jarak penggalian antar terowongan 1 D memiliki nilai total perpindahan yang terbesar. Hal tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin dekat jarak penggalian antar terowongan, semakin mempengaruhi stabilitas dari terowongan tersebut. Pernyataan tersebut terjadi pada analisis terowongan kiri maupun terowongan kanan. Walaupun memiliki nilai total perpindahan yang lebih besar pada jarak 1 D, namun perbedaan tersebut tidak signifikan dan bukan merupakan parameter tunggal untuk menentukan spasi jarak antar terowogan tersebut.



Perbandingan Total Perpindahan pada Terowongan Kiri Cisumdawu dengan Variasi Jarak Antar Terowongan

d) Analisis strength factor

Pada parameter strength factor tidak menunjukkan perbedaan yang mencolok pada pengaruh jarak penggalian antar terowongan terhadap nilai strength factor tersebut. Nilai strength factor berada diatas titik batas keamanan yaitu 1,1. Walaupun terdapat beberapa titik dalam jumlah kecil yang menunjukkan nilai dibawah nilai batas tersebut, namun jumlah titik tersebut hanyalah sedikit yang kemudian disekitarnya memiliki nilai strength factor yang lebih besar dari nilai batas aman tersebut. Titik yang memiliki nilai kurang dari 1,1 adalah titik yang memiliki nilai anomali tegangan mayor yaitu pada titik sambung penyangga. Namun masalah tersebut dapat diatasi oleh titik sekitar yang memiliki nilai strength factor lebih besar dari 1,1. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa pengaruh jarak spasi antar terowongan terhadap nilai strength factor tidak terjadi perbedaan yang signifikan yaitu tetap memiliki nilai diatas batas aman, walaupun pada jarak 1 D memiliki nilai strength factor yang terendah daripada jarak lainnya.



Perbandingan Strength Factor pada Terowongan Kiri Cisumdawu dengan Variasi Jarak Antar Terowongan

Hubungan Jarak Horizontal Terowongan terhadap Nilai Total Perpindahan

Berdasarkan analisis stabilitas terowongan terhadap variasi jarak antar terowongan yang telah dilakukan pada pembahasan sebelumnya, dapat diketahui bahwa variasi jarak horizontal sangat berpengaruh terhadap nilai total perpindahan yang terjadi. Penggalian pertama dilakukan pada terowongan L, dan dilanjutkan penggalian terowongan R. Terowongan vang diamati pada pembahasan ini adalah terowongan kiri. Pembahasan ini akan menganalisis pengaruh penggalian terowongan R terhadap terowongan L yang telah terkonstruksi dengan variasi jarak horizontal. Pada kasus ini akan dibahas mengenai hubungan jarak horizontal terowongan terhadap nilai total perpindahan yang terjadi pada terowongan. Jarak horizontal yang diterapkan adalah 1 D, 2 D, dan 3 D (D = diameter terowongan). Titik pengamatan total perpindahan dilakukan pada 4 titik yaitu pada atap, dinding kanan, dinding kiri, dan invert terowongan. Sehingga didapatkan hubungan yang dapat dilihat pada Gambar 17 di bawah ini.



Hubungan jarak horizontal terowongan terhadap nilai total perpindahan

Pada masing-masing titik pengamatan didapatkan nilai total perpindahan yang semakin menurun apabila jarak horizontal semakin jauh. Dengan besar perpindahan 1-3 mm / jarak horizontal D. Berdasarkan hubungan yang didapatkan pada Gambar 5.23 terdapat beberapa hubungan yang terjadi di 4 titik pengamatan. Hubungan yang terjadi pada total perpindahan atap terowongan terhadap jarak horizontal terowongan adalah y = $0,045x^{-0,063}$. Hubungan yang terjadi pada total perpindahan dinding kanan terowongan terhadap y =jarak horizontal terowongan adalah $0,0342x^{-0,111}$. Hubungan yang terjadi pada total perpindahan dinding kiri terowongan terhadap jarak horizontal terowongan adalah $y = 0,046x^{-0,062}$. Hubungan yang terjadi pada total perpindahan invert terowongan terhadap jarak horizontal terowongan adalah $y = 0,0432x^{-0,062}$.

Pemantauan

Sistem pemantauan terowongan dilakukan secara berkala. Pemantauan secara berkala mencakup pemantauan keadaan luar dan dalam terowongan yaitu pemantaun penurunan permukaan tanah dan perpindahan di sekitar dinding terowongan. Keberhasilan pemantauan mencakup pada ketepatan peralatan yang digunakan, spesifikasi peralatan, dan metode analisis. Pemantauan dilakukan pada atap terowongan, dinding kiri, dan dinding kanan yang dilakukan secara berkala. Berdasarkan hasil pemantauan selama 46 hari didapatkan nilai total perpindahan pada atap terowongan sebesar 0,050 m. Sedangkan total perpindahan berdasarkan hasil perhitungan numerik pada atap terowongan didapatkan nilai total perpindahan sebesar 0,051 m yang dihitung pada tahapan penggalian dan pemasangan penyangga terakhir. Adanya perbedaan nilai disebabkan karena pada perhitungan numerik digunakan asumsi karakterisitik massa batuan yang homogen, isotrop, dan diskontinu. Sedangkan pada hasil pemantauan karakteristik massa batuan melihat pada keadaan sebenarnya yaitu heterogen, anisotrop, dan diskontinu. Dari semua hasil perhitungan perpindahan, hasil pemantauan digunakan sebagai rujukan atau acuan dalam proses konstruksi terowongan karena proses pemantauan memperhitungkan kondisi massa batuan pada kondisi sebenarnya. Hasil pemantauan nilai total perpindahan pada atap terowongan dapat dilihat pada Gambar 18 di bawah ini.



Gambar 5.24 Hasil pemantauan atap terowongan

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan uraian yang telah dibahas sebelumnya dapat disimpulkan:

- 1. Karakteristik massa tanah pada terowongan Cisumdawu merupakan tanah lunak yang memiliki daya dukung tanah yang rendah. Sehingga diharuskan menggunakan penyangga untuk memperkuat terowongan dan mencegah terjadinya keruntuhan terowongan. Sistem penyangga yang digunakan terdiri dari steel rib, wire mesh, steel fibre reinforced shotcrete, dan forepoling sebagai sistem penyangga sementara.
- 2. Hasil perhitungan numerik menunjukkan adanya penurunan nilai *strength factor* pada titik sambung penyangga *steel rib* yang menyebabkan nilai *strength factor* pada titik

sambung tersebut berada dibawah batas aman 1,1.

- 3. Berdasarkan analisis hasil *strength factor* terhadap pola tahapan penggalian yang diterapkan. Pola penggalian yang menunjukkan kondisi paling aman adalah pola penggalian III.
- 4. Penerapan jarak horizontal antar terowongan berpengaruh terhadap nilai perpindahan yang terjadi yang mempengaruhi stabilitas terowongan. Nilai perpindahan semakin menurun apabila jarak horizontal yang diterapkan semakin jauh dengan perbedaan nilai perpindahan 1-3 mm / jarak horizontal D.

Saran

- 1. Pada penggalian terowongan ganda di tanah lunak diperlukan penentuan jarak horizontal antar terowongan yang tepat dengan minimal jarak horizontal adalah 1 D dan pemilihan pola penggalian yang aman untuk diterapkan pada *New Austrian Tunnelling Method*.
- 2. Diperlukan perhatian lebih pada titik sambung penyangga *steel rib* agar didapatkan nilai *strength factor* yang lebih besar dari nilai batas aman.
- 3. Diperlukan proses validasi untuk memastikan hasil empirik dari hasil penelitian ini ke salah satu penggalian terowongan di lain tempat dengan material yang hampir sama dengan material di terowongan Cisumdawu dimana sistem pemantauan sebagai dasar pengukuranya.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., and Boyce, G.M., 2002. Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons Inc. pp.712.
- Arif, Irwandy, 2016, *Geoteknik Tambang*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta. hal 67-92, 118-120, 154-156, 267-298.
- Bieniawski Z. T., 1989, Engineering Rock Mass Clasifications, Jhon Whiley & Sons, Inc., Canada. pp. 3, 9, 52-55
- Bowles, J. E, 2000, Sifat-Sifat Fisik dan Geoteknis Tanah Longsor, Edisi Kedua, Erlangga, Jakarta.
- Budhu, M., Soil Mechanics and Foundations, 2nd Edition. John Wiley & Sons., 2007.
- Das, Braja M., dkk., 1995., *Mekanika Tanah Jilid 1*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Das, Braja M., dkk., 1995., *Mekanika Tanah Jilid 2*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Hoek, E., dkk.,1998, Support of Underground Excavation in Hard Rock, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- Hoek, E., *Practical Rock Engineering*, Electronic Book, Capilano Crescent, Canada, 2000, 341 pp.
- Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S., *Quantification of the Geological Strength Index Chart*, 47th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium –San Francisco, USA. pp. 1-2
- Kolymbas, Dimitrios., 2008, *Tunnelling and Tunnel Mechanics*, Springer, Berlin.

- Rai, M.A., Kramadibrata, S., Wattimena, R.K., 2013, *Mekanika Batuan*. Penerbit ITB, Bandung. hal 6-8, 14-16, 68-148, 298-301, 441-442.
- Saptono, S., 2012, Pengembangan Metode Analisis Stabilitas Lereng Berdasarkan Karakterisasi Batuan di Tambang Terbuka Batubara, Disertasi, Program Studi Rekayasa Pertambangan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, hal 19-24, 57-59.
- Saptono, S., dkk., 2009, *Pengaruh Ukuran Contoh Terhadap Kekuatan Batuan*, Jurnal Teknologi Mineral Vol. XVI No. 1/2009, ITB. hal 1.
- Singh, B., and Goel, R.K., 1999, *Rock Mass Classification*, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK.
- Singh, B., and Goel, R.K., 2006, *Tunnelling in Weak Rock*, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK.
- Smith, M.J., 1984, *Mekanika Tanah*, Edisi Keempat, Diterjemahkan oleh : Elly Madyayanti, Erlangga, Jakarta. hal 1, 89-92.
- Soedarmo, G.D., dan Purnomo, S.J.E, 1993, *Mekanika Tanah 1*, Penerbit Kanisius, Malang. hal 15-19.

- Taki, O and Yang, D.S., Excavation Support and Groundwater Control Using Soil-Cement Mixing Wall for Subway Projects, Proceedings, Rapid Excavation and Tunneling Conference, Los Angeles, 1989, pp. 156 – 175.
- Terzaghi, K., dan Peck, R.B., 1987, *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa*, Edisi Kedua, Diterjemahkan oleh : Bagus Witjaksono dan Benny Krisna R., Erlangga, Jakarta. hal 4.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd edition, Wiley, New York, NY, USA.
- Turner, A.K, and Schuster, R.L., Landslides Investigation and mitigation: National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., 1996, 673 p.
- Verrujit, A., *Soil Mechanics*, Electronic Book, <u>http://geo.citg.tudelf.nl/</u> 336.
- Wyllie, D. C. and Mah, C.W., 2004, *Rock Slope Engineering Civil andMining* 4th *Edition*, Spon Press, 270 Madison Avenue, New York, USA. pp. 94-95, 98, 100, 130-131, 155-156, 178, 205-206.