

Identifikasi Bidang Gelincir Pemicu Bencana Tanah Longsor Dengan Metode Resistivitas 2 Dimensi Di Desa Pablengan Kecamatan Matesih Kabupaten Karanganyar

Darsono, Bambang Nurlaksito, Budi Legowo

Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Sebelas Maret Surakarta

Email : pdadar2005@yahoo.com

Received 13-03-2012, Revised 29-03-2012, Accepted 06-04-2012, Published 30-04-2012

ABSTRACT

Investigation of landslide slip surface has been conducted at Salaman Sub village, Pablengan Village, Matesih District, Karanganyar Regency, Central Java Province by using dipole-dipole array geoelectrical resistivity method. Data processing were using Res2Dinv version 3.45 (semi demo version) software. The interpretation result showed that at the research area was found lithology consist i.e. clay, wet clay, sandy clay until claysand, sand until breccia. The slip surface is a wet clay layer with resistivity value range from 19.3 Ω m to 36.6 Ω m, for one section was found with depth of 1.7 meter until 17 meters, and for two section was found with depth of 8.9 until 16.4 meters.

Keywords: resistivity geoelectrical, landslide, slip surface, pablengan village

ABSTRAK

Investigasi bidang gelincir tanah longsor telah dilakukan di Dusun Salamann Desa Pablengan, Kecamatan Matesih, Kabupaten Karanganyar, Propinsi Jawa Tengah, dengan menggunakan metode geolistrik resistivitas konfigurasi dipole-dipole. Pengolahan data menggunakan software Res2Dinv versi 3.45 (versi semi demo). Hasil interpretasi menunjukkan bahwa di lokasi penelitian terdeteksi litologi terdiri antara lain lempung, lempung basah, lempung pasir sampai pasir lempungan, pasir sampai breksi. Bidang gelincir berupa lapisan lempung basah dengan nilai resistivitas antara 19,3 Ω sampai 36,6 Ω m, untuk penampang 1 ditemukan pada kedalaman 1,7 m sampai 17 m, dan untuk penampang kedua ditemukan pada kedalaman 8,9 m sampai 16,4 m.

Kata kunci : geolistrik resistivitas, tanah longsor, bidang gelincir, Desa Pablengan

PENDAHULUAN

Bencana tanah longsor sering dikaitkan dengan datangnya musim penghujan. Bencana tanah longsor (*landslides*) menjadi masalah yang umum pada daerah yang mempunyai kemiringan yang curam. Pada tahun lalu maupun di saat musim penghujan sekarang ini, banyak terjadi bencana tanah longsor di wilayah Indonesia seperti di daerah Cilacap, Purworejo, Kulonprogo, Jawa Tengah, Jawa Barat, Jawa Timur, Kalimantan Timur, Sumatera dan lokasi lainnya di tanah air. Peristiwa tanah longsor adalah sebagai gerakan massa tanah, atau dapat didefinisikan perpindahan material pembentuk lereng, dapat berupa batuan asli, tanah pelapukan, bahan timbunan atau kombinasi dari material – material tersebut yang bergerak ke arah bawah dan keluar lereng^[1]. Gerakan massa

tanah atau batuan atau kombinasinya, sering terjadi pada lereng-lereng alam atau buatan, dan sebenarnya merupakan fenomena alam, dimana alam mencari keseimbangan baru akibat adanya gangguan atau faktor yang mempengaruhinya dan menyebabkan terjadinya pengurangan kuat geser serta peningkatan tegangan geser tanah^[2].

Meskipun tanah longsor merupakan fenomena alam, beberapa aktifitas manusia bisa menjadi faktor pemicu terjadinya bencana tanah longsor, dimana ketika aktifitas ini beresonansi dengan kerentanan dan kondisi alam yang telah disebutkan contoh aktifitas manusia yang dapat memicu terjadinya tanah longsor adalah penebangan pepohonan secara serampangan di daerah lereng; penambangan bebatuan, tanah atau barang tambang lain yang menimbulkan ketidakstabilan lereng, tingkat kebasahan tanah dan bebatuan (juga daya ikatnya), pengubahan kemiringan kawasan (seperti pada pembangunan jalan, rel kereta atau bangunan), dan pembebanan berlebihan dari bangunan di kawasan perbukitan.. Gerakan tanah sering disebut sebagai longsoran dari massa tanah atau batuan dari tempat asalnya karena pengaruh gaya berat. Faktor internal yang dapat menyebabkan terjadi gerakan tanah adalah daya ikat tanah atau batuan yang lemah sehingga butiran tanah dan batuan dapat terlepas dari ikatannya. Pergerakan butiran ini dapat menyeret butiran lainnya yang ada disekitar sehingga membentuk massa yang lebih besar. Sedangkan faktor eksternal yang dapat mempercepat dan memicu terjadinya gerakan tanah diantaranya sudut kemiringan lereng, curah hujan, perubahan kelembaban tanah, dan tutupan lahan^[3].

Di Jawa Tengah, salah satu wilayah yang sering terjadi bencana tanah longsor di kabupaten Karanganyar, karena secara morfologi wilayah ini merupakan lereng dari Gunung Lawu, kondisi wilayahnya berbukit-bukit dengan kemiringan ada yang lebih dari 30°. Seperti Dusun Salaman, Desa Pablengan, Kecamatan Matesih, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah merupakan zona kerentanan gerakan tanah, di daerah beberapa kali terjadi bencana tanah longsor. Untuk itu perlu kesiagaan masyarakat agar bila terjadi bencana tidak banyak korban.

Salah satu faktor penyebab longsoran yang sangat berpengaruh adalah bidang gelincir (*slip surface*) atau bidang geser (*shear surface*). Pada umumnya tanah/bidang yang mengalami longsoran akan bergerak di atas bidang gelincir tersebut. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi bidang gelincir adalah metode geofisika resistivitas. Metode ini bersifat tidak merusak lingkungan, biaya relatif murah dan mampu mendeteksi perlapisan tanah sampai kedalaman beberapa meter di bawah permukaan tanah. Metode ini banyak digunakan dalam penyelidikan masalah lingkungan maupun masalah eksplorasi mineral dalam tanah^[14]. Oleh karena itu metode ini dapat dimanfaatkan untuk survey daerah rawan longsor, khususnya untuk menentukan ketebalan lapisan yang berpotensi longsor, kedalaman bidang gelincir serta litologi perlapisan batuan bawah permukaan.

Aplikasi metode geofisika resistivitas telah banyak digunakan seperti pencarian sumber panas bumi^[5], survei air tanah^{[6][7][8]} dan juga telah dilakukan survei gerakan tanah atau tanah longsor dengan konfigurasi Wenner^{[9][10]} dengan Schlumberger^{[11][12]} dengan Wenner Schlumberger^{[13][14]}.

Metode resistivitas merupakan salah satu metode geofisika, dimana metode ini dapat digunakan untuk menduga kondisi hidrogeologi bawah permukaan seperti untuk

mendeteksi jenis batuan dan kondisi keairan batuan berdasarkan sifat kelistrikan batuan yang berupa nilai tahanan jenisnya. Prinsip kerja dari metode geofisika resistivitas adalah arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui dua elektroda arus. Beda potensial yang terjadi diukur melalui dua elektroda potensial. Dari hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda tertentu, dapat dihitung nilai tahanan jenis semu^[15]. Untuk jelasnya penjabaran rumus pada^[16]

$$\rho_a = K \frac{\Delta \vec{V}}{I}$$

ρ_a = hambatan jenis semu,

K = faktor geometri,

$\Delta \vec{V}$ = beda potensial,

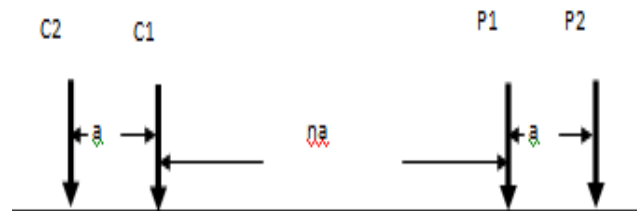
I = arus yang diinjeksikan.

Faktor geometri (K) itu tergantung dari konfigurasi/susunan bentangan elektroda yang dipakai dalam pengukuran. Pada penelitian konfigurasi yang dipakai adalah konfigurasi Dipole-Dipole, susunan elektrodanya seperti gambar 1. Dengan faktor geometri untuk konfigurasi Dipole-dipole adalah:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{a+na} - \frac{1}{na} - \frac{1}{2a+na} + \frac{1}{a+na} \right)^{-1}$$

$$K = \pi a n \left[\frac{1}{a+na} + \frac{1}{na} + \frac{1}{2a+na} + \frac{1}{a+na} \right]$$

dimana a adalah jarak antara elektroda C_2 ke C_1 dan jarak elektroda P_1 ke P_2 , sedangkan n adalah jarak antara elektroda C_1 ke P_1 , dengan $n = 1,2,3,4,5,6$,



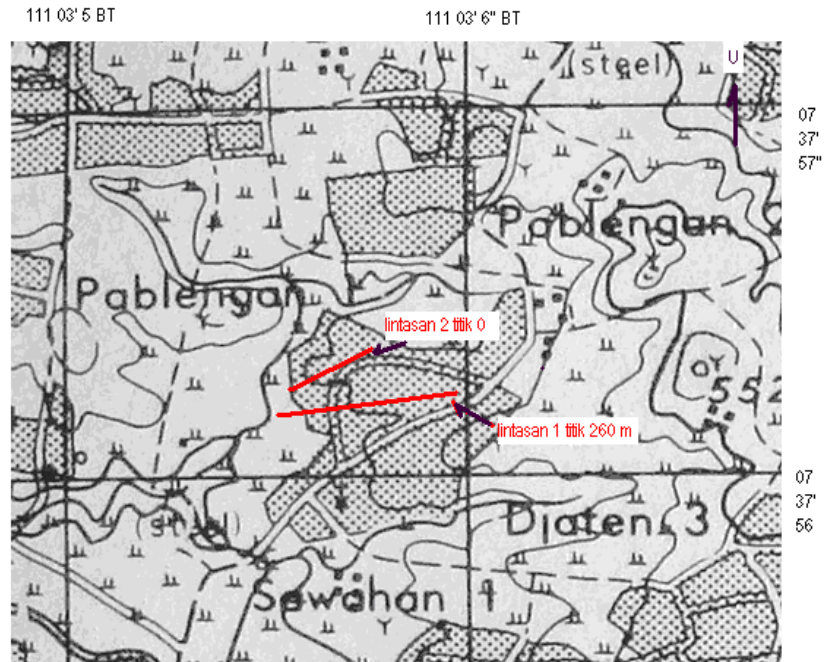
Gambar 1. Letak posisi elektroda konfigurasi Dipole-Dipole

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

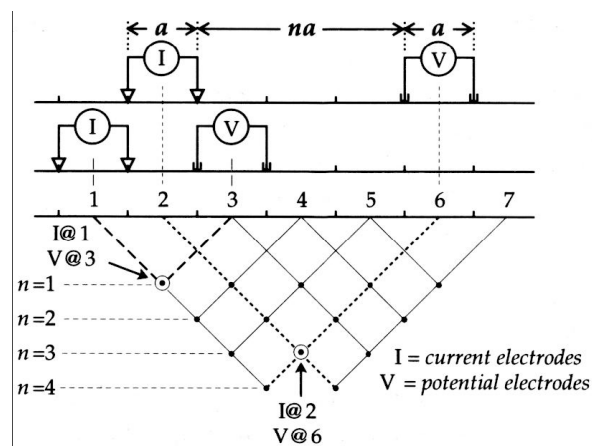
Penelitian dilaksanakan Dusun Salaman, Desa Pablengan, Kecamatan Matesih, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah. Peralatan yang digunakan adalah Resistivimeter OYO Model 2119C McOHM-EL beserta perlengkapan, dan GPS untuk mengetahui posisi lintang dan bujurnya. Pengukuran dilakukan 2 lintasan, dengan lintasan pengukuran pertama mempunyai panjang lintasan 260 meter lokasi berada pada S 07°37.868' E 111°03.431' dengan arah lintasan Barat -Timur, sedangkan panjang lintasan pengukuran adalah 100 meter lokasi berada pada S 07°37.783' E 111°03.517', dengan arah lintasan Timur Laut - Barat Daya. Lokasi dan lintasan

pengambilan data, seperti gambar 2., kondisi topografi dan morfologinya diterangkan pada pembahasan.



Gambar 2. Lokasi dan lintasan pengambilan data.

Susunan elektroda/konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi dipole-dipole, dengan jarak spasi a adalah 10 meter, jarak a ini sama antara jarak elektroda arus (C_2C_1) dan jarak antara elektroda potensial (P_1P_2) sebesar 10 meter. Sedangkan $n=1$ sampai maksimal $n=6$. Pada awal pengukuran, C_2 diletakkan pada titik awal lintasan (titik nol), titik C_1 berada pada 10 meter, titik P_1 berada pada 20 meter, dan P_2 berada pada 30 meter. Susunan ini dilakukan untuk memperoleh data pada $n=1$, kemudian susunan ini dirubah untuk mendapatkan $n=2, n=3$, sampai maksimal $n=6$. Setelah data $n=6$ selesai, C_2 digeser pada 10 meter dari titik sebelumnya untuk mendapatkan data dari $n=1$ sampai $n=6$. setelah mencapai $n=6$, C_2 terus digeser sejauh 10 meter dari titik sebelumnya sepanjang lintasan, kemudian dilakukan pengukuran lagi.



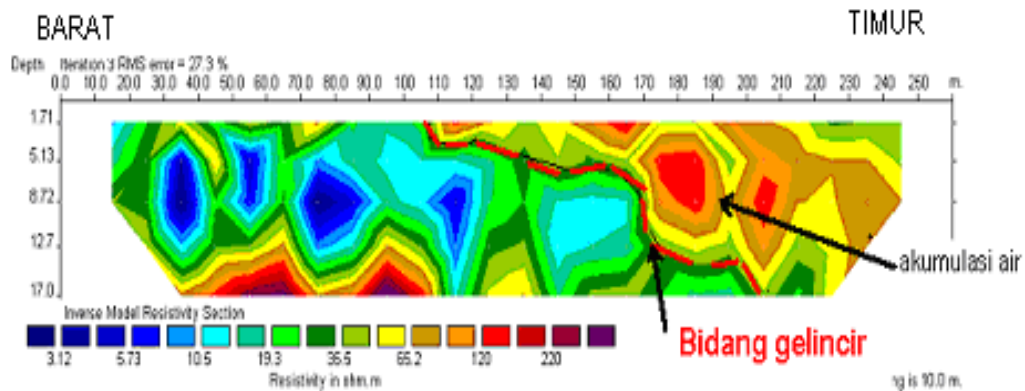
Gambar 3. Kontruksi *pseudosection* dari data konfigurasi Dipole-Dipole.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data dilakukan dengan *software RES2DINV versi 3,54 (semi demo version)* [17] dengan maksimum iterasi 3 kali, hasilnya adalah pemodelan 2-D berupa penampang resistivitas semu atau *pseudosection*. Metode inversi yang digunakan adalah metode inversi dengan sistem kuadrat terkecil.

Lintasan 1/Penampang 1

Hasil pengolahan untuk lintasan pertama, dimana lintasan pertama terletak di bekas longoran yang terjadi tahun 2007. Panjang lintasan pertama sejauh 260 meter, arah lintasan Barat- Timur, dimana bagian barat lebih rendah dari bagian Timur. Pada titik 0 sampai 60 meter berupa bidang datar dengan ketinggian 457 meter dpl, di sebagian lintasan ini digenangi air dari arah lereng yang mempunyai mata air dangkal. Mata air ini terlihat pada lintasan 100 meter dari titik nol. Untuk lintasan 70 meter sampai 110 meter mempunyai kemiringan sekitar 10 derajat, dan untuk lereng pada jarak 110 yang mempunyai ketinggian 463 meter dpl sampai 260 yang mempunyai ketinggian 521 meter dpl, mempunyai kemiringan lereng terjal lebih dari 20 derajat. Cuaca pada saat pengambilan data mendung dan terjadi hujan deras pada sore hari, sehingga pada lintasan 0 sampai 60 meter tergenang air.. Tidak ada vegetasi di sepanjang lintasan, titik 70 meter sampai 260 meter adalah bekas longoran lama yang terjadi pada desember tahun 2007.




















Gambar 5. Penampang *pseudosection* lintasan 1

Hasil pengolahan pada lintasan 1 dari citra warna yang terlihat pada penampang *pseudosection* dapat dikelompokkan nilai tahanan jenis dan jenis batuan seperti tabel 1, sedangkan kedalaman *pseudosection* lintasan pertama yang diperoleh mencapai 17 meter. Gambar 5, menunjukkan bahwa bidang gelincir terdeteksi dengan kedalaman dari permukaan bervariasi dari 1,7 meter – 17 meter dengan nilai tahanan jenis $19,3 \Omega \text{ m} - 35,5 \Omega \text{ m}$ yang berupa lapisan lempung basah, hal ini terbukti dengan adanya air yang keluar ke permukaan pada titik 100, dimana titik 100 tersebut merupakan pengaruh adanya lapisan pasir lempungan tersebut yang berperan sebagai jalur resapan air sedangkan lapisan lempung terdeteksi dengan variasi tahanan jenis $2,68 \Omega \text{ m} - 19,2 \Omega \text{ m}$. Pada bagian atas bidang gelincir terdeteksi diduga lapisan batuan lapuk/berupa lempung pasir sampai pasir lempungan yang dapat menyimpan kandungan air, dengan variasi tahanan jenis $35,5 \Omega \text{ m} - 170 \Omega \text{ m}$ dengan ketebalan lapisan ± 10 meter. Jika hujan/curah hujan yang tinggi, kemungkinan air akan terakumulasi di lapisan

tersebut, bila hal itu terjadi akan sangat berbahaya karena secara gravitasi akan memperberat gaya ke bawah yang sewaktu-waktu dapat memicu adanya tanah longsor lagi. Kalau dilihat pola bidang gelincir yang berbentuk lengkung gerakan longsor termasuk jenis longsor rotasi.

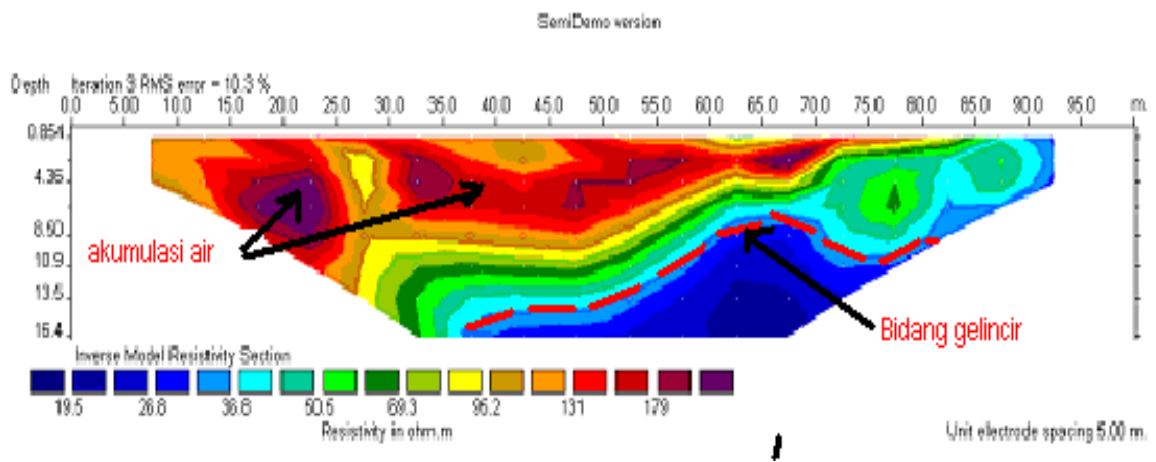
Tabel 1. Citra warna dan jenis lapisan

No	Warna	Resistivitas (Ohm meter)	Jenis tanah/ batuan
1		2,68 – 3,12	Lempung
2		3,12 – 4,43	Lempung
3		4,43 – 5,73	Lempung
4		5,73 – 8,12	Lempung
5		8,12 – 10,5	Lempung
6		10,5 – 14,9	Lempung
7		14,9 – 19,3	Lempung
8		19,3 – 27,1	Lempung basah
9		27,1 – 35,5	Lempung basah
10		35,5 – 50,3	Tanah lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
11		50,3 – 65,2	Tanah lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
12		65,2 – 92,6	Tanah lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
13		92,6 – 120	Tanah lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
14		120 – 170	Tanah lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
15		170 – 220	Pasir sampai breksi
16		220 – 245,2	Pasir sampai breksi
17		245,2 – 470,4	Pasir sampai breksi

Lintasan 2/Penampang 2

Panjang lintasan pengukuran adalah 100 meter. Lintasan 0 sampai 100 meter mempunyai kemiringan lebih dari 30 derajat. Titik 0 pada *pseudosection* adalah daerah paling tinggi dengan ketinggian 519 meter dpl, pada titik 100 merupakan titik yang







lebih rendah dengan ketinggian 467 meter dpl, dengan arah lintasan Timur laut – Barat Daya. Hasil pengolahan data seperti terlihat pada gambar 6, dari citra warna yang terlihat pada penampang *pseudosection* dapat dikelompok nilai tahanan jenis dan jenis batuan seperti tabel 2. Gambar 6 menunjukkan bahwa bidang gelincir tanah longsor terdeteksi dengan ketebalan kurang lebih 2 meter dengan nilai tahanan jenis 23,1 Ω m -36,8 Ω m dan berada pada kedalaman mulai 8, 9 meter sampai 16,4 meter sepanjang lintasan 2. sedangkan material yang diduga material lapuk terdeteksi pada kedalaman lapisan mulai 1 meter – 13,5 meter dengan nilai tahanan jenis antara 36,8 sampai 131 Ω m, sedangkan terdeteksi juga material pasir sampai breksi yang terdeteksi dengan nilai tahanan jenis antara 131 Ω m sampai 266,5 Ω m,. Material ini dapat menyimpan kandungan air sehingga jika air hujan melalui retakan akan terakumulasi pada lapisan ini, sehingga akan menambah beban pada gaya penahan, ini akan berbahaya jika curah hujan tinggi dan akan masuk kedalam batuan akuifer tersebut sehingga membebani lereng yang akan memicu terjadinya tanah longsor. Type longoran yang terjadi termasuk dalam jenis longoran translasi



Gambar 6. Penampang *Pseudosection* lintasan 2

Tabel 2. Hubungan citra warna dengan jenis batuan

No	Warna	Resistivitas (Ohm meter)	Jenis tanah/ batuan
1		18,0 – 19,5	Lempung
2		19,5 – 23,1	Lempung
3		23,1 – 26,8	Lempung basah
4		26,8 – 31,8	Lempung basah
5		31,8 – 36,8	Lempung basah
6		36,8 – 43,6	Material lapuk/lempung pasir sampai pasir lempungan
7		43,6 – 50,5	Material lapuk/lempung

			pasiran sampai pasir lempungan
8		50,5 – 59,9	Material lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
9		59,9 – 69,3	Material lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
10		69,3 – 82,2	Material lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
11		82,2 – 95,2	Material lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
12		95,2 – 113,1	Material lapuk/lempung pasiran sampai pasir lempungan
13		113,1 – 131	Batuan akuifer/Pasir sampai breksi
14		131 – 155	Batuan akuifer/Pasir sampai breksi
15		155 – 179	Batuan akuifer/Pasir sampai breksi
16		179 – 222,7	Batuan akuifer/Pasir sampai breksi
17		222,7 – 266,5	Batuan akuifer/Pasir sampai breksi

SIMPULAN SARAN

Dari hasil yang diperoleh untuk 2 lintasan terdeteksi litologi batuan berupa lempung, lempung basah, batuan lempung pasiran sampai pasir lempungan, dan batuan pasir sampai breksi. Bidang gelincir pada kedua lintasan berupa batuan lempung basah dengan nilai tahanan jenis antara $19,3 \Omega \text{ m}$ – $36,6 \Omega \text{ m}$, pada lintasan pertama terdeteksi pada kedalaman antara $1,7 \text{ m}$ – 17 meter , sedangkan lintasan 2 terdeteksi pada kedalaman $8,9 \text{ meter}$ sampai $16,4 \text{ meter}$. Sedangkan batuan yang terdeteksi sebagai lapisan batuan yang diduga menyimpan kandungan air atau material akan longsor berupa batuan lempung pasir sampai pasir lempungan dan batuan pasir sampai breksi, yang letaknya diatas bidang gelincir, dimana batuan ini yang berpotensi memicu terjadi tanah longsor.

Untuk mengetahui kondisi sebenarnya maka dapat dilakukan pengeboran dangkal, selain mengetahui jenis dan ketebalan lapisan, juga dapat diperoleh sampel batuan, selanjutnya sampel batuan perlu dilakukan pengujian sifat fisik dan mekaniknya, agar dapat memodelkan gerakan tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Varnes, D.J. 1978. "Slope Movement and Type and Processes, *Landslide Analysis and control.*" *Transportation Research Board*, special Report 176, Washington D.C. : National Research Council.
- 2 Karnawati,D., 2003, *The New Approach for Landslide Susceptibility Mapping In Indonesia*, Proseeding PIT XXXII Ikatan Ahli Geologi Indonesia & PIT Himpunan Ahli Geofisika Indonesia XXVII, Jakarta.
- 3 Djauhari Noor, 2006, *Geologi Lingkungan*, Graha Ilmu, Yogyakarta
- 4 Reynold J.M,1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Ltd., New York.
- 5 Suharno, dan S.Sudarman, 2000, *Analisis Hasil Studi Geofisika dan Geologi Area Panas Bumi Ulubelu Dalam Rangka Penafsiran Permeabilitas Reservoir*, Proceeding Pertemuan Ilmiah Tahunan HAGI XXV, Bandung. Hal. 58-62.
- 6 Abdullah dan Jamidun., 2002, Survey Potensi Air Tanah Wilayah Gunung Bale Kabupaten Donggala, *Jurnal Fisika. Gravitasi*. UNTAD. Vol.1, No. 1. Hal.7-16.
- 7 Darsono, 2007, *Penentuan Batuan Akuifer Air Tanah di Daerah Sulit Air Dengan Menggunakan Metode Geolistrik*, Jurnal Fisika FLUX, Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat, p.15-20.
- 8 Lashkaripour, G. R., 2007, *An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity Method: A case study in Korin Aquifer, southeast Iran*, Jurnal Of Spatial Hydrology
- 9 Jochymczyk, K. Jolanta Pierwoła dan Grzegorz Staporek, 2006, *Application of Resistivity Imaging to the Recognition of Landslides in the Flysch Carpathians*, *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.* Diperoleh dari http://agp.igf.edu.pl/files/M-29/Jochymczyk_et_al.pdf
- 10 Priyantari , N., dan Cahyo Wahyono, 2005, *Penentuan Bidang Gelincir Tanah Longsor Berdasarkan Sifat Kelistrikan Bumi*, Jurnal Ilmu Dasar, 6(2). 137-141.
- 11 Ghayoumian, J. Z. Shoaie, S. R. E. Jomeh, E. Gohari, dan M. S. Jafari, 2006, Engineering geological investigation of Akha landslide, Iran. *The Geological Society of London 2006*, 249. 1-9
- 12 Rasimeng, S., 2006, *Interpretasi Lapisan Batuan Potensi Longsor Berdasarkan Data Resistivitas Konfigurasi Schlumberger Di Daerah Sumberjaya Lampung*, Prosiding Seminar Hasil-Hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, 1, 52-60.
- 13 Saemundsson, Th., H.G. Petursson, C. Kneisel, dan A. Beylich, 2005, *Monitoring Of The Tjarnardalir Landslide, In Central North Iceland.*, Natural Research Centre of North-western Iceland, diperoleh dari [http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/MonitoringTjarnardalirLandslide/\\$file/Innri%20ger%C3%B0%20berkhlaupsins%20%C3%AD%20Tjarnard%C3%B6lum%20-%20r%C3%A1%C3%B0stefnugrein.pdf](http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/MonitoringTjarnardalirLandslide/$file/Innri%20ger%C3%B0%20berkhlaupsins%20%C3%AD%20Tjarnard%C3%B6lum%20-%20r%C3%A1%C3%B0stefnugrein.pdf)
- 14 Surono, 2002, Variasi Tahanan Jenis 2-D Pada Daerah Bencana Gerakan Tanah Di Megamendung Dan Cipatat, *Jurnal Geofisika*, edisi 2002 (1), 35-42.

- 15 Hendrajaya lilik , Arif Idam, 1990, *Geolistrik Tahanan Jenis*, Lab. Fisika Bumi Jurusan Fisika, FMIPA ITB.
- 16 Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A. 1990. “*Applied Geophysics, 2nd Edition*”. Cambridge University Press, Cambridge: London, New York, Melbourne.
- 17 Loke, M. H. 2000. *Electrical Imaging Survey for Environmental and Engineering Studies: A Practical Guide to 2D and 3D Surveys*. www. geoelectrical.com.
- 18 Loke, M.H., 2001, *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys*, Malaysia: Penang.
- 19 Lowrie, W. (1997). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press.