



Stabilisasi Lereng Galian Dengan Perkuatan *Shotcrete* Pada Pengalihan Sungai Araren Di Kabupaten Minahasa Utara

Aprilia N. Sumampouw^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarayar^{#c}

^{#Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia}
^asumampouwapriilia@gmail.com, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva.sarajar@unsrat.ac.id

Abstrak

Lereng galian pada pekerjaan pengalihan sungai Araren di Kabupaten Minahasa Utara adalah lereng yang stabil pada awal pelaksanaan pekerjaan konstruksi sungai pengalihan. Adanya curah hujan yang tinggi selama sepekan menyebabkan terjadinya deformasi lereng yang berlebihan akibat rembesan air hujan, yang pada akhirnya menyebabkan kelongsoran pada lereng galian. Untuk mengamankan lereng tersebut pasca terjadinya longsor digunakan *shotcrete* dengan drainase horisontal sebagai perkuatan lereng. Tahapan analisis diawali dengan analisis balik (*back analysis*) untuk mendapatkan parameter kuat geser pada saat terjadi longsor. Parameter kuat geser hasil analisis balik digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *shotcrete*. Hasil analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *shotcrete* yang dilengkapi drainase horisontal menyimpulkan bahwa penggunaan *shotcrete* dengan mutu beton K-250 setebal 10 cm yang dilengkapi dengan pipa drainase horisontal sepanjang 10 m dengan sudut kemiringan 4° dari bidang horisontal dapat meningkatkan faktor keamanan lereng pada kondisi statis yakni 1.33 dan pada beban gempa sebesar 1.15.

Kata kunci: stabilisasi lereng, shotcrete, drainase horisontal, back analysis, faktor keamanan

1. Pendahuluan

Metode *shotcrete* adalah salah satu perkuatan lereng atau perlindungan permukaan lereng dengan aplikasi mesin penyemprot beton yang ditemukan pada tahun 1910 oleh Carl Ethan Akeley (1864 – 1926). *Shotcrete* merupakan campuran agregat mortar yang diaplikasikan dengan cara disemprotkan dan biasanya dilakukan pada layer setebal 75 – 100 mm, serta dapat menguatkan regangan dan kuat geser (*American Concrete Institute*, 1995). *Shotcrete* umumnya digunakan sebagai penyangga untuk tambang bawah tanah maupun terowongan bawah tanah berkaitan dengan kekuatan, kepraktisan pengerjaannya serta berbagai kelebihan yang dimilikinya. Namun perkuatan *shotcrete* sering kali ditemui pada perkuatan lereng dan tebing di suatu daerah terbuka.

Drainase horisontal merupakan suatu pekerjaan rekayasa dengan cara memasukkan pipa berlubang PVC yang telah didesain sedemikian rupa untuk menstabilkan tanah longsor dalam yang pada dasarnya ditandai dengan permukaan longsor melingkar. Drainase ini digunakan pada tanah berbutir halus dan batuan retak dengan tujuan untuk mengurangi tegangan pori akibat adanya rembesan air pada permukaan lereng.

Pengalihan sungai merupakan suatu metode dalam rekayasa konstruksi yang bertujuan untuk mengubah atau mengalihkan alur sungai dengan cara membangun alur sungai baru yang mengakibatkan alur sungai yang dialihkan tidak berfungsi secara permanen. Pada kegiatan pengalihan sungai Araren di Kabupaten Minahasa Utara, terdapat pekerjaan galian lereng alami dimana pada kaki lereng tersebut mengalami kelongsoran akibat curah hujan yang tinggi dalam sepekan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengamankan lereng tersebut dari longsor yang berkepanjangan adalah perkuatan *shotcrete* yang dilengkapi dengan drainase horisontal.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng galian pada pengalihan sungai Araren dengan penerapan *shotcrete* sebagai perkuatan lereng yang dilengkapi dengan

drainase horisontal. Tahap analisis diawali dengan analisis balik (*back analysis*) untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah pada saat longsor. Parameter tersebut digunakan pada tahap selanjutnya yakni analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *shotcrete* yang dilengkapi dengan drainase horisontal.

Dalam analisis tersebut terdapat beberapa skenario penggunaan beton *shotcrete* dan panjang serta kemiringan drainase horisontal untuk mendapatkan suatu faktor keamanan yang memenuhi persyaratan FK_{min} , baik pada kondisi statis maupun akibat beban gempa. Penelitian ini menggunakan data sekunder yakni geometri lereng yang dibentuk dalam pekerjaan pengalihan sungai, dan data kuat geser tanah di lokasi pengalihan sungai Araren.



Gambar 1. (a) Lokasi Lereng (Sumber : Google Earth); (b) Lereng yang Longsor (Sumber: Dokumentasi Pengelola)

2. Metode Penelitian

Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai perkuatan lereng yang telah mengalami keruntuhan (longsor) dengan metode *shotcrete* yang dilengkapi dengan drainase horisontal, yang terletak pada pengalihan sungai Araren. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kestabilan lereng galian yang telah mengalami kelongsoran baik sebelum dan setelah diberikan perkuatan lereng dengan metode *shotcrete* yang dilengkapi dengan drainase horisontal.

Perhitungan faktor keamanan menggunakan metode Bishop tersederhanakan dan metode GLE Morgenstern-Price dengan bantuan perangkat lunak Rocscience SLIDE. Parameter kuat geser saat terjadi longsor dianalisis dengan metode analisis balik (*back analysis*) pada $FK = 1$. Parameter kuat geser tersebut digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *shotcrete* yang dilengkapi dengan drainase horisontal.

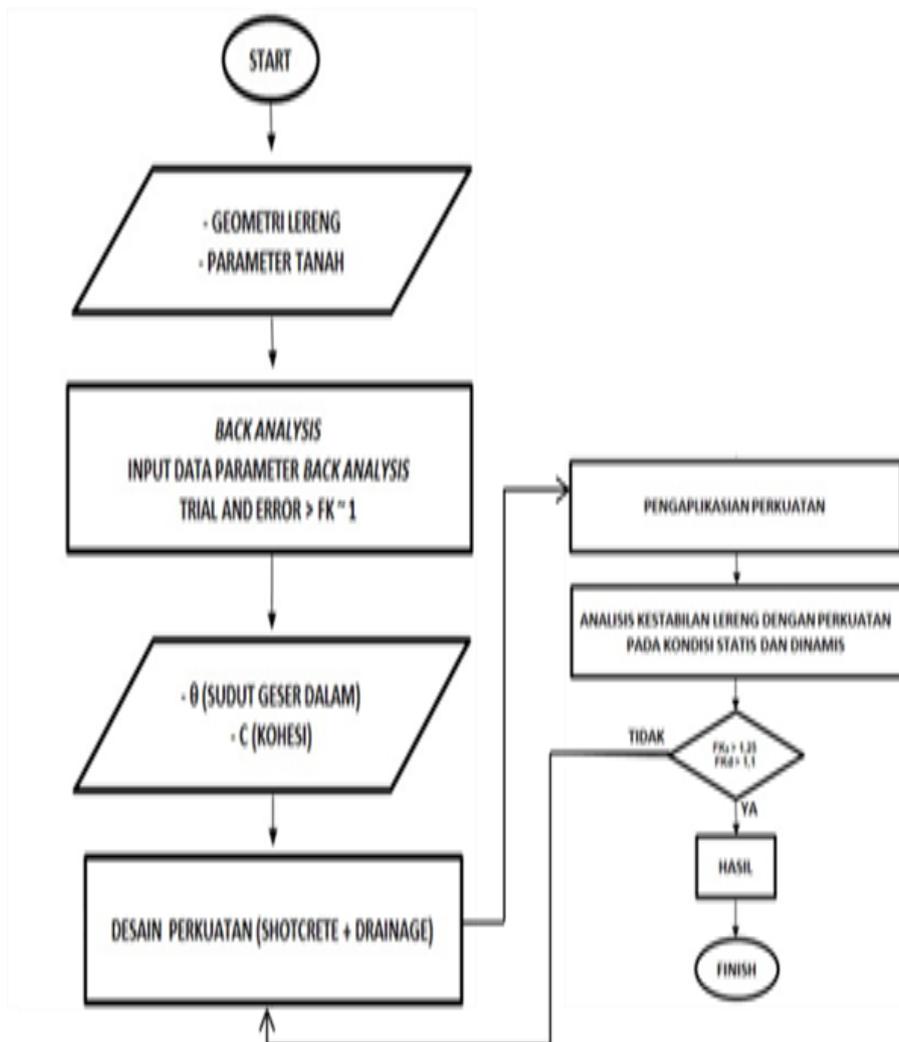
Desain *shotcrete* menggunakan variasi mutu beton dengan ketebalan beton, dan panjang serta kemiringan drainase horisontal. Dari variasi yang digunakan akan diperoleh suatu desain *shotcrete* yang menghasilkan faktor keamanan yang memenuhi faktor keamanan minimum pada kondisi statis dan beban gempa.

3. Landasan Teori

3.1. Perkuatan Lereng Metode Shotcrete

Shotcrete adalah campuran berbahan dasar semen yang disemprotkan dengan kecepatan tinggi ke area permukaan penerima. Komponen material *shotcrete* pada dasarnya adalah beton atau terkadang adukan semen, tetapi proses aplikasi *shotcrete* unik memakai peralatan khusus. Metode *shotcrete* ditemukan pada tahun 1910 oleh Carl Ethan Akeley (1864-1926). *Shotcrete* dapat dihasilkan dari campuran kering (*dry mix*) dan juga campuran basah (*wet mix*). Dalam pembuatan campuran untuk *shotcrete* terdapat dua syarat, yaitu kemampuan untuk ditembakkan (*shootability*) dan juga kemampuan untuk dipompa (*pumpability*). *Shootability* adalah kemampuan campuran untuk menempel pada permukaan hingga ketebalan tertentu dan tidak

mengelupas. *Pumpability* adalah kemampuan campuran untuk mengalir seperti cairan, sehingga mudah untuk dipompa.



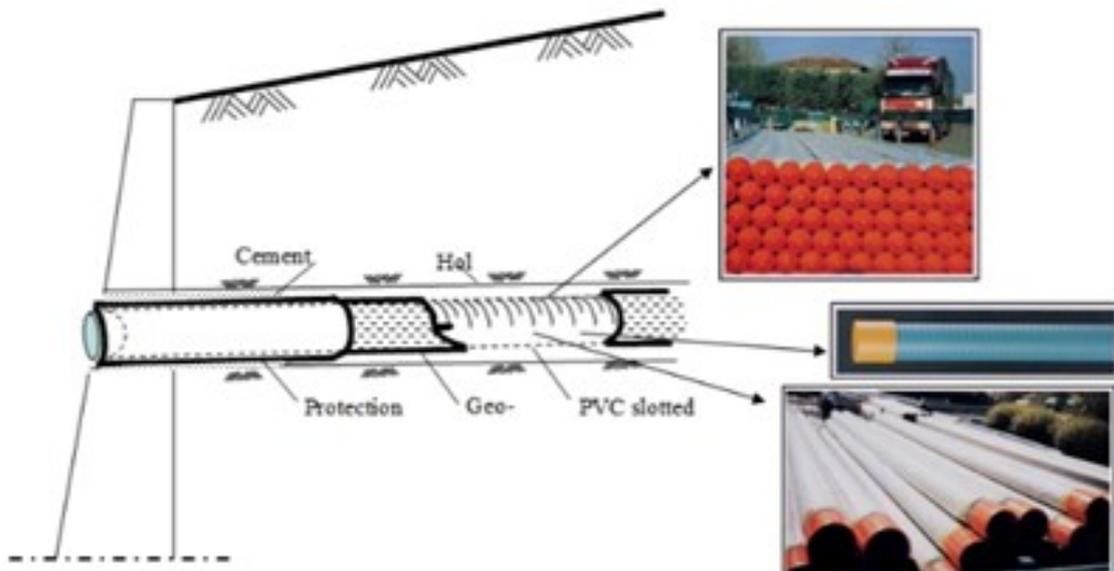
Gambar 2. Diagram Alir Analisis.



Gambar 3. Pengaplikasian Shotcrete pada Lereng (Sumber: qpsengineering)

3.2. Drainase Horisontal

Drainase horisontal digunakan untuk menstabilkan tanah longsor dalam yang pada dasarnya ditandai dengan permukaan longsor melingkar. Drainase ini digunakan pada tanah berbutir halus dan batuan retak. Drainase horizontal melibatkan pengeboran lubang di tanah yang dibor dengan diameter lubang, biasanya 100-120 mm. Pipa berlubang PVC yang digunakan dilindungi oleh geotekstil untuk menghindari penyumbatan dengan material halus dimasukkan ke dalam lubang. Panjang maksimum pipa horizontal adalah sekitar 100 m, tetapi dalam beberapa kasus dapat mencapai 300 m. Tujuan utama desain drainase adalah untuk memperoleh konfigurasi geometri dari efisiensi sistem drainase yang ditentukan sebagai fungsi distribusi air pori yang menjamin faktor keamanan yang dipilih oleh perancang.



Gambar 4. Susunan/Skema Saluran Drainase Horisontal

(Sumber :https://www.larimit.com/mitigation_measures/966/ - Drainase sub-horizontal pengeboran konvensional Kategori: Modifikasi Rezim Air Tanah – Drainase dalam)

3.3. Analisis Kestabilan Lereng

Analisis stabilitas lereng adalah menentukan faktor keamanan dari bidang longsor. Hal utama yang mempengaruhi stabilitas lereng adalah kuat geser tanah, geometrik lereng, tekanan air pori atau rembesan, pembebanan dan kondisi lingkungan. Faktor keamanan (FK) didefinisikan sebagai nilai perbandingan antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan. Perbandingan ini akan menghasilkan angka kewanaman baik itu <1 maupun >1 . Kondisi nilai $FK = 1$ merupakan nilai ideal dimana dapat dikatakan kondisi lereng dalam keadaan kritis.

Kondisi kritis sendiri biasanya dipergunakan dalam melakukan analisis balik untuk mengetahui kondisi lereng sesaat sebelum terjadi kelongsoran. Nilai faktor keamanan (FK) untuk kondisi lereng pada kondisi statis dikatakan aman jika $FK > 1.25$ dan pada kondisi dinamis dikatakan aman jika $FK > 1.1$ (Badan Standardisasi Nasional, “SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik”. Jakarta: BSN, 2017).

Salah satu metode yang dikembangkan dalam menganalisa kestabilan suatu lereng adalah metode kesetimbangan batas. Metode kesetimbangan batas untuk kestabilan lereng membagi massa bidang longsor menjadi irisan kecil. Gaya gesek yang bekerja pada irisan diasumsikan mewakili seluruh bagian yang sama dari kuat gesek batuan atau tanah dimana gaya gesek ini bekerja. Sedangkan gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik tersebut. Metode yang memenuhi kondisi kesetimbangan gaya dan momen antara lain metode Bishop dan metode GLE Morgenstern Price. Kedua metode ini akan dipergunakan dalam analisa kestabilan lereng dengan bantuan perangkat lunak Rocscience SLIDE V6.0.

3.3.1. Metode Bishop Tersederhanakan

Metode Bishop tersederhanakan menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Perhitungan faktor keamanan dengan metode Bishop Tersederhanakan menggunakan persamaan:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + W_i (1 - r_u) \tan \varphi'] \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \theta_i \tan \varphi' / F)} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i}$$

3.3.2. Metode GLE Morgenstern Price

Metode ini adalah salah satu metode yang berdasarkan prinsip kesetimbangan batas yang dikembangkan oleh Morgenstern dan Price pada tahun 1965, dimana proses analisisnya merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya - gaya normal dan momen yang bekerja pada tiap irisan dari bidang kelongsoran lereng tersebut. Metode ini melakukan asumsi penyederhanaan untuk menunjukkan hubungan antara gaya geser di sekitar irisan (X) dan gaya normal di sekitar irisan (E) dengan persamaan Morgenstern-Price (1965):

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E$$

Dalam metode ini, analisa faktor keamanan dilakukan dengan dua prinsip yaitu kesetimbangan momen (F_m) dan kesetimbangan gaya (F_f). Faktor keamanan dengan prinsip kesetimbangan momen adalah untuk bidang kelongsoran circular dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$F_m = \frac{\sum (c' l + (p - ul) \tan \varphi')}{\sum W \sin \alpha}$$

Faktor keamanan dengan prinsip kesetimbangan gaya dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$F_f = \frac{\sum [(c' l + (p - ul) \tan \varphi') \cos \alpha]}{\sum P \sin \alpha}$$

3.3.3. Back Analysis

Analisis balik (*Back analysis*) merupakan analisis yang berfungsi untuk mengetahui parameter geoteknik penyusun lereng saat lereng mengalami kelongsoran (*failure*) yakni kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) (Hoek and Bray, 1981). Analisis balik dilakukan pada lapisan terlemah penyusun lereng yang dimana bidang lemah tersebut dijadikan patokan bidang gelincir atau diperhitungkan dengan keadaan lapangan. Analisis balik dilakukan dengan melakukan percobaan untuk memperoleh nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) pada faktor keamanan lereng (FK) = 1 atau mendekati nilai 1 (Rizaldi, 2020).

3.3.4. Konversi Parameter Kuat Geser Hoek-Brown ke Mohr Coulomb

Pada umumnya model Hoek-Brown digunakan untuk memodelkan material batuan, sedangkan model Mohr Coulomb dapat digunakan untuk memodelkan tanah ataupun batuan. Korelasi parameter batuan MC dapat diperoleh berdasarkan parameter batuan Hoek-Brown. Hoek dan Brown (1980) mengusulkan sebuah metode untuk mendapatkan kekuatan massa batuan terkekarkan. Kriteria keruntuhan diturunkan dari hasil penelitian keruntuhan batuan utuh oleh Hoek (1968) dan studi model dari perilaku kekar massa batuan oleh Brown (1970). Akan tetapi, kriteria keruntuhan ini pun mengalami beberapa kali modifikasi dan pengembangan klasifikasi. Pada tahun 1994, Hoek melakukan pengembangan klasifikasi baru yang disebut Geological Strength Index (GSI), kemudian dimodifikasi (Hoek, dkk., 2002). Kriteria ini kemudian dikenal dengan Generalize Hoek-Brown Criterion.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Lereng Tanpa Perkuatan

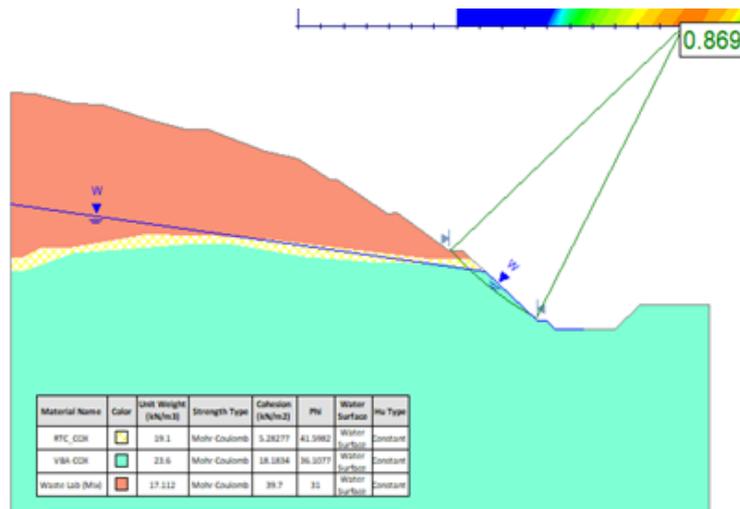
Analisis kestabilan lereng tanpa perkuatan menggunakan parameter kuat geser Hoek-Brown yang dikonversi parameter kuat geser Mohr-Coulumb.

Tabel 1. Parameter Kuat Geser Hoek-Brown

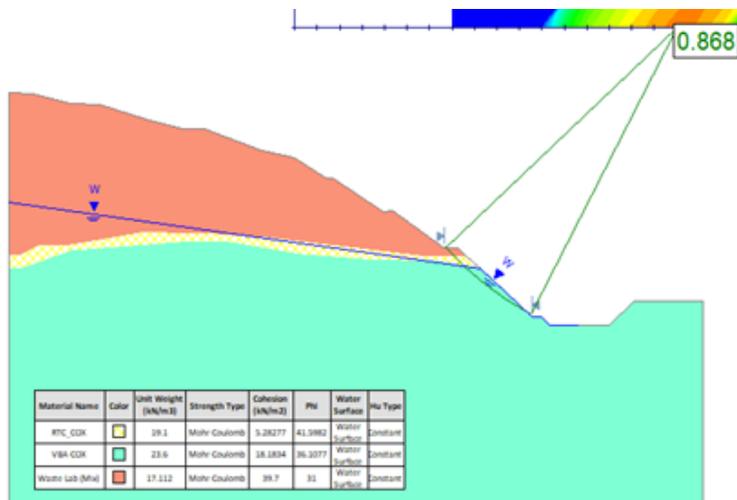
MATERIAL NAME	COLOR	UNIT WEIGHT (KN/M3)	STRENGTH TYPE	COHESSION	PHI	UCS	m	s	a
WASTE LAB (MIX)		17.112	MOHR COULUMB	39.7	31				
RTC_COX		19.1	GENERALIZED HOEK AND BROWN			5000	0.448597	3.92748e-005	0.522344
VBA_COX		23.6	GENERALIZED HOEK AND BROWN			7200	0.629743	6.06649e-005	0.518255

Tabel 2. Parameter Kuat Geser Mohr-Coulomb

MATERIAL NAME	COLOR	UNIT WEIGHT (KN/M3)	STRENGTH TYPE	COHESSION (KPA)	PHI (DEGREE)
WASTE LAB (MIX)		17.112	MOHR COULUMB	39.7	31
RTC_COX		19.01	MOHR COULUMB	5.28277	41.5982
VBA_COX		23.06	MOHR COULUMB	18.1834	36.1077



Gambar 5. Hasil Simulasi Lereng Asli Metode Bishop Simplified



Gambar 6. Hasil Simulasi Lereng Asli Metode GLE Morgenstern-Price

4.2. Back Analysis

Untuk mengetahui nilai parameter kuat geser tanah (kohesi dan sudut geser dalam) pada kondisi kritis sesaat sebelum terjadinya kelongsoran maka dilakukan perhitungan *back analysis* dengan cara *trial and error* untuk masing-masing parameter tanah sehingga di dapatkan kondisi $FK=1$ atau mendekati 1 pada saat dilakukan perhitungan kondisi kestabilan lereng.

Untuk kondisi tanah non-homogen pada bidang gelincir berdasarkan literatur dari Jurnal "Bearing Capacity For Footings on Layered Soils, University Of Engineering and Technology Taxila" (Purushothamaraj dkk, 1974) mengklaim solusi untuk sistem dua lapisan dengan tanah $\phi-c$, yakni menggunakan nilai rata-rata c dan ϕ . Sehingga diperoleh satu nilai kohesi, sudut geser dalam dan berat isi tanah yakni:

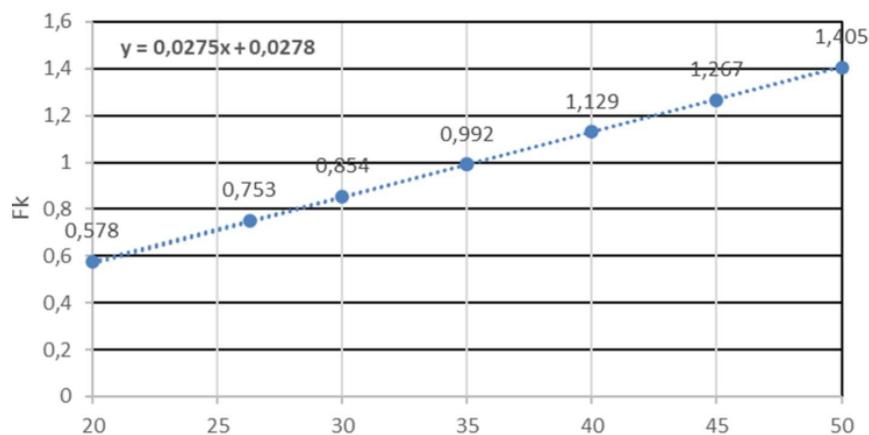
Berat isi tanah (γ) : 20.89 kN/m³
 Sudut geser dalam (ϕ) : 1.545 °
 Kohesi : 26.3 Kpa

Dari ketiga parameter tersebut, analisis balik dilakukan terhadap kohesi. Hal ini disebabkan oleh adanya rembesan air sesuai kondisi lereng saat longsor yang memberikan perubahan terhadap nilai kohesi. Prosedur analisis balik selengkapnya dapat dilihat pada dalam Soil Strength and Slope Stability (Duncan dkk, 2005)

Tabel 3. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan dengan *Trial* Kohesi

Trial and Error C kohesi (Kpa)	FK
20	0,578
26,3	0,753
30	0,854
35	0,992
40	1,129
45	1,267
50	1,405

Nilai kohesi pada Tabel 3 diplotkan kedalam sebuah grafik hubungan FK vs. c . Pada saat $FK=1$ diperoleh $c = 35.3$ kPa.



Gambar 7. Kurva Hubungan Faktor Keamanan terhadap Kohesi

4.3. Analisis Kestabilan Lereng Dengan Berbagai Skenario Perkuatan

Tabel 4 adalah skenario perkuatan lereng dengan *shotcrete* yang dilengkapi dengan drainase horisontal.

Tabel 4. Skenario Perkuatan Lereng

MUTU BETON K 250 KETEBALAN 10 CM				
PANJANG DRAINAGE (M)				
10	20	30	40	50
2-5°	2-5°	2-5°	2-5°	2-5°
MUTU BETON K 300 KETEBALAN 10 CM				
PANJANG DRAINAGE (M)				
10	20	30	40	50
2-5°	2-5°	2-5°	2-5°	2-5°
MUTU BETON K 250 KETEBALAN 15 CM				
PANJANG DRAINAGE (M)				
10	20	30	40	50
2-5°	2-5°	2-5°	2-5°	2-5°
MUTU BETON K 300 KETEBALAN 15 CM				
PANJANG DRAINAGE (M)				
10	20	30	40	50
2-5°	2-5°	2-5°	2-5°	2-5°

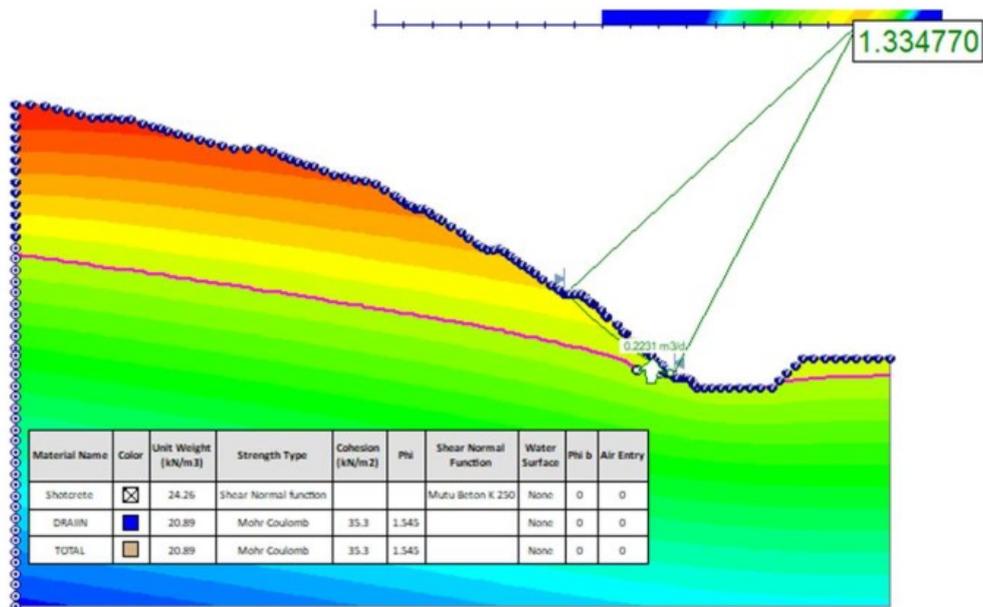
Tabel 5. Faktor Keamanan pada Beban Gempa dengan Skenario Perkuatan Lereng

DRAINAGE (5 DEGREE FROM HORIZONTAL)	SHOTCRETE K250 , 10 CM	SHOTCRETE K300 , 10 CM	SHOTCRETE K250 , 15 CM	SHOTCRETE K300 , 15 CM
N/A	1.141710	1.194550	1.215760	1.295680
5	1.145590	1.198450	1.219300	1.299170
10	1.145610	1.198470	1.219310	1.299180
20	1.145600	1.198480	1.219320	1.299190
30	1.145630	1.198480	1.219360	1.299200
40	1.145610	1.198480	1.219330	1.299200
50	1.145610	1.198480	1.219330	1.299200
DRAINAGE (2 DEGREE FROM HORIZONTAL)	SHOTCRETE K250 , 10 CM	SHOTCRETE K300 , 10 CM	SHOTCRETE K250 , 15 CM	SHOTCRETE K300 , 15 CM
5	1.145650	1.198540	1.219060	1.298810
10	1.145670	1.198560	1.219080	1.298820
20	1.145670	1.198560	1.219090	1.298830
30	1.145690	1.198560	1.219090	1.298830
40	1.145670	1.198560	1.219090	1.298830
50	1.145670	1.198560	1.219090	1.298830
DRAINAGE (3 DEGREE FROM HORIZONTAL)	SHOTCRETE K250 , 10 CM	SHOTCRETE K300 , 10 CM	SHOTCRETE K250 , 15 CM	SHOTCRETE K300 , 15 CM
5	1.146080	1.199120	1.219490	1.299370
10	1.146090	1.199140	1.219500	1.299380
20	1.146100	1.199140	1.219510	1.299390
30	1.146100	1.199140	1.219510	1.299390
40	1.146100	1.199140	1.219510	1.299390
50	1.146100	1.199140	1.219510	1.299390
DRAINAGE (4 DEGREE FROM HORIZONTAL)	SHOTCRETE K250 , 10 CM	SHOTCRETE K300 , 10 CM	SHOTCRETE K250 , 15 CM	SHOTCRETE K300 , 15 CM
5	1.146500	1.199700	1.219020	1.298750
10	1.146520	1.199710	1.219030	1.298760
20	1.146530	1.199720	1.219040	1.298770
30	1.146530	1.199720	1.219050	1.298770
40	1.146530	1.199730	1.219050	1.298770
50	1.146530	1.199730	1.219050	1.298770

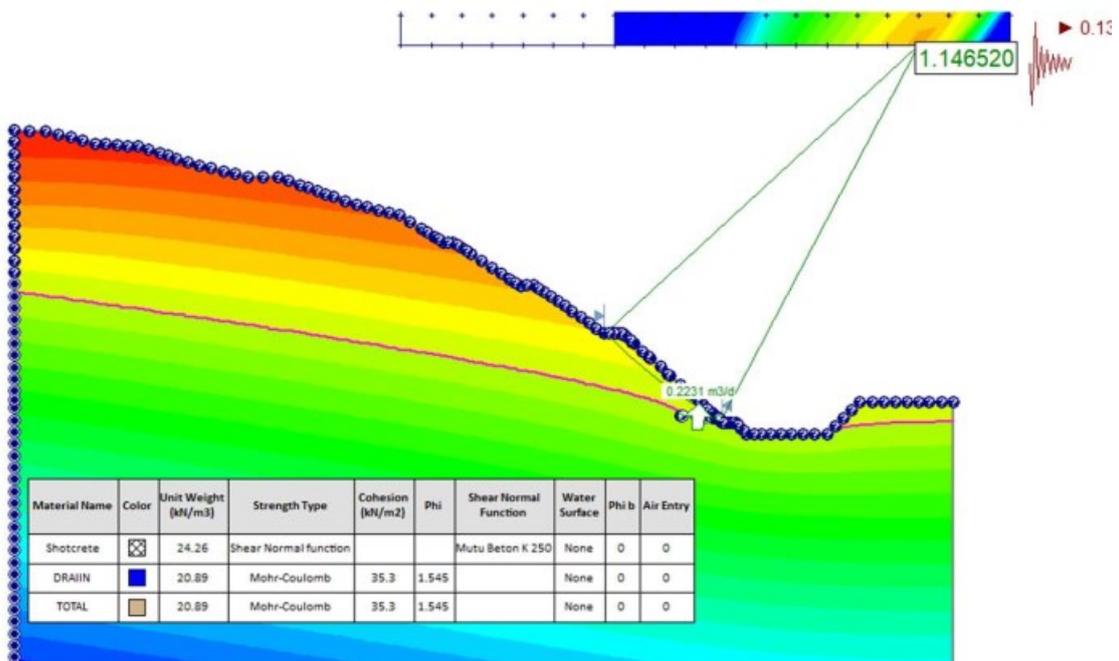
Hasil pada Tabel 5 menunjukkan bahwa perkuatan *shotcrete* yang menggunakan mutu beton K-250 setebal 10 cm dan dilengkapi dengan drainase horisontal dengan kemiringan 4° menghasilkan nilai faktor keamanan pada beban gempa sebesar 1.15 (> 1.1).

Tabel 6. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan dengan Perangkat Lunak Rocscience SLIDE dan Manual

	STATIS	DINAMIS
SOFTWARE	1.335	1.14651
MANUAL	1.32699	1.13905
MARGIN	0.0077	0.0077
%MARGIN	1%	1%



Gambar 8. Faktor Keamanan Lereng pada Kondisi Statis, dengan Perkuatan *Shotcrete* K-250, t = 10 cm dan Drainase Horizontal sepanjang 10 m dan kemiringan 4°



Gambar 9. Faktor Keamanan Lereng pada Beban Gempa, dengan Perkuatan *Shotcrete* K-250, t = 10 cm dan Drainase Horizontal sepanjang 10 m dan kemiringan 4°

5. Kesimpulan

Hasil analisis kestabilan lereng galian dengan perkuatan *shotcrete* pada pengalihan sungai Araren di kabupaten Minahasa Utara, memberikan kesimpulan yakni penggunaan *shotcrete* sebagai perkuatan lereng galian yang telah mengalami kelongsoran dapat menjaga lereng tersebut dalam kondisi stabil, baik pada kondisi statis maupun pada beban gempa. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan sebesar 1.33 pada kondisi statis dan faktor keamanan sebesar 1.15 pada beban gempa.

Material *shotcrete* yang disarankan untuk digunakan memiliki spesifikasi yakni mutu beton K-250 dan tebal 10 cm. Perkuatan *shotcrete* dilengkapi dengan sistem drainase horisontal dari pipa *perforated* berdiameter 6” sepanjang 10 m, dan kemiringan pipa 4° terhadap bidang horisontal.

Referensi

- Abramson Lee, W., Sharma, S., Lee, T. S., Boyce G. M., (1996). Slope Stability and Stabilization Methods. Second Edition. New York : John Wiley & Sons, inc.
- Ahmad Syahal Syaifuddin.,(2019). Optimasi Produksi Penambangan Dari Aspek Perancangan Geometri Lereng Kuari Tanah Liat Mliwang Barat Pt. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Kabupaten Tuban, Jawa Timur.
- Aji Permana Putra., Djoko Septanto., Sumantri W. Praja., (2018). Penanganan Daerah Rawan Longsor Dengan Menggunakan Metode Shotcrete. Sekolah Tinggi Transportasi Darat. Indonesia.
- Badan Standarisasi Nasional . (2017). Standar Nasional Indonesia. Persyaratan Perancangan Geoteknik. SNI 8460.
- Das BM. 1993. Mekanika Tanah : Prinsip – Prinsip Rekayasa Geoteknis. Jilid 2.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2005). Pedoman Konstruksi dan Bagunan, Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng Pada Tanah Residual dan Batuan. Pd. T-09 2005-B.
- Desti Santi Pratiwi., Yuki Achmad Yakin., Aldo Mahaputra., (2022) Analisis Stabilitas Lereng Batuan dengan Pendekatan Kriteria Keruntuhan Hoek Brown dan Mohr Coulomb Menggunakan Metode Numerik Plaxis 2D. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung.
- Dr. Anwar Khatab., Associate Professor Mirpur University of Science and Technology Mirpur, Azad Kashmir, Pakistan. Shotcrete: Methods and Compositions. Pakistan.
- Ducan, J.M., Wright, S. G., Brandon, T. L., (2005). Soil Strength and Slope Stability. Second Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, inc.
- Eveni, O. F. (2014). Perbandingan Metode Bishop, Janbu dan Spencer dalam Perhitungan Stabilitas Lereng pada Batuan Tuff. Skripsi. Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta.
- Faisal Abbas., Saleem Ullah Khan., (2007). Foundation Engineering CE-5202 Bearing Capacity of Foundation. Civil Engineering Department UET Taxila.
- Hajime Yokoi., (2012). Relationship between soil cohesion and shear strength, Soil Science and Plant Nutrition. Japan., Tokyo.
- Hasibuan, S., Heriyadi, B. (2020). Analisis Balik Kestabilan Lereng Bekas Disposal Area Dengan Menggunakan Metode Bishop di Tambang PT. Nusa Alam Lestari di Desa Salak, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat. Jurnal Bina Tambang. Vol 5, No.4 pg 46 – 56.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2020). No.21 Tentang Pengalihan Sungai.
- Kurniawan, Y. D., Wardana, N. K., & Hermawan, A. (2022). Perkuatan Lereng Jalan Menggunakan Shotcrete Pembangunan Ruas Jalan Segmen 01 TawangNgalang (Studi Kasus Proyek Jalan PT. Arena Reka Buana). Institut Teknologi Nasional Yogyakarta. Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII (ReTII) pg 32 – 38.
- Larimit., (2024). Drainase sub-horizontal (pengeboran konvensional) Kategori: MODIFIKASI REZIM AIR TANAH – Drainase dalam.
- Nur Budi Susanto., (2013). TUGAS ESSAY MEKANIKA BATUAN Perkuatan Lereng Dengan Metode Shotcrete. Jurusan Teknik Sipil Dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- PT. Putra Jaya Nusa Gemilang., (2020).Proyek Pekerjaan Penanganan Longsor Cluster R1 & R2 Dan Perkuatan Sisi Sungai Belu Client Pt. Pertamina Geothermal Energy (Pge) Lokasi Area Ulubelu.
- Putro, M. F. E.N., Agustina, D.H., (2023). Analisis Kestabilan Lereng Dengan Perkuatan Shotcrete Menggunakan Plaxis (Studi Kasus : Ruas Jalan Tarempa – Rintis STA 07+800 Kab. Anambas). Sigma Teknika, Vol 6, No1 pg 223- 230
- Qingqing Yang., Fei Cai., (2021). Determination of Equivalent Mohr Coulomb Criterion from Generalised

Hoek-Brown Criterion. China.

- Republik Indonesia Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga., (2002). Spesifikasi Khusus Interim Beton Semprot (Shotcrete) SKh-3.7.18. Republik Indonesia.
- Rizaldi, Heryadi, B. (2020). Analisis Balik Kestabilan Lereng Dengan Menggunakan Metode Bishop yang Disederhanakan pada area Blok Bukit Tambun PT. Cahaya Bumi Perdana, Kota Sawahlunto. *Jurnal Bina Tambang*. Vol 5, No.4 pg 57 – 67.
- Tereza Poklopová., Veronika Pavelcová., Michal Šejnoha.,(2021). Comparing The Hoek-Brown And Mohr-Coulomb Failure Criteria In Fem Analysis. Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanics. Czech Republic .
- Yanhui Song 1., Man Feng 1., & Peng Chen., (2003). Modified minimum principal stress estimation formula based on Hoek–Brown criterion and equivalent Mohr–Coulomb strength parameters. *Scientific Reports*.