

## Review: Analisis Kestabilan Lereng dengan Metode Analisis Balik Menggunakan Data Perpindahan Terukur

Dwi Yolanda Sumbung<sup>1</sup>, Barlian Dwinagara<sup>2</sup>, S.Koesnaryo<sup>2</sup>, Singgih Saptono<sup>2</sup>, Eddy Winarno<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa Prodi Magister Teknik Pertambangan, UPN "Veteran" Yogyakarta

<sup>2</sup> Pengajar Prodi Magister Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta

Korespondensi : [dwiyolandasumbung@gmail.com](mailto:dwiyolandasumbung@gmail.com)

### ABSTRAK

Monitoring stabilitas lereng merupakan aspek geoteknik yang penting dan menjadi komponen dasar dalam membuat perencanaan yang lebih ekonomis dan aman. Berbagai instrumen monitoring belakangan ini telah diimplementasikan di dunia pertambangan. Interpretasi hasil monitoring lereng berupa data perpindahan terukur digunakan dalam metode analisis balik sebagaimana diusulkan oleh Sakurai, dkk pada tahun 1987 dan tentunya dengan penerapan berbagai metode numerik. Untuk itu makalah ini memberikan gambaran mengenai analisis balik kestabilan lereng menggunakan data perpindahan terukur berdasarkan berbagai penelitian terdahulu.

*Kata Kunci: Analisis Balik, Perpindahan, Monitoring*

### ABSTRACT

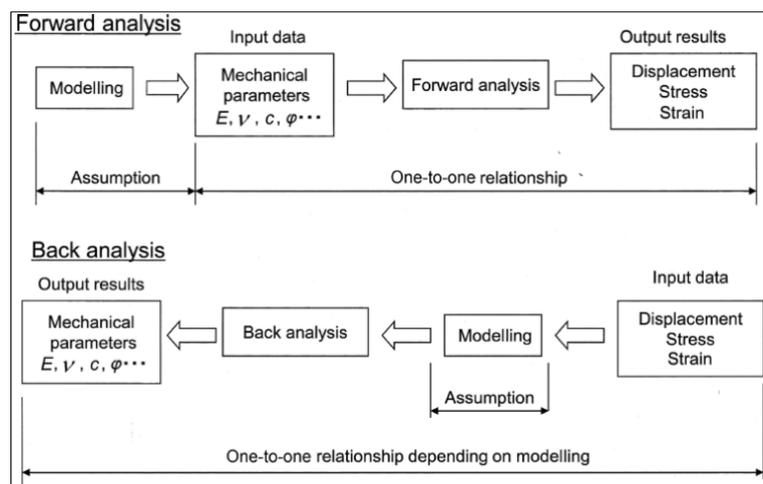
Slope monitoring is an important geotechnical aspect and becomes a basic component for planning the efficient and safety design. Various monitoring instruments have recently been implemented in the mining industry. Interpretation of the slope monitoring results such as measured displacements have been used in the back analysis method that applied by Sakurai, et al in 1987 with the application of numerical methods. For this reason, this paper provide an overview of slope stability back analysis using measured displacement data based on various previous studies.

*Keyword : Back Analysis, Displacement, Monitoring*

## 1. PENDAHULUAN

Kegiatan penambangan yang tidak terlepas dari keberadaan lereng baik itu lereng pada daerah dalam lokasi tambang maupun lokasi-lokasi lainnya seperti jalan tambang atau *stockpile*. Lereng yang tidak stabil dapat berdampak pada faktor keselamatan, ekonomi dan sosial. Oleh karena itu perlu didesain dengan semaksimal mungkin, akan tetapi seiring berjalannya waktu banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan lereng, sehingga properties material yang digunakan untuk desain awal tidak lagi sesuai dengan keadaan aktual. Untuk itu diperlukan suatu analisis yang mempertimbangkan keadaan aktual lapangan.

Sakurai (2017) menguraikan bahwa untuk memvalidasi desain asli dan menilai stabilitas struktur batuan selama kegiatan penambangana berlangsung maka dapat digunakan metode analisis balik, sehingga dapat diperoleh interpretasi data secara kuantitatif dan menghasilkan desain yang semakin mendekati keadaan aktual.



Gambar 1. Perbedaan antara analisis maju dengan analisis balik (Sakurai, 1977a)

Konsep analisis balik tidak sekedar perhitungan terbalik dari analisis ke depan, akan tetapi harus berbeda sedemikian rupa dimana analisis balik mengidentifikasi model mekanis yang diperoleh dari hasil pengukuran lapangan (Sakurai, 2017). Pada analisis balik, data masukan berupa nilai terukur, seperti perpindahan, regangan, tegangan dan tekanan, sedangkan hasil keluaran berupa parameter mekanik massa batuan, seperti modulus Young, poisson's rasio, parameter kekuatan (kohesi dan sudut gesek dalam), permeabilitas, dan bahkan keadaan awal tegangan (Sakurai, 1917).

Data perpindahan yang diperoleh dari hasil pemantauan lereng telah banyak digunakan sebagai validasi dalam melakukan analisis balik, dengan menerapkan metode seperti FEM, teknik PTA bahkan dengan *bantuan jaringan saraf tiruan*. Namun, dalam analisis balik ini nilai terukur harus lebih banyak daripada parameter yang belum diketahui (Sakurai, 1983). Sakurai dan Nakayama (1999) mengusulkan prosedur analisis balik untuk menentukan parameter kekuatan dari perpindahan terukur. Setelah parameter kekuatan ditentukan, faktor keamanan lereng dapat dihitung (Sakurai et al., 2009) dan desain aslinya dapat diverifikasi. Jika faktor keamanan yang dihitung kembali masih cukup besar, maka lereng harus cukup stabil agar konstruksi dapat dilanjutkan. Namun, jika faktor keamanan kurang dari yang diadopsi pada tahap desain, tindakan pendukung tambahan, seperti pengeboran drainase, jangkar tanah dan tiang pancang, harus dipasang untuk menstabilkan lereng. Selain itu, desain langkah-langkah tambahan dimungkinkan dengan menggunakan parameter kekuatan yang ditentukan oleh analisis balik.

## 2. METODE PENELITIAN

Makalah ini dibuat dengan metode tinjauan pustaka yang merupakan kegiatan meringkas secara komprehensif penelitian-penelitian terdahulu baik berupa jurnal internasional, nasional, maupun thesis. Pencarian literatur dengan topik "analisis balik menggunakan data perpindahan terukur" dilakukan melalui situs jurnal online ataupun dengan melihat referensi dalam jurnal terkait.

## 3. HASIL DAN ANALISIS

Tabel 1. Instrumen monitoring dan metode yang digunakan dalam literatur acuan

Reff	Tahun	Instrumen Monitoring								Metode		
		RTS	SSR	InSAR	Inklinometer	Extensometer	GPS	EDM	SL-2	FEM	LEM	
[ 5 ]	2005						√				√	√
[10]	2006					√			√		√	
[ 9 ]	2018	√	√								√	√
[ 1 ]	2020	y									√	
[ 8 ]	2021							√			√	√
[ 3 ]	2022				√	√					√	
[ 2 ]	2022			√	√						√	

Perilaku deformasi lereng umumnya dipantau selama atau setelah penggalian dengan menggunakan berbagai instrument pengukuran perpindahan yang terus mengalami perkembangan seiring dengan waktu. Akan tetapi agar dapat menilai dengan benar mengenai keadaan lereng tersebut apakah aman atau tidak maka hasil pengukuran harus diinterpretasikan dengan baik, untuk itu analisis balik sangat berguna sebagai salah satu cara menginterpretasikan hasil monitoring dengan baik (Sakurai, 2005).

Dalam aplikasinya analisis balik harus cukup sederhana dan untuk model mekanis tidak boleh diasumsikan melainkan ditentukan secara unik oleh analisis balik (Sakurai 1997). Oleh sebab itu metode konvensional tidak memenuhi syarat, untuk itu sakurai (1997) mengusulkan analisis balik berdasarkan *Finite Elemen Method* (FEM). Parameter kerusakan anisotropik dapat ditentukan dengan analisis kembali perpindahan yang diukur dengan GPS. Penggunaan GPS dinilai memiliki keuntungan besar karena dapat diperoleh pengukuran perpindahan secara kontinu untuk sebagian besar area pemantauan dengan akurasi yang tinggi.

Berdasarkan Sakurai (2005) diketahui bahwa ada dua penyebab perpindahan lereng yaitu karena pengurangan tegangan yang disebabkan oleh adanya penggalian dan pada parameter m-anisotropik terjadi pengurangan kekuatan material tanpa penggalian yang mungkin disebabkan oleh pelapukan. Analisis balik yang dilakukan oleh Sakurai (2005) dengan mendasarkan pada hasil monitoring perpindahan menggunakan

GPS diperoleh hasil dimana kekuatan material yaitu kohesi dan sudut gesek dalam dapat diketahui dari pengukuran perpindahan, kemudian *faktor of safety (FoS)* dari lereng dapat dievaluasi dengan menggunakan konvensional *limit equilibrium method (LEM)*.

Mengingat kurangnya uji lapangan dan keadaan aktual dalam penggalian bawah tanah, serta modulus elastisitas ( $E$ ) dan tegangan in-situ horizontal ( $P$ ) terhadap garis sumbu bukaan merupakan parameter paling penting, maka Zhang (2006) mengusulkan metode analisis balik tiga dimensi (3-D). Zhang (2006) menyajikan metode *displacement-based back-analysis (DBBA)* metode analisis balik 3-D yang didasarkan pada perpindahan elastik yang disebabkan oleh penggalian permukaan terowongan dan diukur segera setelah penggalian. Pada penelitiannya perpindahan konvensional diukur dengan *barehole extensometer* dan pengukuran konvergensi tipe SL-2.

Pada penerapan metode DBBA diasumsikan bahwa massa batuan merespon secara homogen, isotropik dan linier elastis, dengan domain yang terlibat dibatasi pada permukaan terowongan dan massa batuan yang berdekatan. Untuk memastikan keaslian solusi analisis balik maka juga diasumsikan bahwa perpindahan  $\delta_i$  berbanding terbalik dengan  $E$  dimana pada massa batuan elastik hanya ada dua parameter mekanik yang independen yaitu modulus elastisitas  $E$  dan Poisson's ratio  $\mu$ . Oleh karena itu jumlah parameter yang diketahui ada dua  $E$  dan  $P$ . maka perpindahan titik pengukuran dapat ditulis dengan persamaan:

$$\delta_i = f_i(E, P) \quad (i=1, 2, \dots, K)$$

Dimana  $K$  adalah jumlah pengukuran perpindahan.

Dengan semakin berkembangnya teknologi maka alat pemantauan lereng pun semakin maju. Sistem automasi dan sistem robotik serta kontrol jarak jauh dikombinasikan dalam suatu instrumen pemantauan lereng berupa *Slope Stability Radar (SSR)* dan *Robotic Total Station (RTS)*. Ahmad Shafiq (2018) melakukan analisis balik berdasarkan hasil pemantauan dari SSR dan RTS pada suatu lereng tambang batubara di Tanjung Enim. Dengan melakukan *trial and error* pada model hingga mendapatkan data SRF dan total perpindahan yang sesuai dengan hasil pengukuran, dari penelitian ini diperoleh nilai yang mendekati dengan hasil analisis balik invers modified Sakurai. Melalui penelitian ini juga diketahui bahwa RTS dan SSR memiliki kecenderungan analisis yang sama dalam memprediksi keadaan menuju longsor, akan tetapi selalu diperlukan pengawasan dan kontrol yang baik terhadap prisma.

Penerapan metode analisis balik yang dikembangkan oleh Sakurai dan Nakayama (1999) dengan mempertimbangkan *anisotropic parameter (m)* Sakurai diterapkan pada penelitian Adika Febriadi, dkk (2020) pada salah satu tambang batubara di Indonesia. Dalam kajiannya digunakan fitur *model plug-in* dalam *software RS2* untuk mengakomodir parameter anisotropik ( $m$ ) ke dalam pemodelan. Dilakukan iterasi parameter anisotropik ( $m$ ) pada tiap lapisan dalam model untuk mendapatkan deformasi lereng pemodelan sesuai dengan rata-rata deformasi aktual hasil pengamatan rekaman instrumen monitoring RTS. Kemudian dari nilai-nilai parameter anisotropik ( $m$ ) dilakukan penentuan nilai kohesi setiap lapisan batuan yang kemudian digunakan untuk perhitungan faktor keamanan dari lereng penelitian.

Y. Shoji (2021) melakukan validasi terhadap metode analisis balik yang diusulkan sakurai pada tahun 1987 untuk memperkirakan faktor keamanan dari perpindahan yang diukur melalui dua studi kasus. Perpindahan terukur menggunakan instrumen *Electronic Distance Meter (EDM)* dan melalui pengukuran survey. Ditemukan bahwa modulus geser cenderung menurun seiring dengan peningkatan perpindahan yang diukur. Dari dua studi kasus tersebut diketahui bahwa pada studi kasus pertama parameter yang diperoleh sesuai dengan hasil uji in situ. Untuk studi kasus kedua terlihat faktor keamanan berhubungan dengan perilaku keruntuhan lereng yang sebenarnya. Oleh karena itu analisis balik dengan menggunakan data perpindahan terukur dapat berguna untuk menilai stabilitas lereng.

Dalam beberapa tahun terakhir, karena kematangan analisis numerik serta semakin meluasnya penggunaan pengukuran deformasi tunnel, maka analisis balik berdasarkan perpindahan terukur semakin populer dan menjadi metode tidak langsung yang efektif dalam estimasi sifat massa batuan. Jiaqi Liu (2022) melakukan analisis balik berbasis perpindahan pada rasio tegangan in-situ dan modulus young pada sebuah terowongan eksplorasi yang merupakan bagian bawah danau Malaren dalam proyek by pass Stockholm. Untuk menghitung deformasi teoritis digunakan metode FEM pada *software Plaxis 2d*. Analisis balik dilakukan dengan menggunakan metode *Pattern Search* dan metode *Simplex*. Dua algoritma optimasi yang digunakan dalam penelitian ini memberikan rasio tegangan in-situ dan modulus Young dengan estimasi yang mendekati deformasi yang diukur. Untuk masalah khusus yang dianalisis dalam penelitian tersebut, ditemukan bahwa metode Simplex lebih cocok daripada metode *Pattern search*. Selain itu dilakukan analisis sensitivitas untuk mempelajari pengaruh titik awal dan bagaimana parameter model numerik lainnya mempengaruhi hasil analisis balik.

Dalam analisis balik menggunakan data perpindahan terukur perlu menggunakan data pemantauan deformasi permukaan dan internal untuk mendapatkan hasil dengan akurasi lebih tinggi. Dalam studi longsor Sheyiping yang terletak di DAS Lancang, Cina Guo, dkk (2022) menggunakan data pemantauan multi-sumber yang membantu dalam menentukan sifat massa batuan dan tanah yang lebih optimal melalui analisis balik

*Review : Analisis Kestabilan lereng dengan Metode Analisis Balik Menggunakan Data Perpindahan Terukur (Dwi Yolanda Sumbung)*

perpindahan terukur. Dengan menggabungkan deformasi internal yang dipantau oleh inklinometer lubang bor dan deformasi permukaan yang diukur dengan teknik InSAR (*Spaceborne Interferometric synthetic aperture radar*), parameter elasto-viskoplastik massa batuan dan tanah ditentukan menggunakan analisis balik perpindahan terukur. Deformasi bergantung waktu dari massa batuan dan tanah dipertimbangkan dalam simulasi elemen hingga untuk memprediksi perkembangan longsor Cheyiping.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan metode analisis balik yang diusulkan oleh Sakurai yaitu dengan menggunakan data perpindahan terukur yang telah diterapkan pada berbagai kondisi dan dengan instrumen monitoring yang beragam sebagaimana dibahas dalam makalah ini, maka dapat disimpulkan bahwa:

- Analisis balik berdasarkan data perpindahan terukur dapat menjadi salah satu metode tidak langsung yang efisien dalam estimasi parameter massa batuan dan dapat diterapkan termasuk pada tambang batubara di Indonesia. Akan tetapi tetap harus memperhatikan berbagai aspek seperti kelengkapan data dan perlunya melakukan kombinasi dengan analisis balik konvensional jika memang terdapat keterbatasan data.
- Dalam penerapan metode analisis balik ini perlu digunakan beberapa model desain dalam analisisnya untuk mengetahui rentang konstanta mekanik analisis balik.

Perbedaan kondisi baik pada keadaan dan litologi lereng maupun instrumen penelitian yang digunakan tentu memberikan pengaruh terhadap akurasi hasil analisis balik berdasarkan data perpindahan terukur ini, oleh sebab itu dalam prakteknya harus tetap dipertimbangkan aspek-spek penunjang dan perlu terus dilakukan studi dengan berbagai keadaan lainnya untuk dapat menemukan penyelesaian akan kendala-kendala yang ada dalam analisis balik ini demi meningkatkan akurasi hasil analisis.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam penyusunan paper ini tidak terlepas dukungan dari berbagai pihak khususnya Kepada Prodi Magister Teknik Pertambangan UPN "Veteran" Yogyakarta.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Febriadi, Adika. Darga, Aloysius. Dkk. (2020). Prosiding TPT XXIX Perhapi 202.
- [2] Guo, Chengqian. Ma, Gang. Dkk. 2022. Displacement Back Analysis of Reservoir Landslide Based on Multi-Source Monitoring Data: A Case Study of the Cheyiping Landslide in the Lancang River Basin. MDPI. 14. 2683
- [3] Liu, Jiaqi. 2022. Back Analysis of Rock Mass Properties in the Regional Fault Zone Under Lake Malaren. KTH Royal Institute of Technology : Swedia
- [4] Sakurai, S. Nakayama, T. A back analysis in assessing the stability of slopes by means of surface measurements, *Proc. International Symposium on Slope Stability Engineering –IS-Shikoku '99*, Vol.1, 1999. pp.339-343.
- [5] Sakurai, S. Shimizu, N. 2005. Monitoring the Stability of Slopes by GPS, The South African Institute of Mining and Metallurgy. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Civil and Mining Engineering. 353-360
- [6] Sakurai, S. 2017 Back Analysis in Rock Engineering *CRC Press (ISRM Book Series vol 4)* Eissn: 2326-778X. London. CRC Press/Balkema
- [7] Shimizu, N. Nakashima, S. and Masunari, T. 2014. ISRM Suggested Method for Monitoring Rock Displacements Using the Global Positioning System (GPS). *Rock Mech. Rock Eng.* 47:313- 328. Doi.org/ 10.1007/s00603-013-0521-5.
- [8] Shoji, Y. dkk., 2021. Monitoring Slope Stability Based on Factor of Safety Estimated by Back Analysis of Measured Displacements, IOP Publishing, Earth and Environmental Science. doi:10.1088/1755-1315/833/1/012144
- [9] Yudiansyah, Syafiq Ahmad. 2018. Studi Kestabilan Lereng Lowwall Pit Tambang Air Laya Barat Dengan Metode Analisis Balik Menggunakan Data Displacement Slope Stability Radar dan Robotic Total Station. ITB: Bandung.
- [10] Zhang. L.Q., Yue. Z.Q., Yang. Z.F., Qi. J.X., Liu. F.C., 2005, A Displacement-based Back-analysis Method for Rock Mass Modulus and Horizontal In Situ Stress in Tunneling- Illustrated with Case Study, Elsevier, Tunnelling and Underground Space Technology 21 (2006) 636-649.