PROSIDING, Seminar Teknologi Kebumian dan Kelautan (SEMITAN II)
Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya (ITATS), Indonesia, 12 Juli 2020
ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

PENGARUH STRUKTUR KETIDAKMENERUSAN PADA KESTABILAN LERENG PENGGALIAN BATUAN

Finanti P. Dwikasih [1] dan S. Koesnaryo [1]

[1] Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Yogyakarta

e-mail: finantipujadk@gmail.com

ABSTRAK

Batuan di alam pada umumnya bersifat heterogen, anisotrop, dan diskontinu. Struktur ketidakmenerusan (diskontinuitas) pada massa batuan merupakan faktor yang dapat mempengaruhi deformabilitas, kekuatan, dan permeabilitas massa batuan. Selain itu, diskontinuitas yang sangat besar dan persisten secara kritis dapat mempengaruhi tingkat kestabilan lereng.

Kestabilan lereng merupakan salah satu permasalahan yang sering dihadapi dalam pekerjaan rekayasa konstruksi pertambangan. Gangguan terhadap kestabilan lereng akan mengganggu keselamatan pekerja, kerusakan lingkungan, kerusakan alat penambangan, mengurangi intensitas produksi, dan mengganggu kelancaran pelaksanaan penambangan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengenali diskontinuitas batuan serta pengaruhnya terhadap kestabilan lereng berdasarkan hasil studi literatur dari beberapa peneliti terdahulu.

Kata kunci: diskontinuitas, kestabilan lereng

PENDAHULUAN

Dalam menilai suatu kestabilan lereng penggalian batuan, penentuan sifat rekayasa massa batuan secara akurat sangatlah penting dilakukan. Sifat-sifat ini terdiri dari sifat fisik dan mekanik batuan utuh serta sifat dari diskontinuitas seperti *joint* (kekar), *fault* (patahan), *bedding* (bidang perlapisan), *shear zone* (zona geser), *cleavage*, dan *foliation* (foliasi) yang terdapat pada suatu blok batuan.

Keberadaan bidang diskontinu massa batuan akan mempengaruhi banyak hal yang berhubungan dengan penggalian batuan, diantaranya ialah pengaruh terhadap kekuatan geser massa batuan. Semakin banyak bidang diskontinu yang memotong massa batuan, maka semakin kecil kekuatan geser batuan. Hal ini akan meningkatkan peluang terjadinya longsoran terhadap penggalian massa batuan.

Selain itu, perilaku massa batuan juga dipengaruhi oleh kekasaran permukaan batuan, pelapukan dan adanya isian. Kekasaran permukaan tersebut mengontrol kekuatan geser dan dilatansi. Menurut Goodman (1976) dalam Kliche (2009), kekuatan massa batuan, yakni batuan utuh dan diskontinuitas batuan, harus dipertimbangkan dalam setiap desain struktur baik lereng batuan maupun bukaan bawah tanah.

DISKONTINUITAS

Dua faktor massa batuan terpenting yang mempengaruhi kestabilan lereng adalah kekuatan geser diskontinuitas dan lokasi serta arah diskontinuitas sehubungan dengan kemiringan lereng. Selain itu, jenis batuan, jenis diskontinuitas, intensitas diskontinuitas, kekasaran permukaan diskontinuitas, banyaknya diskontinuitas, serta jenis dan sifat bahan pengisi (jika ada) antara dua bidang diskontinuitas merupakan faktor-faktor lain yang mempengaruhi tingkat kestabilan lereng.

Jenis Diskontinuitas

Menurut Giani (1992), diskontinuitas merupakan istilah umum yang digunakan sebagai istilah untuk batuan yang mengalami kerusakan. Diskontinuitas merepresentasikan bidang lemah pada massa batuan serta merupakan bidang yang memisahkan massa batuan menjadi bagian yang terpisah, seperti *bedding plane* (bidang perlapisan), *joint* (kekar), *fault* (patahan), *cleavage*, dan *foliation* (foliasi).

Semua jenis diskontinuitas memiliki sifat-sifat fisik sebagai berikut:

1. Arah diskontinuitas.
2. Spasi diskontinuitas.
3. Lebar bukaan diskontinuitas.
4. Intensitas diskontinuitas.
5. Kekasaran diskontinuitas.

Diskontinuitas ini dapat diisi dengan beberapa material pengisi yang menunjukkan parameter kekuatan seperti kohesi dan gesekan di sepanjang permukaan batuan.

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

Berikut berbagai macam jenis diskontinuitas beserta pengaruhnya terhadap kestabilan lereng batuan penggalian batuan:

Bedding Plane

Bedding Plane merupakan istilah bidang perlapisan yang terdapat pada batuan sedimen (Kliche, 2009). Bidang perlapisan ini juga dapat muncul pada permukaaan antara berbagai jenis batuan yang berbeda dengan jarak yang bervariasi dalam satu unit batuan tunggal. Pada beberapa jenis batuan, pergerakan sepanjang bidang perlapisan akan memperlemah zona geser yang akan mengurangi nilai kuat geser. Sehingga sifat dan inklinasi dari bidang perlapisan ini selalu menjadi pertimbangan utama dalam penilaian kesrtabilan lereng pada batuan sedimen.

***Joint* (Kekar)**

Kekar merupakan jenis diskontinuitas yang terbentuk secara alami tanpa mengalami pergerakan atau walaupun bergerak, pergerakan tersebut sangat sedikit sehingga bisa diabaikan (Price, 1966 dalam Priest, 1993). Kekar merupakan jenis diskontinuitas yang sering menjadi pertimbangan. Hal ini disebabkan kekar merupakan bidang diskontinu yang telah pecah dan terbuka, sehingga menjadi bidang lemah pada massa batuan. Selain itu, kekar hampir selalu ada pada suatu massa batuan. Oleh sebab itu, dalam pertimbangan geoteknik, seringkali kekar lebih menjadi perhatian dibandingkan jenis bidang diskontinu lainnya.

***Fault* (Sesar)**

Sesar lebih jarang ditemukan pada suatu masssa batuan dibandingkan dengan kekar dan akan memperlihatkan tanda ketika bidang tersebut telah mengalami perpindahan atau pergerakan. Hal ini dapat dilihat dari adanya zona hancuran maupun *slickenside* atau jejak yang terdapat disepanjang bidang sesar. Sesar dikenal juga sebagai zona lemah (*weakness zone*) karena dapat mempengaruhi kestabilan massa batuan dalam skala wilayah yang luas.

***Cleavage* (Bidang belah)**

Cleavage (bidang belah) merupakan jenis struktur diskontinuitas yang terdapat pada jenis batuan metamorf. Jenis diskontinuitas terkait dengan *cleavage* ini cenderung halus (sering dilihat sebagai set paralel garis lurus). *Cleavage* yang terdapat pada massa batuan, cenderung menjadi faktor utama yang mengendalikan kestabilan lereng.

***Unconformities* (Ketidakselarasan)**

Unconformities (ketidakselarasan) merupakan permukaan yang mewakili adanya kerusakan pada proses sedimentasi. Kerusakan seperti ini hanya signifikan secara struktural di mana beberapa erosi atau kemiringan batuan telah terjadi sebelum pengendapan material di atasnya (ketidakselarasan sudut). Ketidakselarasan sudut biasanya terjadi pada area yang luas. Permukaan sering tidak teratur dengan perubahan kemiringan yang terjadi secara tiba-tiba. Ketidakselarasan biasanya menandai perubahan dalam sifat batuan. Hal ini bisa menjadi zona lemah pada massa batuan.

Vein

Vein merupakan bidang diskontinuitas yang berupa material atau mineral yang mengisi celah pada batuan. *Vein* dapat berupa batuan beku akibat proses mineralisasi. *Vein* dapat menambah kekuatan massa batuan dan dapat mengurangi kekuatan batuan, oleh karena itu hal ini akan mempengaruhi tingkat kestabilan dari suatu lereng batuan.

***Tension Cracks* (Tegangan Retak)**

Retakan sering sekali ditemukan pada permukaan lereng batuan. Keberadaan retakan ini menunjukkan bahwa dalam zona tertentu, tegangan tarik melebihi kekuatan tarik (Baker,1981). Pengaruh dari adanya tegangan retak terhadap kestabilan lereng adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan geser massa batuan akibat akan berkurang akibat adanya retakan.
2. Tekanan air yang terdapat pada permukaan retakan merupakan faktor pendorong terjadinya longsoran.
3. Air yang terdapat pada celah retakan cenderung mengurangi kekuatan massa batuan lereng tersebut.

MEKANISME KELONGSORAN LERENG

Kelongsoran lereng merupakan pergerakan massa batuan menuruni lereng karena pengaruh secara langsung dari gaya gravitasi. Lereng akan stabil jika gaya penahan lebih besar dari gaya penggerak.

Macam-macam Mekanisme Kelongsoran Lereng

Longsor Bidang

Longsor bidang merupakan tipe longsoran batuan yang paling mudah untuk dianalisis. Longsor bidang merupakan suatu longsor batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Bidang luncur tersebut dapat berupa bidang sesar, kekar (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan. Longsor

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

bidang dapat terjadi jika ditemukan kondisi antara lain (Hoek dan Bray, 1981):

1. Kemiringan dari bidang diskontinuitas harus melebihi sudut geser dalam.
2. Kemiringan dari bidang diskontinuitas harus lebih kecil dari kemiringan muka lereng.

Menurut Wyllie dan Mah (2004), longsor bidang dapat terjadi apabila memenuhi beberapa syarat seperti pada Gambar 1:

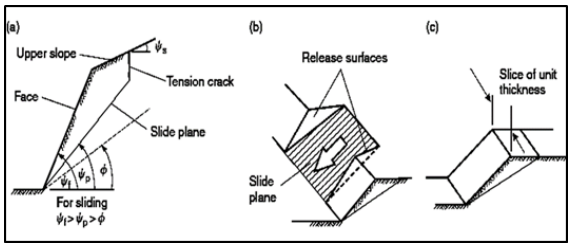
1. Jurus bidang luncur (αp) sejajar atau mendekati sejajar terhadap jurus bidang permukaan lereng (αf) dengan perbedaan maksimal 20°.
2. Kemiringan bidang luncur (ψ_p) harus lebih kecil kemiringan bidang permukaan lereng (ψ_f) atau pada Gambar 1 ($\psi_f > \psi_p$).
3. Kemiringan bidang luncur (ψ_p) lebih besar daripada sudut geser dalam (ϕ), atau atau pada Gambar 1 ($\psi_p > \phi$).
4. Terdapatnya bidang bebas yang merupakan batas lateral dari massa batuan yang longsor.

Dari kondisi diatas dapat disusun dalam suatu hubungan, yaitu:

$$\psi_f > \psi_p > \phi \quad \text{.....(1)}$$

dimana,

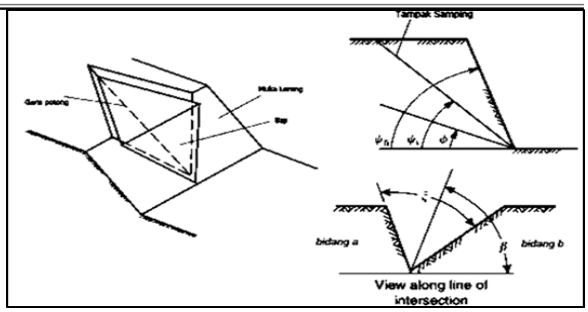
ψ_f = kemiringan muka lereng;
ψ_p = kemiringan dari bidang diskontinu; dan
ϕ = sudut gesek dalam.



Gambar 1: Longsor Bidang (Wyllie dan Mah, 2004).

Longsor Baji

Longsor tiga dimensi baji ini terjadi ketika dua bidang diskontinuitas saling berpotongan sehingga material yang terbentuk baji diatas bidang diskontinu dapat meluncur keluar kearah yang sejajar dengan garis persimpangan dua diskontinuitas seperti pada gambar 2 (Hoek et al, 1994). Sudut perpotongan antara bidang lemah tersebut lebih besar dari sudut geser dalam batuan. Bidang lemah ini dapat berupa kekar (joint) maupun bidang perlapisan.



Gambar 2: Longsor Baji (Wyllie dan Mah, 2004).

Dari kondisi di atas dapat disusun dalam suatu hubungan, yaitu:

$$\psi_f > \psi_i > \phi \quad \text{..... (2)}$$

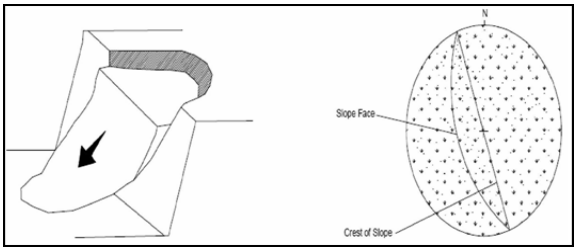
dimana, ψ_f = kemiringan muka lereng; ψ_i = kemiringan dari perpotongan 2 bidang diskontinu; dan ϕ = sudut gesek dalam.

Longsor baji dapat terjadi dengan syarat geometri sebagai berikut:

1. Permukaan bidang lemah a dan bidang lemah b rata, tetapi kemiringan bidang lemah a lebih besar daripada bidang lemah b (Bidang yang mempunyai kemiringan lebih kecil dinamakan bidang b dan sebaliknya bidang a).
2. Arah penunjaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng ($\psi_i < \psi_f$)

Longsor Busur

Longsor busur merupakan longsor batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang berbentuk busur (Gambar 3). Longsor busur paling umum terjadi di alam, terutama pada batuan yang lunak (tanah). Pada batuan yang keras longsor busur hanya dapat terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidangbidang lemah (rekahan) yang sangat rapat dan tidak dapat dikenal lagi kedudukannya.



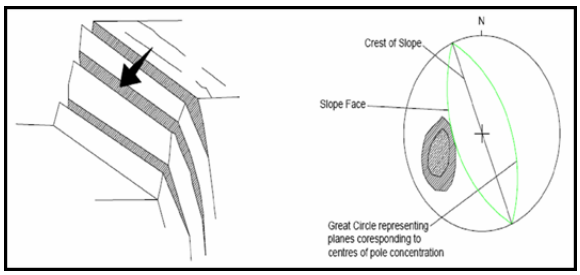
Gambar 3: Longsor Busur (Hoek dan Bray, 1981).

Longsor busur akan terjadi jika partikel individu pada suatu tanah atau massa batuan sangat kecil dan tidak saling mengikat. Penurunan sebagian permukaan atas lereng yang berada disamping rekahan menandakan adanya gerakan lereng yang pada akhirnya akan menimbulkan kelongsoran lereng.

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

Longsor Guling

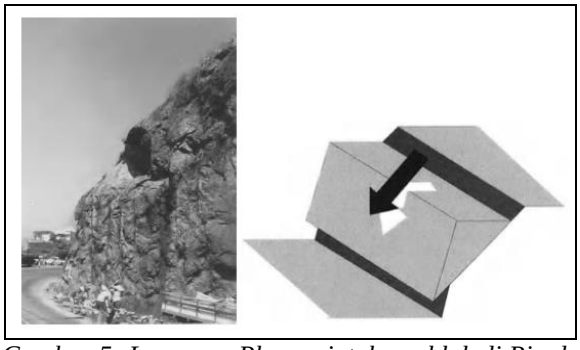
Longsor guling terjadi pada lereng terjal untuk batuan yang keras dengan bidang-bidang lemah tegak atau hampir tegak dan arahnya berlawanan dengan arah kemiringan lereng. Kondisi untuk mengguling ditentukan oleh sudut geser dalam dan kemiringan sudut bidang gelincirnya, suatu balok dengan tinggi h terletak pada bidang miring dengan sudut kemiringan sebesar α yang disajikan pada Gambar 4. Longsor dapat terjadi bila $\psi > 900 + \phi - \alpha$ dimana ψ adalah kemiringan bidang lemah, ϕ adalah sudut geser dalam dan α adalah kemiringan lereng.



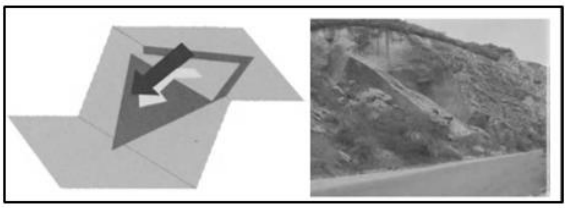
Gambar 4: Longsor Guling (Hoek dan Bray, 1981).

Mekanisme kelongsoran lereng (Ortigao et al., 2004) dapat diringkas sebagai berikut:

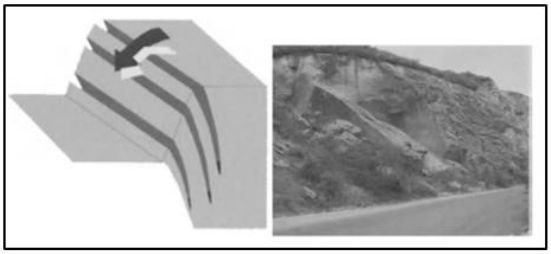
1. Kelongsoran bidang diatur oleh diskontinuitas utama yang mengarah ke kemiringan (gambar 5).
2. Mekanisme kelongsoran baji diatur oleh dua diskontinuitas utama di dimana garis memotong persimpangan ke arah lereng (gambar 6).
3. Kelongsoran guling dipengaruhi oleh faktor dimensi blok batuan, sudut bidang "diskontinuitas" (*joint*) serta sudut gesek dalam batuan (*friction angle*) (gambar 7).
4. Kelongsoran busur, di mana permukaan gelincir berbentuk seperti cangkang, kelongsoran ini terjadi pada massa batuan yang terkekarkan dan pada tanah (gambar 8).
5. *Rock fall* terdiri dari jatuhnya balok yang lepas atau lempengan karena tergelincir, berguling atau jatuh pada lereng (gambar 9).



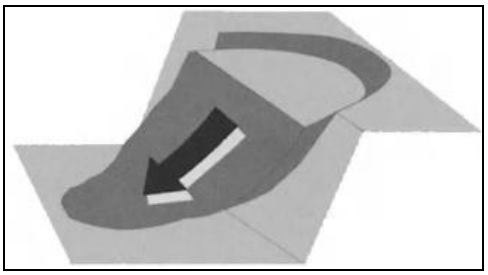
Gambar 5: Longsorn Planar, jatuhnya blok di Rio de Janeiro.



Gambar 6: Longsoran Baji, Pan American Highway, Ecuador.



Gambar 7: Longsoran Toppling, Portugal.



Gambar 8: Longsoran Busur.

Gambar 9: Jatuhan Blok Lepas.

KUAT GESER BATUAN TERKEKARKAN

Pada massa batuan terdapat diskontinuitas seperti foliasi dan bidang perlapisan, kekar, kekar geser, dan patahan. Pada kedalaman dangkal di mana tekanan overburden kecil, kemungkinan terjadinya keruntuhan sangat kecil, dan perilaku massa batuan dikendalikan oleh diskontinuitas. Oleh karena itu, analisis stabilitas massa batuan didasarkan pada faktor-faktor yang mengontrol kekuatan geser dari diskontinuitas.

Kriteria Keruntuhan Barton

Barton dkk (1973, 1976, 1977, 1990) dalam kramadibrata,2012, berpendapat bahwa kriteria sederhana seperti Mohr-Coloumb ataupun Patton

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

(1996) tidak cukup untuk menggambarkan kekuatan geser batuan mengusulkan kriteria keruntuhan geser untuk batuan terkekarkan dengan persamaan:

$$\tau = \sigma_n \tan\left[\emptyset_b + JRC\ log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right] \quad \text{..... (3)}$$

Pengaruh skala pada JRC dan JCS

Barton dan Bandis (1982) mengusulkan koreksi skala untuk JRC melalui persamaan berikut:

$$JRC_n = JRC_0\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0{,}02\,JRC_0} \quad \text{..... (4)}$$

Faktor skala lain yang harus dipertimbangkan (Barton dan Bandis 1982) adalah pengurangan nilai JCS yang diperhtungkan melalui persamaan berikut:

$$JCS_n = JCS_0\left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0{,}02\,JCS_0} \quad \text{..... (5)}$$

Dimana JRCo, JCSo dan Lo (panjang) merupakan contoh skala laboratorium 100 mm dan JRCn , JCSn dan Ln merupakan ukuran blok in situ.

Kekuatan Geser Kekar yang Terdapat Material Pengisi

Pada kasus kelongsoran bidang pada umumnya diinisiasi oleh bidang perlapisan yang terdapat material pengisi. Jika material pengisi lebih tebal dari tinggi kekasaran, maka karakteristik material pengisi yang lebih berpengaruh, tetapi jika material pengisi tersebut lebih tipis, maka kekasaran akan berperan pada kelongsoran. Goodman (Goodman, R. E.,1974) dan Ladanyi & Archambault (Ladanyi, R. and Archambault, G. 1970) dalam saptono, 2009 melakukan penelitian terhadap perilaku kekar dengan pengisi dan tidak ada material pengisi bahwa kekuatan geser akan berkurang secara bertahap sesuai hingga mencapai 50% dari hasil kekuatan geser laboratorium ketika ketebalan lapisan pengisi melebihi tinggi maksimum kekasaran. Barton (1974) dalam Ortigao (2004) juga mempelajari tentang kekuatan geser pada kekar yang terdapat material pengisi (Tabel 1)

Pengaruh Air

Keberadaan air pada bidang kekar menyebabkan pengaruh mekanik dan kimia, yang paling penting adalah mengurangi kekuatan geser kerena adanya tegangan efektif. Air akan cenderung mengurangi energi permukaan dan kekuatan antar kristal penyusun batuan, hasilnya sifat mekanik menjadi turun. Keberadaan air sangat berperan pada kekuatan batuan, sebagai contoh batuan yang sangat peka terhadap air adalah batulumpur, batulempung dan batulanau (Bukovansky, 1962; 1966 dalam Vutukuri Lama & Saluja, 1974 dalam saptono, 2009).

Tabel 1: Kekuatan geser kekar yang diisi (Barton, 1974 dalam Ortigao, 2004)

Material	Description	Peak		Residual	
		c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)
Bentonite	Bentonite seam in limestone	0.015	7.5	–	–
	Thin layer	0.09–0.12	12–17	–	–
	Triaxial test	0.06–0.1	9–13	–	–
Clays	Overconsolidated clay	0–0.18	12–18	0–0.03	10–16
Granite	Clay-filled joint	0–0.1	24–45	–	–
	Sand-filled joint	0.05	40	–	–
	Fault zone jointed	0.24	42	–	–

Keadaan ini secara berlanjut mengurangi kekuatan geser. Barton (Barton, N., 1976) menerangkan bahwa pengurangan kekuatan geser karena menurunnya tegangan tarik dan kuat tekan. Sehingga penurunan sudut gesek dalam terjadi pada batuan tidak brittle dan untuk batuan brittle berlaku sebaliknya, yaitu tidak terjadi penurunan sudut gesek dalam

ANALISIS KESTABILAN LERENG

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa, kestabilan lereng merupakan salah satu permasalahan yang sering dihadapai dalam pekerjaan rekayasa konstruksi pertambangan. Gangguan terhadap kestabilan lereng akan mengganggu keselamatan pekerja, kerusakan lingkungan, kerusakan alat penambangan, mengurangi intensitas produksi dan menggangu kelancaran pelaksanaan penambangan.

Analisis kestabilan lereng sangat diperlukan dalam mencegah terjadinya gangguan akibat bahaya keruntuhan tersebut. Dalam keadaan tidak terganggu (alamiah), massa batuan berada pada kesetimbangan gaya. Namun, adanya aktivitas pada massa batuan seperti penggalian, akan mengakibatkan terjadinya perubahan gaya. Keruntuhan merupakan salah satu akibat dari perubahan gaya serta suatu reaksi dalam mencari kesetimbangan baru, dimana hal tersebut terjadi karena gaya-gaya yang cenderung menyebabkan material lereng untuk bergerak kebawah (gaya penggerak) seperti gaya gravitasi, gaya tekan oleh air maupun adanya pembebanan pada permukaan lereng, lebih besar dari pada gaya-gaya penahan terjadinya longsor seperti gaya gesek, kohesi atau kekuatan material (Santoso,2013).

Adanya bidang diskontinu pada massa batuan akan mengurangi kekuatan massa batuan dan dapat berfungsi sebagai jalur rembesan air yang dapat mengakibatkan terjadinya rekahan tarik (tensile crack) pada massa batuan dimana hal tersebut dapat mengurangi nilai keamanan dari lereng (Sustriani, 2012).

Prinsip dari analisis kestabilan lereng adalah menentukan faktor keamanan. Faktor keamanan merupakan perbandingan antara gaya penahan terhadap gaya penggerak yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

$$\text{Faktor Keamanan (FK)} = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} \text{..... (6)}$$

Dimana untuk keadaan-keadaan:
1. FK > 1.0 : lereng dianggap stabil
2. FK = 1.0 : lereng dalam keadaan seimbang dan siap untuk longsor jika ada sedikit gangguan
3. FK < 1.0 : lereng dianggap tidak stabil

Di dalam menganalisis kestabilan lereng selalu berkaitan dengan perhitungan untuk mengetahui angka faktor keamanan sebagai indikasi performa suatu lereng. Berdasarkan rumus diatas untuk mendapatkan kemantapan lereng dapat didapatkan melalui cara menambah gaya penahan maupun mengurangi gaya penggeraknya (Santoso,2013).

Analisis Kestabilan Lereng Batuan Metode Konvensional

Menurut Totsev et al (2009) analisis kestabilan lereng dengan metode konvensional dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu:
1. Analisis Metode Kesetimbangan Batas
2. Analisis stereografi dan kinematik
3. Simulasi *Rock fall*

Analisis Metode Kesetimbangan Batas

Metode kesetimbangan batas telah digunakan selama beberapa dekade untuk merancang struktur geoteknik secara aman (Fredlund et al., 1977). Metode Bishop yang disederhanakan merupakan metode keseimbangan batas yang paling sering digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng (Lovine et al., 2011). Meskipun metode bishop dianggap tidak terlalu teliti dalam analisis kestabilan lereng karena tidak memperhitungkan keseimbangan batas gaya horisontal, metode ini cukup sederhana serta praktis untuk diterapkan, dan dalam banyak masalah, metode ini menghasilkan hasil yang cukup teliti (Weia et al., 1998).

Analisis stereografi dan kinematik

Analisis kinematik, meneliti mode kelongsoran lereng yang mungkin terjadi dalam massa batuan terkekarkan (Wright et al., 1984). Hubungan sudut antara diskontinuitas dan permukaan lereng digunakan untuk menentukan potensi kelongsoran yang terjadi (Yoon et al., 2002). Representasi stereografik (stereonet) dari bidang dan garis digunakan. Stereonet berguna untuk menganalisis blok batuan diskontinu. Program DIPS (perangkat lunak) memungkinkan untuk visualisasi data struktural menggunakan stereonet, penentuan kelayakan kinematik massa batuan dan analisis statistik dari sifat diskontinuitas (Zulfu et al., 2008).

Simulasi Rock fall

Pada analisis kestabilan lereng batuan, kita dapat merancang langkah-langkah perlindungan di dekat atau di sekitar struktur yang terancam rusak oleh blok yang jatuh. Simulator *Rock fall* akan menentukan jalur balok tidak stabil yang berbeda dari permukaan lereng batuan. Metode solusi analitik yang dijelaskan oleh Hungr & Evans (1988) mengasumsikan blok batuan sebagai titik dengan massa dan kecepatan yang bergerak pada lintasan sehubungan dengan kemungkinan kontak dengan permukaan lereng. Perhitungan ini membutuhkan dua koefisien restitusi yang bergantung pada bentuk fragmen, kekasaran permukaan lereng, momentum dan sifat deformasi serta dampak yang akan terjadi (Hataf et al., 2007). Program-program seperti ROCFALL (Rocscience) menganalisis lintasan blok jatuh berdasarkan perubahan kecepatan saat blok batu menggulung, meluncur dan memantul pada berbagai bahan yang membentuk lereng (Mahboubi et al., 2008)

Metode Numerik

Menurut Stead et al. (2006), kemajuan terbaru dalam karakterisasi deformasi lereng batuan kompleks dan kelongsoran menggunakan teknik numerik telah menunjukkan potensi yang signifikan untuk memajukan pemahaman kita tentang mekanisme yang terlibat dan risiko yang terkait. Permodelan numerik memberikan solusi perkiraan untuk masalah yang tidak dapat diselesaikan dengan metode konvensional, seperti lereng dengan geometri yang cukup komplek, lereng dengan material yang bersifat anisotropi, lereng yang mempunyai karakteristik tegangan-regangan yang nonlinier.

Beberapa keuntungan lain dari penggunaan metode numerik dalam analisis kestabilan lereng antara lain yaitu:
1. Dapat digunakan untuk menganalisis lereng dengan mekanisme longsoran yang komplek.
2. Kondisi tegangan dan regangan yang ada pada lereng dapat dimasukkan dalam perhitungan kestabilan lereng.
3. Berbagai macam kriteria keruntuhan baik yang linear maupun nonlinier dapat digunakan.
4. Efek perkuatan pada lereng dapat dimasukkan dengan mudah dalam analisis kestabilan lereng.

Secara garis besar terdapat permodelan numerik dapat dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu:
1. Pemodelan Kontinum
2. Pemodelan Diskontinum
3. Pemodelan Campuran (hybrid).

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

Pemodelan Kontinum

Pemodelan kontinum sangat cocok untuk menganalisis kestabilan lereng yang terdiri dari batuan masif, utuh, batuan lemah, dan massa batuan mirip tanah atau batuan dengan rekahan yang sangat intensif. Pendekatan kontinum yang digunakan dalam stabilitas lereng batuan meliputi metode beda hingga dan elemen terbatas (Zhao et al., 2005).

Metode beda hingga (FDM): Dalam persamaan kesetimbangan diferensial FDM (mis. Perpindahan regangan dan hubungan tegangan-regangan) terpecahkan (Anon1, 2013).

Metode elemen hingga (FEM): FEM menggunakan perkiraan untuk konektivitas elemen, kontinuitas perpindahan dan tekanan antar elemen.

Sebagian besar kode numerik memungkinkan pemodelan fraktur diskrit, mis. bidang perlapisan dan sesar. Beberapa model konstitutif biasanya tersedia, mis. elastisitas, elastoplastisitas, pelunakan regangan, elasto-viscoplasticity, dll. Kemunculan FlAC, FLAC 3D, VISAGE, SLIDE, SlOPE baru-baru ini memungkinkan *engineer* untuk melakukan analisis 2D dan 3D lereng batuan pada komputer (SLIDE, 2003). Meskipun kode kontinum 2D dan 3D sangat berguna dalam mengkarakterisasi mekanisme kelongsoran lereng batuan, verifikasi apakah hal tersebut telah mewakili massa batuan yang dipertimbangkan tetaplah tanggung jawab dari pengguna (SLOPE, 2002). Sedangkan lereng batuan yang terdiri dari beberapa set kekar yang mempengaruhi kelongsoran, pemodelan dengan pendekatan diskontinum dapat dianggap lebih tepat untuk digunakan (Barla et al., 2000).

Pemodelan Diskontinum

Pemodelan diskontinuum telah dikembangkan untuk analisis deformasi dan stabilitas untuk beberapa massa batuan terkekarkan dan misalnya untuk sekitar penggalian bawah tanah serta lereng batuan. Deformasi dan perubahan volumetrik dari batuan utuh (blok) serta perpindahan geser dan normal di sepanjang kekar disertakan (Bhasin, 2003).

Pendekatan diskontinuum berguna untuk lereng batuan yang dikendalikan oleh perilaku diskontinuitas. Massa batuan dianggap sebagai agregasi dari blok yang berbeda dan berinteraksi yang mengalami beban eksternal dan diasumsikan mengalami gerakan seiring waktu. Metodologi ini secara kolektif disebut metode elemen diskrit (DEM) (Barla et al., 2000). DEM didasarkan pada persamaan dinamis kesetimbangan untuk setiap blok berulang kali sampai kondisi batas dan hukum kontak serta gerak terpenuhi (Eberhardt, 2003).

Pemodelan Campuran (hybrid)

Permodelan campuran (*hybrid*) merupakan permodelan yang menggabungkan beberapa metodologi untuk memaksimalkan keunggulan dari hasil analisis. Contoh dari permodelan campuran adalah kombinasi dari metode kesetimbangan batas dengan metode elemen hingga, kombinasi dari metode *particle flow* dengan *finite difference*, serta kombinasi metode element hingga dengan metode diskrit elemen.

Meskipun analisis dengan menggunakan pendekatan kontinum dan diskontinum secara terpisah memberikan hasil yang cukup memuaskan pada beberapa kasus, akan tetapi untuk tipe keruntuhan dengan mekanisme yang kompleks yang melibatkan bidang takmenerus yang sudah ada dan rekahan getas pada batuan utuh, gandengan dari metode finite elemen dengan distinct element memungkinkan suatu permodelan keruntuhan lereng baik yang melibatkan bidang takmenerus serta terjadi proses rekahan pada batuan utuh.

KESIMPULAN

1. Dari jurnal ini dapat disimpulkan bahwa adanya diskontinuitas pada batuan akan mempengaruhi banyak hal yang berhubungan dengan aktifitas penambangan. Diantaranya adalah pengaruh terhadap kekuatan dari batuan.
2. Semakin banyak diskontinuitas pada massa batuan, semakin kecil pula kekuatan dan batuan tersebut. Diskontinuitas yang ada pada massa batuan inilah yang memiliki potensi untuk menyebabkan terjadinya ketidakstabilan lereng batuan (keruntuhan).
3. Dalam perencanaan lereng tambang, perlu sekali untuk memahami diskontinuitas tersebut, sehingga kita dapat mengetahui kapan suatu batuan tersebut akan mengalami keruntuhan dan dapat menganalisis stabilitas dari masing-masing blok batuan tersebut agar keruntuhan dapat dihindari.
4. Adanya kekuatan geser pada diskontinuitas adalah penyebab terjadinya keruntuhan pada massa batuan. Besarnya kekuatan geser pada masing-masing blok batuan berbeda-beda. Kekuatan geser pada permukaan yang planar akan berbeda dengan nilai kekuatan geser pada bidang yang permukaannya kasar dan dengan kekuatan geser pada diskontinuitas yang terdapat material pengisi. Semuanya itu juga dipengaruhi oleh air.

ISSN 2686-0651
Vol. 2, No. 1, Juli 2020

5. Untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan lereng, diperlukan analisis kestabilan lereng yang bertujuan menentukan nilai faktor keamanan sebuah lereng

DAFTAR PUSTAKA

Anon1., *Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*. PLAXIS-2D Version 8, Reference Manual, Edited by Brinkgreve, et al., DUT, the Netherlands. www.plaxis.nl. (Feb. 5,2013)

Baker, R. (1981). *Tensile Strength, Tension Cracks, and Stability of Slopes*. SOILS AND FOUNDATION. 21 (2). 1-2.

Barla, G. and Barla, M. (2000). *Continuum and discontinuum modelling in tunnel engineering*. Dept. of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Italy

Eberhardt, E. (2003). *Rock slope stability analysis-utilization of advanced numerical techniques*. Vanouver, cannada, Earth and Ocean Sciences, University of Columbia.

Fredlund, D. G. & Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Can. Geotech. J., 14, 429.

Giani, Gian Paolo. (1992). *Rock Slope Stability Analysis*. A. A. Balkema. Rotterdam. 47-55.

Hataf, N., Meidani, N. and Veis Karami, M. (2007). *Three-dimensional rock fall simulation, considering collision sand their effects on the hazard map*. Sharif University of Technology, Scientia Iranica, 14(3), 205-211.

Hungr, O., Evans, S.G. and Bonnard, C. (1988). *Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards*. Rotterdam: Balkema, 685-690.

Hoek, E. & Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3rd Ed. The Institution of Mining and Metallurgy. London.

Hoek, E. & Bray, J.W. (1994). *Rock slope engineering*. Chapman & Hall, New York.

Kliche, C.A. (2009) *Rock Slope Stability*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. (SME). Littleton. USA.27-34.

Lovine, G. G. R., Gariano, S. L., Laquinta, P., Lollino, P. and Terranova, O.G. (2011). *Limit equilibrium analysis and real-time monitoring as support for landslide risk mitigation: the san rocco case study at san benedetto ullano (Calabria)*. Disaster Management, Earth Observation.

Mahboubi, A., Aminpour, M. and Noorzad, A. (2008). *Conventional and advanced numerical methods of rock slope stability analysis, a comparison study, gotvand dam right abutment (Iran) case study*." Proc., International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, October 1-6.

Ortigao, J.A.R., & Sayao A.S.F.J. (2004). *Handbook of Slope: Rock Slope Stability*. Springer, Jerman.109-114.

Priest, S.D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. London, Chapman & Hall. 1-16.

Rai, M. A., Kramadibrata, S, & Wattimena, R. K. (2012). Mekanika Batuan. Penerbit ITB. Bandung.

Santoso, Eko. (2013). Aplikasi Pendekatan Probabilistik dalam Analisis Kestabilan Lereng pada Daerah Ketidakstabilan Dinding Utara (Longsoran #79) PT Newmont Nusa Tenggara. Tesis. Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

SLIDE (2003). *Stability analysis for soil and rock slopes*. Slide, User's Guide, Geomechanics Software Solutions, Rocscience Inc., Canada. www.rocscience.com

SLOPE (2002). *Stability Analysis*. Users Guide Version 5, GeoSlope Office, Canada. www.geoslope.com.

Stead, D., Eberhardt, E., Coggan, J. and Benko, B. (2001). *Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis – applications and limitations*. Proc., UEF International Conference on Landslides - Causes, Impacts and Counter measures, Davos, Switzerland, June 17-19, 615-624.

Totsev, A. & Jellev, J. (2009). *Slope stability analysis using conventional methods and FEM*. Proc.of 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, M. Hamza et al. (Eds.) 1503-1505.

Weia, W. B., Chenga, Y. M. and Lia, L. (1998). *Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods*. Computers and Geotechniques, 36,70-80.

Wright S. G. and Roecker, J. D. (1984). *Example problems for slope stability computations with the computer program*. UTEXAS, Research Report 353-2, UT Austin.

Wyllie, Duncan C., & Mah, Christopher W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (4th ed.). Spon Press. New York.

Yoon, W. S., Jeong, U. J. and Kim, J. H. (2002). *Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes*. Engineering Geology, 67, 51–61.

Zulfu, G., Alemdag, S., Musharraf, M. and Zaman (2008). *Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the kapikaya dam site*. Engineering Geology, 96, 17–27.