

Penentuan kekuatan geser jangka panjang batupasir dengan pendekatan perilaku rayapan geser visko-elastik

Oleh:
Singih Saptono
(Dosen Prodi Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta)

Abstrak

Pada kasus stabilitas lereng, kekuatan geser adalah parameter terpenting pada perencanaan lereng. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menduga kekuatan geser batuan, salah satu upaya dengan melakukan pengujian rayapan geser. Hasil pengujian rayapan geser menunjukkan bahwa batuan runtuh karena geseran tanpa mengalami rayapan tersier. Sehingga penerapan model rheologi rayapan yang digunakan hanya sampai rayapan sekunder saja. Model rheologi yang cocok adalah model rheologi visko-elastik atau dengan model rheologi Kelvin Umum (Generalized Kelvin). Hasil pengujian menunjukkan bahwa modulus geser tertunda (G_2) dan koefisien viskos (η_1) mengikuti fungsi waktu. Dari hasil penelitian ini diperoleh parameter modulus geser tertunda dan koefisien viskos model nonlinier yang hasilnya dapat digunakan untuk menduga kekuatan jangka panjang batuan.

Abstract

In the case of slope stability, shear strength is the most important parameter in slope design. Various studies were done to predict the shear strength of rock, one of the studies is to test the shear creep. The shear creep test results show that the rock failure happened owing to shear failure, without experiencing tertiary creep. Therefore, the application of rheology model in shear creep is until secondary creep only. The suitable model is viscous-elastic model (the Generalized Kelvin rheology model). The test result shows that the delayed shear modulus (G_2) and viscous coefficient (η_1) follow the time function. From the results of this study it is obtained parameters of delayed shear modulus and viscous coefficient of non-linear models, whose results can be used to predict long-term strength of rock.

1. PENDAHULUAN

Pengembangan metode untuk memudahkan penentuan kekuatan geser massa batuan telah dibuat, contohnya dengan menggunakan metode klasifikasi massa batuan (RMR dan GSI). Pada kasus lereng, kekuatan geser (kohesi dan sudut gesek dalam) sangat diperlukan untuk merancang lereng. Ada dua jenis kekuatan geser yaitu kekuatan geser jangka pendek (*short term*) dan kekuatan geser jangka panjang (*long term*). Penentuan kekuatan geser jangka pendek dapat dilakukan dengan uji geser langsung dan untuk menentukan kekuatan geser jangka panjang dapat dilakukan dengan uji rayapan geser. Kekuatan geser jangka panjang diperlukan untuk merancang lereng tambang jangka panjang. Berdasarkan hasil pemantauan pergerakan lereng menunjukkan bahwa terjadi perilaku rayapan (Saptono dkk, 2008a, 2008b). Prinsip uji rayapan geser yaitu memberikan beban normal dan beban geser konstan pada uji geser langsung. Di Indonesia, uji rayapan geser telah dikembangkan oleh Kramadibrata, dkk. (2002), Wattimena, dkk. (2006) dan telah diterapkan untuk menilai stabilitas lereng batuan di tambang batubara PT. Kaltim Prima Coal dan PT. Bukit asam (Kramadibrata dkk, 2007). Selanjutnya, untuk meneliti pengaruh skala terhadap kekuatan geser jangka panjang maka dilakukan modifikasi alat uji rayapan geser untuk contoh standard ke ukuran contoh besar (Kramadibrata, 2010). Penelitian mengenai uji rayapan geser dengan ukuran contoh batupasir 25 x 25 cm dengan menerapkan model rheologi elasto-visko plastik (Sulistiano dkk, 2010).

Selama ini analisis hasil uji rayapan geser dengan pendekatan model rheologi Burger. Sementara, berdasarkan hasil penelitian dua tahun terakhir bahwa analisis hasil uji rayapan geser dapat didekati dengan model rheologi visko-elastik (Yan dkk, 2008, Lu dkk, 2008) dan Yang & Chen (2011) menerapkan model rheologi visko-elastik untuk menganalisis rayapan geser batulanau.

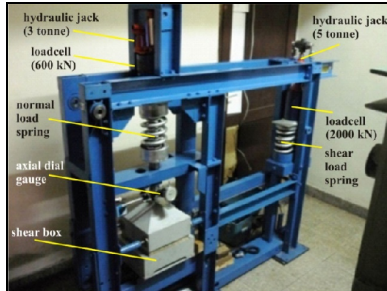
Hasil uji rayapan geser batupasir pada penelitian ini tidak menunjukkan tahap rayapan tersier seperti dijumpai pada uji rayapan tekan dan triaksial sehingga pendekatan model rheologi yang digunakan adalah model visko-elastik..

2. HASIL UJI RAYAPAN VISKO-ELASTIK BATUPASIR

Contoh batupasir yang digunakan berasal dari tambang batubara PT. Adaro Indonesia, contoh diambil dari lapangan berupa bongkah berukuran sekitar 50 x 50 x 50 cm yang selanjutnya dipotong menjadi bentuk blok berukuran 25 x 25 x 20 cm. Tujuan uji geser rayapan menggunakan blok besar untuk mengetahui model rheologi visko-elastik dapat digunakan yang selanjutnya akan digunakan untuk menduga kekuatan jangka panjang, serta pengaruh skala.

Agar memperoleh hasil pengujian lebih akurat maka peralatan uji rayapan geser ditempatkan pada ruangan dengan temperatur kamar yang relatif tidak berubah dan tidak terganggu oleh pengaruh dari luar seperti getaran dan cuaca. Blok contoh yang berbentuk balok diletakan

pada tempat contoh di mesin uji geser rayapan besar (Gambar 1). Sebelum melakukan uji rayapan geser, terlebih dahulu melakukan uji geser langsung dimaksudkan untuk menentukan kekuatan geser jangka pendek batupasir dengan parameter adalah tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) (Gambar 2).

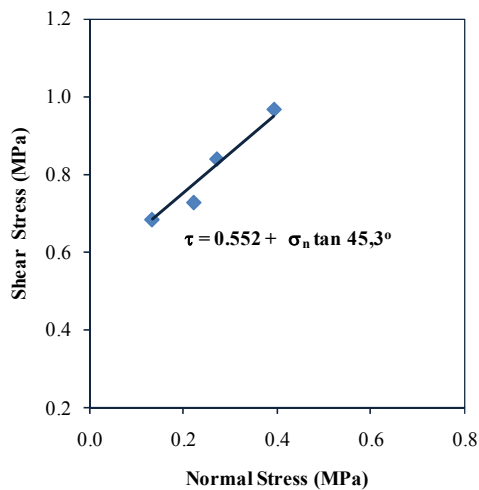


Gambar 1. Alat uji geser rayapan blok besar (Kramadibrata, 2010)

Berdasarkan persamaan regresi parameter kekuatan geser jangka pendek batupasir dengan menggunakan kriteria runtuh Mohr-Coulomb (Gambar 2) diperoleh persamaan

$$\tau = 0,552 + \sigma_n \tan 45,3^\circ \quad (1)$$

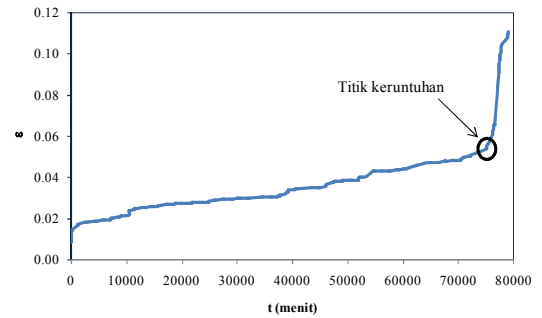
Menurut persamaan (1) diperoleh kohesi jangka pendek batupasir adalah 0,552 MPa, dan sudut gesek dalam jangka pendek adalah $45,3^\circ$ dengan tegangan geser sebesar 0,68 MPa.



Gambar 2. Hubungan antara tegangan normal vs. tegangan geser

Pada uji rayapan geser diberikan tegangan konstan sebesar 0,06 MPa tegangan normal dan 0,50 MPa tegangan geser. Hasil uji memperlihatkan ϵ mewakili regangan, dan t waktu rayapan (menit). Hasil uji (Gambar 3) menunjukkan regangan seketika terjadi sesaat setelah contoh uji diberi tegangan normal dan geser. Regangan geser semakin bertambah dengan

bertambahnya waktu disertai kecepatan rayapan yang sangat cepat hingga menit ke 1729 dan setelah itu kecepatan rayapan semakin berkurang.



Gambar 3. Hasil uji rayapan geser (Sulistianto, 2010)

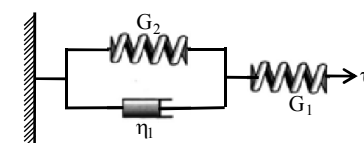
Hasil uji menunjukkan bahwa regangan geser semakin lama semakin besar akan tetapi kecepatan rayapan cenderung menjadi semakin stabil. Kondisi ini nampak pada saat perubahan dari rayapan primer ke rayapan sekunder. Hasil uji rayapan geser menunjukkan bahwa keruntuhan terjadi pada menit ke 79054 (hari ke 55). Lama pengujian rayapan geser dilakukan 56 hari.

3. MODEL RAYAPAN GESER DAN PENGARUH WAKTU

Berdasarkan hasil uji rayapan pada Gambar 3, menunjukkan bahwa rayapan geser batupasir dapat didekati dengan model rheologi visko-elastik. Model rheologi visko-elastik terdiri dua komponen yaitu komponen elastik (model Hookean) dan komponen visko/dashpot (model Newton). Untuk rheologi Kelvin Umum maka disusun komponen elastik dan visko secara paralel dan dihubungkan secara seri dengan komponen elastik (Gambar 4). Model rheologi visko-elastik dikembangkan oleh Nakamura (1949) dari uji rayapan tekan. Model rheologi visko-elastik dikenal juga dengan nama model *Generalized Kelvin* atau Model Nakamura (Nakamura, 1949). Adapun persamaan rheologi (2).

$$\epsilon(t) = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_1} t\right) \right] \quad (2)$$

Keterangan: τ = tegangan geser, G_1 = Modulus geser seketika, G_2 = Modulus geser viskos-elastik, η_1 = koefisien viskositas dan ϵ = regangan sebagai fungsi waktu. Persamaan (2) dalam prakteknya tidak memberikan perubahan regangan sebagai fungsi waktu. Sementara, hasil uji menunjukkan bahwa regangan sebagai fungsi waktu (t).



Gambar 4. Model peralaju visko-elastik (H - K Model)

Oleh karena itu persamaan (2) perlu dirubah menjadi fungsi non-linier, yaitu dengan cara memberikan indeks waktu, sehingga dapat memprediksikan regangan berdasarkan fungsi waktu.

Parameter yang berubah sebagai fungsi waktu adalah modulus geser visko-elastik (G_2) menjadi $G_2(t)$ dan koefisien viskos (η_1) menjadi $\eta_1(t)$ yaitu persamaan (3) dan (4)

$$G_2(t) = G_2 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{p1} \quad (3)$$

$$\eta_1(t) = \eta_1 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{p2} \quad (4)$$

Keterangan: t_0 adalah waktu mula-mula sehingga pada t_0 adalah waktu ke 1, t adalah waktu terjadinya geser, dan $p1$ dan $p2$ adalah parameter waktu dengan penentuan secara kurva *fitting*.

Dengan memasukan modulus geser ($G_2(t)$) sebagai fungsi waktu pada persamaan (3) dan koefisien viskos ($\eta_1(t)$) pada persamaan (4) sebagai fungsi waktu, maka akan memperoleh persamaan (5) sebagai persamaan *Generalized Kelvin* fungsi waktu..

$$\varepsilon = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - \exp \left(- \frac{G_2(t)}{\eta_1(t)} t \right) \right] \quad (5)$$

4. DISKUSI

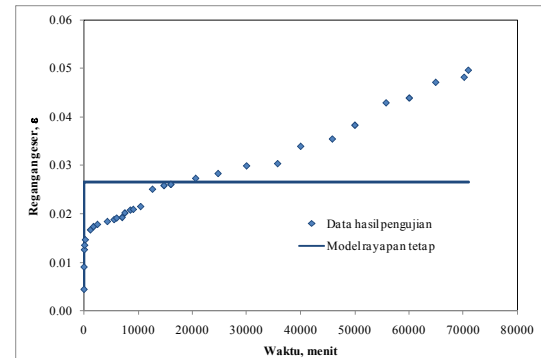
Penentuan modulus geser elastik (G_1) diperoleh dengan $G_1 = \tau/\varepsilon_0$, dan ε_0 adalah regangan geser seketika. Berdasarkan hasil data pengujian untuk contoh batupasir ukuran 25 x 25 cm diperoleh $G_1 = 57,36$ MPa. Setelah mendapatkan parameter G_1 selanjutnya parameter G_2 dan η_1 ditentukan dengan *Nonlinear Least Square Method* (NLSM) melalui proses iterasi dari persamaan (2) maka diperoleh parameter G_1 , G_2 dan η_1 seperti tertera pada Tabel 1. Namun demikian setelah parameter tersebut dimasukan persamaan (2) hasilnya tidak menunjukkan bahwa besarnya regangan dipengaruhi oleh waktu atau model regangan geser tetap (Gambar 5).

Tabel 1. Parameter model rayapan geser tetap

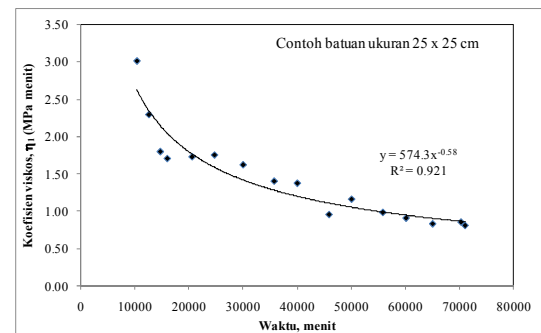
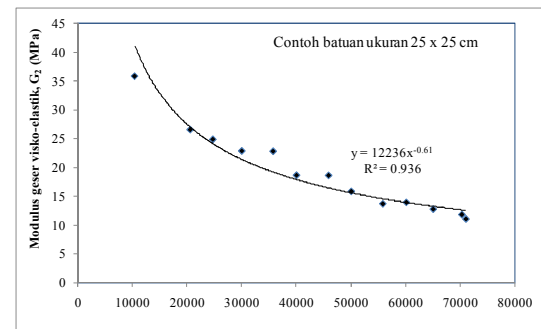
| Tegangan geser (MPa) | G_1 (MPa) | G_2 (MPa) | η_1 (MPa) |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|
| 0,50 | 57,36 | 27,95 | 0,70 |

Dengan menerapkan metode NLSM, diambil beberapa titik pengamatan regangan pada uji rayapan geser dan dilakukan analisis dengan cara parameter memfitkan hasil terhadap regangan yang terjadi. Ternyata hasil memfitkan menunjukkan bahwa pada modulus geser visko-elastik dan koefisien viskos sebagai fungsi waktu, yaitu semakin bertambahnya waktu maka akan semakin berkurang modulus geser dan koefisien viskos (Gambar 6).

Hasil iterasi terhadap persamaan (5) dengan model Hookean – Kelvin (H – K creep model) diperoleh parameter G_1 , G_2 , η_1 , $p1$ dan $p2$ (Tabel.2)



Gambar 5. Model Generalized Kelvin, model regangan tetap

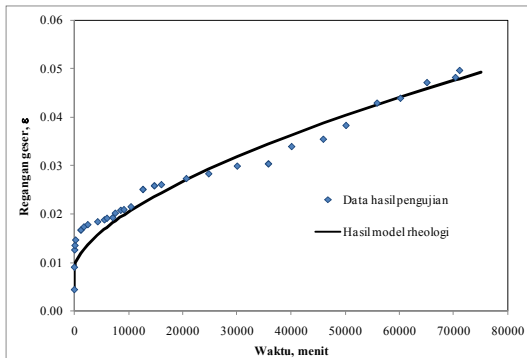


Gambar 6. Pengaruh waktu pada parameter visko-elastik

Tabel 2. Parameter model rayapan geser tak tetap

| Tegangan geser (MPa) | G_1 (MPa) | G_2 (MPa) | η_1 (MPa) | $p1$ | $p2$ |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|-------|-------|
| 0,50 | 57,36 | 42,00 | 2,92 | -0,62 | -0,57 |

Dengan memasukan parameter visko-elastik dan indeks waktu $p1$ dan $p2$ (Tabel 2) diperoleh hasil kurva regangan yang berimpit dengan hasil uji rayapan geser (Gambar 7). Gambar 7 memperlihatkan hasil regangan geser menurut persamaan (5) dan hasilnya menunjukkan bahwa ada perubahan regangan berdasarkan fungsi waktu.



Gambar 7. Hasil perhitungan model rayapan batupasir

5. PENUTUP

Dari hasil analisis rayapan geser ini menunjukkan bahwa hasil uji rayapan perilaku visko-elastik model rheologi Generalized Kelvin dapat menggantikan perilaku elasto-visko plastik model rheologi Burger. Maka penentuan kekuatan jangka panjang untuk batupasir dapat diduga melalui persamaan regangan model rheologi visko-elastik. Untuk itu perlu melakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui besarnya penurunan kekuatan geser jangka pendek ke kekuatan jangka pangang dengan pendekatan model visko-elastik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada Dr. Suseno Kramadibrata sebagai promotor dan sebagai perancang mesin uji geser rayapan skala besar serta Dr. Budi Sulistianto sebagai anggota promotor. Dan, ucapan terimakasih kepada pihak manajemen PT. Adaro Indonesia, yang senantiasa terus mendukung penelitian karakterisasi massa batuan dan pengujian geser langsung skala besar dan tak lupa terima kasih kepada kawan-kawan mahasiswa, staf laboratorium dan teknisi yang terlibat dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Kramadibrata, S., (2010): *The Development of Laboratory and Field Research of Rock Mechanics In Improving Safety of Coal and Mineral Mining Industry in Indonesia*. Annual conference of Korean society for rock mechanics, 21-22 October 2010, Seoul, South Korea.
- Kramadibrata, S., Saptono, S., Wicaksana, Y., Prasetyo, S.H., (2009): *Soft Rock Behavior With Particular Reference to Coal Bearing Strata*, 2nd International Symposium of Novel Carbon Resources Science – ITB. Bandung, Indonesia.
- Kramadibrata, S., Wattimena, R.K., Sulistianto, B. & Simangunsong, G.M., (2007): *Study on Shear Strength Characterictis of Coal Bearing Strata*, The 11st Congress

International Society of Rock Mechanics, Lisbon Portugal.

Kramadibrata S and Kushardanto H. (2002): *The role of time dependent analysis to improve environmental management system in mine closure plan in open pit mine*. International Workshop of Life Cycle Assessment and Metals. Montreal.

Lu AZ, Ding ZK, Jiao CM, Li JL. (2008): *Identification of non-stationary creep constitutive models of rock*. Chin J Rock Mech Eng;27(1):16–21.

Nakamura, S.T. (1949): *On Visco-Elastic Medium*. Sci. Rep. Tokyo Univ., 5th Series Geophysics, Vol. 1. No. 2, pp. 91-95.

Shen MR, Zhang QZ. (2010): *Study on shear creep characteristics of greenschist discontinuities*. Chin J Rock Mech Eng;29(6):1149–55.

Saptono, S., Kramadibrata, S., Sulistianto, B., Wattimena, K.R., Nugroho, P., Iskandar, E. and Bahri, S., (2008a): *Low Wall Slope Monitoring By Robotic Theodolite System Likely to Contribute to Increased Production of Coal in PT. Adaro Indonesia*, Proceeding 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, Vol. 1, Potvin et al. eds. Perth. Australia.

Saptono, S., Kramadibrata, S., Sulistianto, B. dan Wattimena, R.K. (2008b): *Perkiraan Potensi Kelongsoran Lereng Lowwall Penambangan Batubara Berdasarkan Hasil Pemantauan Inclinometer, PT. Adaro Indonesia*, Kursus dan Seminar Geoteknik, Nopember 2008, Diesemas ke 50 ITB.

Sulistianto, B. Kramadibrata, S. Saptono, S. Rismayanti and Dwi Satrio Utomo (2010): *Laboratory Study for Determining Long-term Shear Strength of Rock*, International Symposium on Earth Science and Technology (CINEST) Fukuoka, Japan.

Wattimena R.K. Kramadibrata, S and Damanik, B. (2006): *Study on shear creep behaviour and long-term shear strength at laboratory*. Internal Report of the Department of Mining Engineering Institute Technology of Bandung.

Yang, S.Q. and Cheng, L. (2011): *Non-Stationary and Nonlinier Visco-Elastic Shear Creep Model for Shale*, International Journal Rock Mechanics & Mining Sciences, Elsevier.

Zhu ZD, Li ZJ, Zhu ML, Wang Q. (2009): *Shear rheological experiment on rock mass discontinuities and back analysis of model parameters*. Rock Soil Mech 30(1):99–104

