

PEMODELAN STABILITAS LERENG REGIONAL BERDASARKAN KONDISI GEOHIDROLOGI (STUDI KASUS LONGSOR PANGKALAN-SUMATERA BARAT)

Rokhmat Hidayat¹, Gayuh Aji Prasetyaningtiyas²

^{1,2}Balai Litbang SABO, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jalan Sopalana, Maguwoharjo, Sleman, D.I. Yogyakarta
*rokhmathidayat33@gmail.com, perpusgyh@gmail.com

Abstraksi

Longsor di Pangkalan, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatera Barat yang terjadi pada 3 Maret 2017 mengakibatkan tertutupnya badan jalan nasional. Tercatat ada 7 titik longsor di jalan nasional yang menghubungkan Sumatera Barat-Riau. Longsor tersebut mengakibatkan kerusakan jalan, instalasi listrik PLN rusak, serta 6 orang korban meninggal dunia. Air hujan yang meresap ke dalam tanah menurunkan kuat geser tanah dan meningkatkan gaya gravitasi tanah. Dilakukan pemodelan untuk mengetahui pengaruh kenaikan muka air tanah akibat filtrasi hujan terhadap stabilitas lereng dengan tebal zona pelapukan rata-rata 5 meter. Hasil pemodelan memperlihatkan bahwa kondisi kestabilan lereng mempunyai angka aman 1,310 pada saat kondisi muka air tanah (m.a.t.) 5m, atau kondisi normal. Hasil pemodelan memperlihatkan bahwa kondisi kestabilan lereng akan menurun menjadi 1,228; 1,193; 1,133 pada kenaikan muka air tanah masing-masing 1m, 2m, dan 3m.

Kata kunci: *longsor, stabilitas lereng, muka air tanah*

PENDAHULUAN

Longsor di Pangkalan, Kabupaten Lima Puluh Kota, Propinsi Sumatera Barat yang terjadi pada 3 Maret 2017 mengakibatkan tertutupnya badan jalan nasional. Tercatat ada 7 titik longsor di jalan nasional yang menghubungkan Sumatera Barat-Riau. Longsor tersebut mengakibatkan kerusakan jalan, instalasi listrik PLN rusak, serta 6 orang korban meninggal dunia. Gambar 1 menunjukkan kondisi longsor Pangkalan setelah hujan deras di lokasi tersebut.

Longsor terjadi saat hujan deras, sehingga ada indikasi bahwa hujan deras merupakan pemicu longsor. Pada bekas longsor terdapat genangan air yang menunjukkan adanya muka air tanah temporal akibat rembesan air hujan. Muka air tanah temporal akan muncul dan menyebabkan kenaikan muka air tanah didalam lapisan tanah, kenaikan tanah tersebut dapat meningkatkan tekanan air dan massa pada tanah. Hal tersebut mengakibatkan penurunan tegangan geser pada tanah. Fenomena tersebut menunjukkan perlunya analisis mengenai pengaruh kenaikan muka air tanah akibat infiltrasi hujan terhadap perubahan stabilitas lereng.

Di sisi lain, kondisi geologi suatu wilayah berpengaruh juga pada pergerakan lereng tebing jalan, sebagai contoh adanya sesar pada lapisan batuan dapat pula memicu pergerakan tanah. Wilayah Indonesia merupakan daerah yang memiliki potensi bencana geologi gerakan tanah yang tinggi setiap tahunnya seperti sudah diketahui bahwa Indonesia masuk dalam wilayah *ring of fire* dimana hal tersebut dapat mempengaruhi lapisan batuan melalui aktivitas vulkanik dan tektonik.

Tulisan ini bertujuan untuk mengkaji kestabilan lereng berdasarkan dua aspek, yaitu aspek geoteknik dan geologi. Aspek geoteknik melingkupi kondisi tanah, topografi lereng dan muka air tanah. Sedangkan aspek geologi terdiri atas kondisi morfologi tanah. Kedua aspek tersebut akan dianalisis dalam analisis secara regional wilayah sehingga dapat diketahui seberapa luas wilayah yang terpengaruh oleh infiltrasi hujan tersebut.

LANDASAN TEORI**Infiltrasi Hujan**

Air hujan yang terinfiltrasi kedalam tanah mengisi pori pori tanah dan meningkatkan kejenuhan air serta massa tanah. Infiltrasi hujan didalam tanah dapat dibagi menjadi dua tahap yaitu infiltrasi hujan dengan aliran tetap dan infiltrasi hujan dengan aliran tidak tetap. Pada kenyataannya kedua aliran tersebut berlaku pada infiltrasi hujan pada tanah jenuh sebagian. Aliran tidak tetap terjadi ketika infiltrasi dipengaruhi faktor waktu (Persamaan 1). Variabel yang digunakan untuk menyelesaikan Persamaan 1, didapatkan menggunakan Persamaan 2, 3, 5, 6, dan Persamaan 7 (Baum, 2008). Ketika hujan memiliki periode waktu, maka dalam periode tersebut muka air tanah (Z, t) akan meningkat sesuai dengan kapasitas ruang dalam butiran tanah serta tingkat permeabilitas tanah tersebut.

Sedangkan pada kondisi jenuh, aliran air pada tanah cenderung tetap karena kapasitas ruang dalam tanah telah terisi dengan air. Meskipun begitu, nilai perubahan ketinggian muka air tanah tetap dipengaruhi oleh koefisien permeabilitas jenuh tanah seperti pada Persamaan 5.

$$\psi(Z, t) = (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_S} H(t - t_n) (D_1(t - t_n))^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\operatorname{ierfc} \left(\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2(D_1(t - t_n))^{\frac{1}{2}}} \right) + \operatorname{ierfc} \left(\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2(D_1(t - t_n))^{\frac{1}{2}}} \right) \right) \quad (1)$$

$$- 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_S} H(t - t_{n+1}) (D_1(t - t_{n+1}))^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\operatorname{ierfc} \left(\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2(D_1(t - t_{n+1}))^{\frac{1}{2}}} \right) + \operatorname{ierfc} \left(\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2(D_1(t - t_{n+1}))^{\frac{1}{2}}} \right) \right)$$

$$D_1 = D_0 / \cos^2 \delta \quad (2)$$

$$D_0 = K_S / S_S \quad (3)$$

$$\psi(Z, t) = (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_S} \left(H(t - t_n) (D_1(t - t_n))^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left(\frac{Z}{2(D_1(t - t_n))^{\frac{1}{2}}} \right) \right) \quad (4)$$

$$- 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_S} \left(H(t - t_{n+1}) (D_1(t - t_{n+1}))^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left(\frac{Z}{2(D_1(t - t_{n+1}))^{\frac{1}{2}}} \right) \right)$$

$$\operatorname{ierfc}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2) - \eta \operatorname{erfc}(\eta) \quad (5)$$

$$Z = z / \cos \delta \quad (6)$$

$$\beta = \cos^2 \delta - (I_{ZLT} / K_S) \quad (7)$$

Keterangan:

- d = kedalaman aliran *steady state* (m);
- D_0 = difusivitas jenuh (m/s)
- d_{LZ} = kedalaman tanah permeabel (m);
- I_{ZLT} = aliran tetap permukaan pada $t=0$ (m/s);
- K_S = koefisien permeabilitas jenuh (m/s);
- n^{th} = interval waktu infiltrasi
- S_S = kapasitas spesifik;

- t = waktu (s);
 δ = sudut kemiringan lereng ($^{\circ}$);
 ψ = tekanan permukaan (m);
 z = ketinggian aliran (m);
 Z = kedalaman aliran vertikal (m).



Gambar 1. Kondisi longsor pangkalan, Sumatera Barat (situsriau.com)

Tanah dan Stabilitas Lereng

Stabilitas lereng erat kaitannya dengan longsor atau gerakan tanah yang merupakan proses perpindahan massa tanah secara alami dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah (KorachdanSarajar, 2014). Longsor umumnya terjadi jika tanah sudah tidak mampu menahan berat lapisan tanah di atasnya karena ada penambahan beban pada permukaan lereng dan berkurangnya daya ikat antara butiran tanah relief. Menurut Hardiyatmo (2012), faktor penyebab longsor dapat disebabkan oleh faktor yang berasal dari dalam seperti jenis batuan dan lereng, serta faktor dari luar seperti hujan.

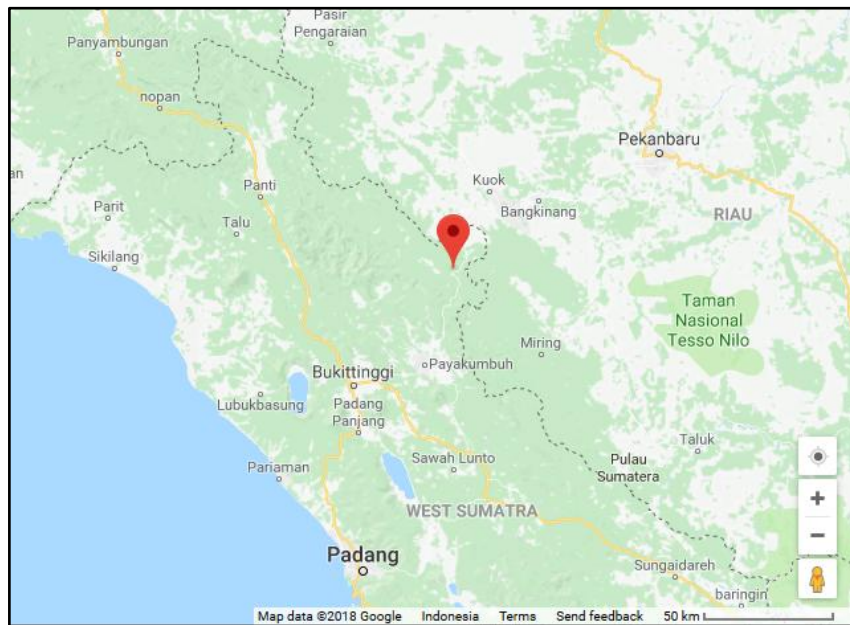
Karakteristik tanah sangat dipengaruhi oleh kadar air yang ada di dalam tanah. Selain perubahan volume, karakteristik-karakteristik lain seperti kekuatan, plastisitas, dan konduktivitas hidrolis berubah drastis sesuai dengan perubahan yang terjadi pada kadar air tanah. Air tinggal di dalam rongga-rongga tanah, karena itu perubahan pada kadar air tanah dapat terjadi dari perubahan proporsi air dan udara di dalam rongga tanah. Air yang tinggal di dalam tanah, bertahan dari gaya gravitasi dan penguapan. Penyimpanan air ini, disebabkan oleh gaya kapiler yang timbul dari tegangan permukaan pada tempat pertemuan udara dan air di dalam rongga tanah, atau oleh gaya-gaya permukaan yang mengikat molekul-molekul air. Pengaruh air dalam perhitungan angka aman diwakili oleh ketebalan bidang basah (Z, t) yang terlihat pada Persamaan 8.

$$FS(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t) \gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta} \quad (8)$$

$FS(Z,t)$	= Angka aman berdasarkan fungsi waktu	
ϕ'	= sudut gesek efektif	($^{\circ}$)
δ	= sudutkemiringan lereng	($^{\circ}$);
$\psi(Z,t)$	= tekananpermukaan	(m);
c'	= kohesi efektif	(N/m^2).

Analisis stabilitas lereng dapat dilakukan menggunakan beberapa metode, beberapa diantaranya adalah metode keseimbangan batas melalui program SLOPE/W dan metode data spasial menggunakan TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis*). Melalui kedua program tersebut, infiltrasi hujan dapat disimulasikan dan diketahui pengaruhnya terhadap perubahan kestabilan lereng (angka aman) (Iverson, 2000).

Simulasi analisis kestabilan lereng tersebut, dapat memberikan gambaran kondisi lereng setelah adanya kenaikan muka air tanah temporal, dengan berbagai variasi ketinggian muka air tanah. Dengan adanya gambaran tersebut, diharapkan tulisan ini mampu dapat melakukan pendekatan mengenai infiltrasi hujan di lapangan sehingga mempermudah pihak terkait dalam memutuskan solusi tepat guna upaya pencegahan longsor susulan pada lereng sekitar studi kasus.



Gambar 2. Lokasi longsor berada di KecamatanPangkalan, KabupatenLimapuluh Kota, Propinsi Sumatera Barat (sumber: Googleearth 2017)

METODE PENELITIAN

Lokasi longsor berada di KecamatanPangkalan, KabupatenLimapuluh Kota, Propinsi Sumatera Barat (Gambar 2) dengan koordinat $0^{\circ} 3.743'S$ dan $100^{\circ} 41.085'T$. Data yang digunakan merupakan data primer berupa hasil pengujian tanah, sedangkan data sekunder berupa peta *DEM*, Peta dan data informasi kejadian melalui pemerintah setempat.

Metodepenelitian yang digunakan yaitu dengan menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Dilakukan pengamatan lapangan untuk mengetahui kondisi longsor, sebaran batuan, kondisi keairan dan pengambilan sampel tanah. Dilakukan uji lab untuk mengetahui sifat fisik tanah. Dilakukan pemodelan nilai stabilitas lereng berdasar tinggi muka air tanah. Analisis faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan software SLOPE/W 7.12. dan TRIGRS. TjieLiong, 2012melakukan penggambaran lereng dan besar sudutnya dengan melakukan trial and erorsehinggadidapatkansudut busur lingkaran yang

sesuai dengan panjang busur kelongsorannya. Analisis masalah kestabilan lereng baik secara sederhana maupun kompleks dengan menggunakan metode kesetimbangan batas untuk berbagai permukaan yang miring, kondisi tekanan pori-air, sifat tanah dan beban terkonsentrasi. Pada metode ini juga dapat ditampilkan gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan masing-masing lereng. Hasil dari perhitungan dengan SLOPE/W7.12 pada nilai factor keamanannya dihitung dengan perbandingan antara kuat geser tanah dan gayadorong tanah.

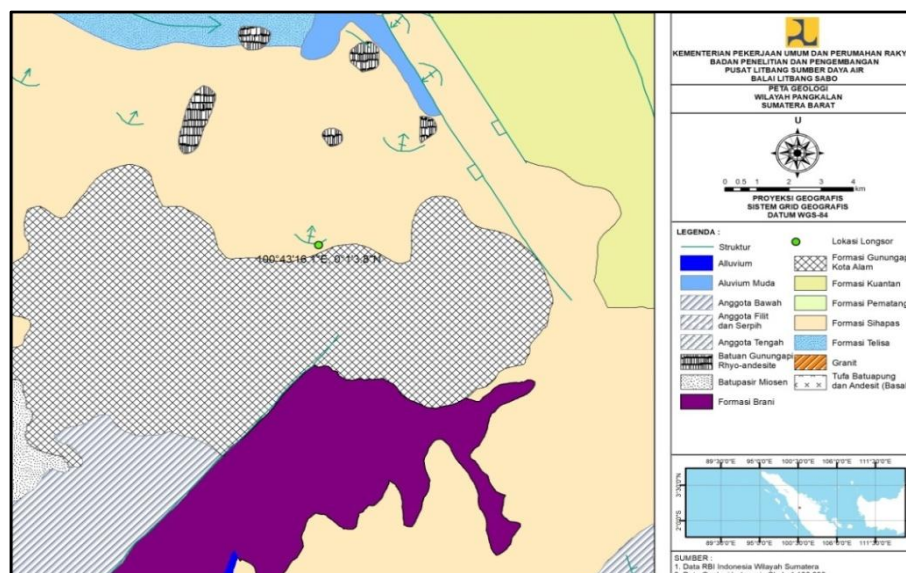
Identifikasi kedalaman bidang gelincir dari gerakan tanah dilakukan dengan pengamatan singkapan di lapangan. Nilai angka aman dari perhitungan disinkronisasi dengan nilai angka aman minimal yang terjadi, angka aman minimal yang memiliki bidang longsor paling mirip dengan pengamatan di lapangan dianggap sebagai angka aman yang terjadi saat kejadian longsor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

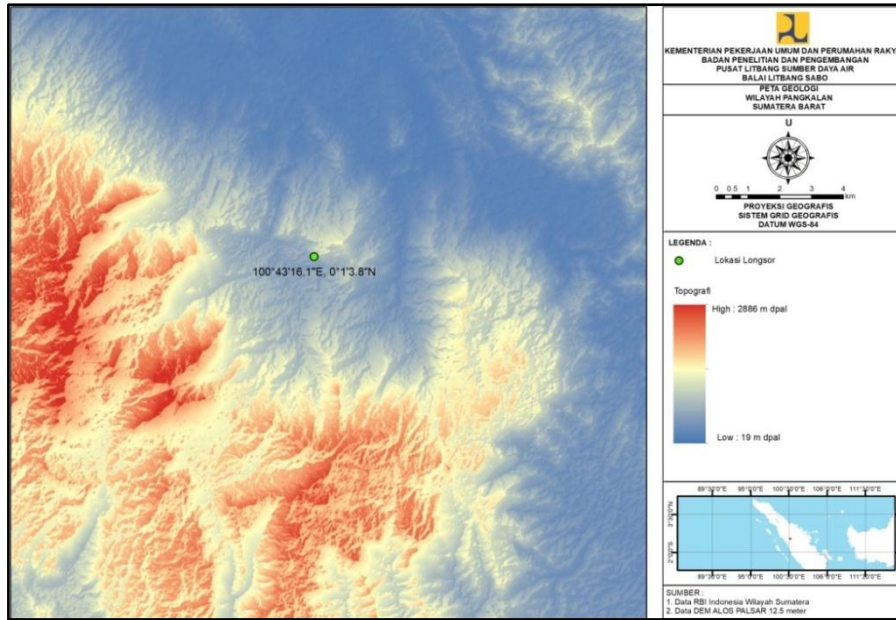
Geologi Daerah Longsor Pangkalan

Geologi daerah penelitian longsor Pangkalan didominasi oleh batuan vulkanik yaitu granit yang tersingkap dari bagian barat hingga timur lokasi longsor (Gambar 3). Batuan yang tersingkap di lokasi gerakan tanah merupakan hasil lapukan endapan vulkanik berwarna coklat kemerahan, berupa lempung pasir, ketebalan 4 m – 6 m dengan permeabilitas sedang, bersifat lepas dan mudah runtuh. Struktur geologi yang berkembang berupa sesar dengan arah umum timur laut - barat daya dan dipotong oleh sesar sesar berarah barat laut dan tenggara. Struktur geologi di daerah selatan lokasi longsor berupa struktur kelurusan. Kondisi batuan pada lokasi longsor dan sekitarnya tersusun dari beberapa unit kelompok batuan yaitu batuan dasar (basement), Kelompok Pematang, Kelompok Sihapas, Formasi Telisa, dan formasi Gunung api Kota Alam.

Geomorfologi daerah Pangkalan terdiri dari perbukitan curam dengan elevasi 400 – 2.800m di atas permukaan laut, mempunyai kemiringan antara 35 - 65° (Gambar 4). Dari peta topografi dapat dilihat bahwa lokasi longsor berada suatu alur atau lembah. Kondisi ini punya pengaruh tinggi terhadap kerawanan longsor. Apabila terjadi hujan maka air sebagian akan meresap ke dalam tanah dan sebagian akan mengalir di permukaan tanah. Resapan air tanah maupun aliran permukaan akan menuju titik terendah (alur atau lembah) sehingga lokasi ini mudah jenuh air. Akibat kandungan air yang tinggi maka lokasi ini menjadi rawan terjadi longsor.



Gambar 3. Kondisi geologi lokasi longsor Pangkalan dan sekitarnya



Gambar 4. Kondisi topografi lokasi longsor Pangkalan dan sekitarnya

Sifat Fisik Dan Kekuatan Tanah

Hasil uji sifat fisik tanah di laboratorium disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil uji sifat fisik, lapisan pasir lempungan dicirikan dengan kadar air tinggi dan plastisitas tinggi. Sedangkan lapisan pasir kelanauan dicirikan dengankadar air rendah dan plastisitas rendah. Kenaikan kadar air yang masuk ke dalam tanah menimbulkan penambahan pembebanan pada lereng. Kondisi lokasi longsor dan pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kondisi longsor pangkalan pada(kiri), pengambilan sampel tanah tak terganggu (kanan)

Tabel 1. SifatGeotek Tanah LokasiTabaPenanjung, Bengkulu

No	Variabel, satuan	Zona 1	Zona 2
1	Koefisien permeabilitas jenuh (K_s) m/s	3.867e-09	1.206e-10
2	DiffusivitasJenuh (D_o)	6.805e-07	2.127e-09
3	Kadar air volumetrik (θ_s, θ_r)	0.58, 0.13	0.21, 0.08
4	Berat volume (γ_b) N/m	1.66e+04	4.127e+05
5	Kohesi (c), sudut gesek (ϕ) N/m	0.200e+03, 1.8°	0.120e+04, 2.1°
6	Kemiringan kurva (α)	-2.017	-3.2
7	Curahhujan (r_i) m/s	8.3e-6	8.3e-6
8	Kedalaman tanahpermeabel (Z_{max}) m	5	5

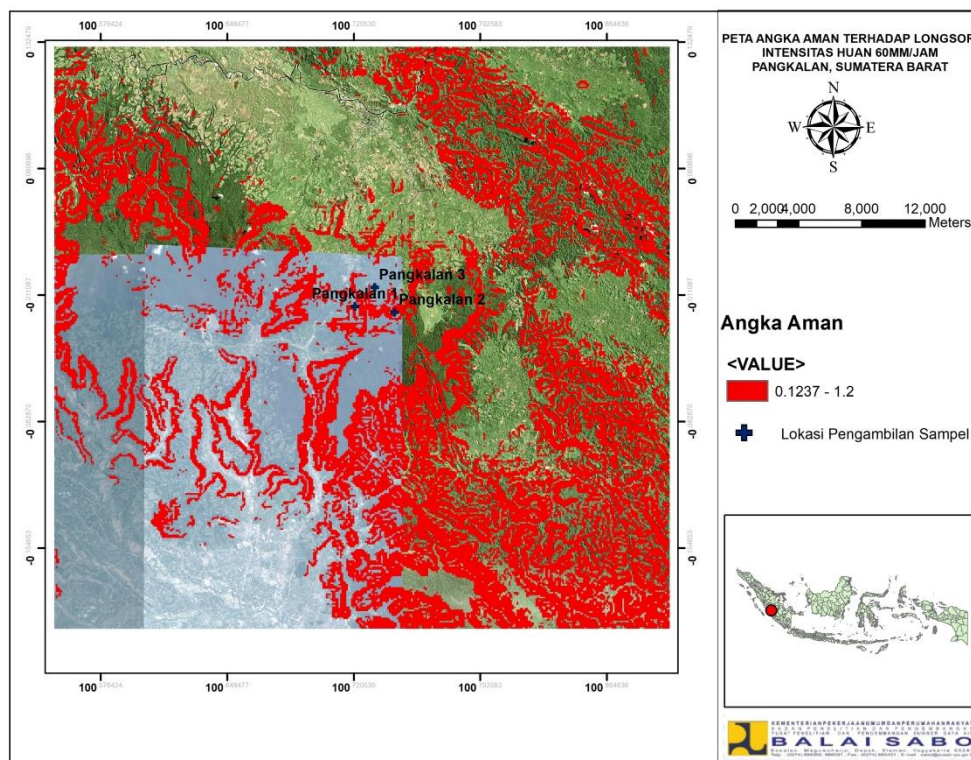
(Sumber: Hasiluji lab)

Hasil Analisis *TRIGRS*

Pada pemrosesan data menggunakan *TRIGRS*, kelas kerentanan dibagi menjadi dua yaitu *High Susceptibility* ($fK < 1.2$), *Medium-low Susceptibility* ($fK > 1.2$). Wilayah studi kasus dibagi menjadi dua zona seperti pada Tabel 1. Pembagian zona ditentukan berdasarkan perbedaan propertis tanah. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan *TRIGRS*, didapatkan bahwa wilayah rawan longsor tidak hanya terjadi pada titik jalan nasional tetapi pada titik-titik lain yang memiliki topografi curam dan intensitas hujan yang tinggi (Gambar 6).

TRIGRS merupakan pemodelan stabilitas lereng yang berfokus pada infiltrasi hujan. Dengan melihat hasil simulasi *TRIGRS*, dan kecocokkan pada daerah rawan longsor di lapangan, maka dapat diketahui bahwa pengaruh infiltrasi hujan pada wilayah studi kasus sangat tinggi. Meskipun memiliki propertis yang berbeda, namun nilai angka aman kritis tetap menyebar pada wilayah-wilayah di Pangkalan, dimana variabel yang tetap pada kedua zona tersebut adalah curah hujan.

Infiltrasi tersebut mengakibatkan adanya kenaikan muka air tanah temporal yang meurunkan nilai angka aman sesuai persamaan yang digunakan dalam simulasi *TRIGRS* (Persamaan 8).



Gambar 6. Kondisi stabilitas lereng regional lokasi longsor Pangkalan dan sekitarnya, dengan pemodelan *TRIGRS*

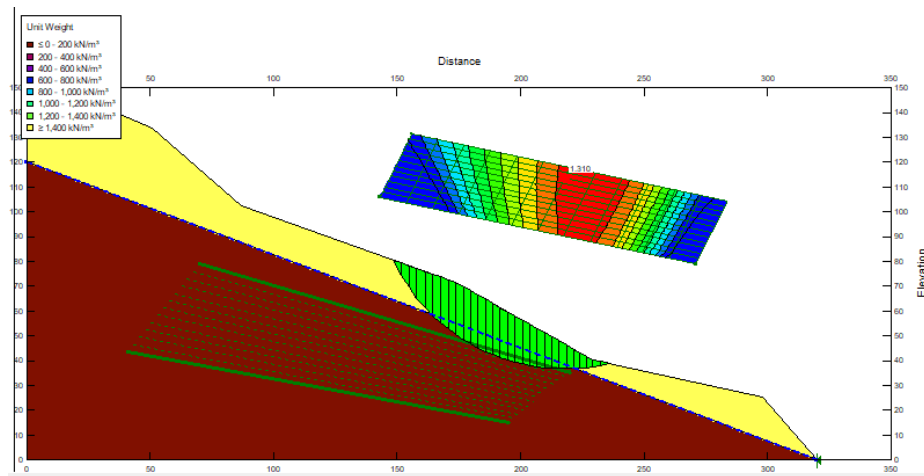
Variasi Muka Air Tanah Pada Simulasi Dua Dimensi

Pada simulasi dua dimensi, lereng dimodelkan memiliki dua lapisan. Lapisan pertama adalah lanaukelempungan dan lapisan kedua adalah pasir padat. Analisis historis digunakan dalam penelitian

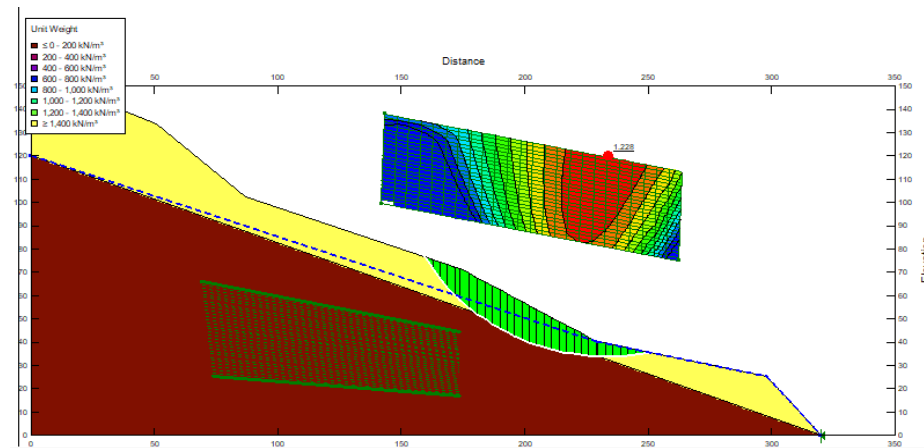
ini, artinya dicoba-coba kondisi yang mungkin sesuai dengan kondisi lapangan dan hasilnya divalidasi dengan pola keruntuhan yang ada di lapangan.

Hasil simulasi menunjukkan stabilitas lereng pada Gambar 7 dengan kondisi muka air tanah normal menghasilkan nilai faktor keamanan sebesar 1,310. Hal ini mengindikasikan bahwa lereng pada kondisi aman (menurut Varnes, 1978) dan pernah mengalami keruntuhan (menurut Bowles, 1984). Gambar 8 memperlihatkan bahwa kondisi kestabilan lereng akan menurun menjadi 1,228 apabila terjadi kenaikan muka air tanah sebesar 1m dari kondisi normal. Analisis stabilan lereng menghasilkan nilai faktor keamanan sebesar 1,193 apabila muka air tanah naik 2m dari kondisi normal (Gambar 9). Dan menjadi 1,133 apabila muka air tanah naik menjadi 3m dari kondisi normal (Gambar 10). Hal ini mengindikasikan bahwa lereng akan dalam kondisi kritis. Berdasarkan hasil pemodelan stabilitas lereng dapat dilihat bahwa semakin tinggi muka air tanah maka stabilitas lereng menjadi turun.

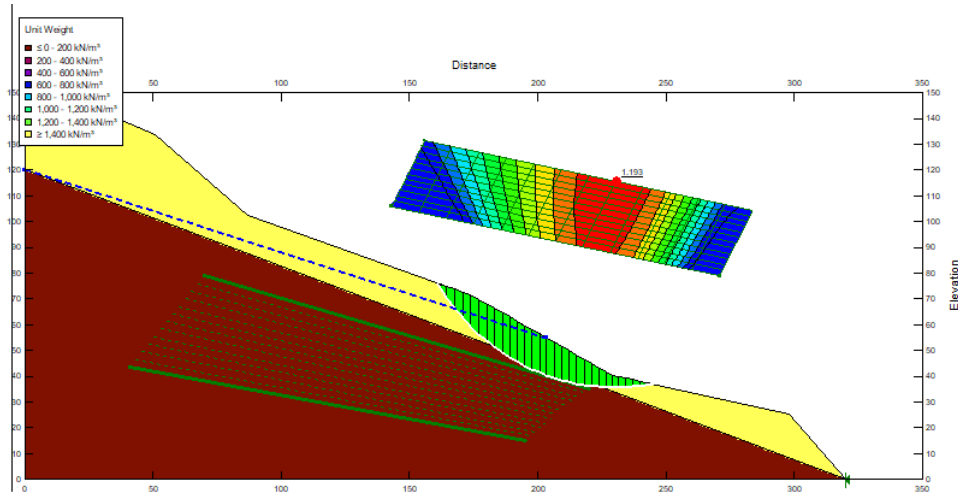
Dengan demikian solusi yang mungkin dapat diterapkan untuk meningkatkan angka aman adalah stabilisasi muka air tanah temporal akibat infiltrasi hujan. Salah satu metode yang dapat diterapkan adalah sistem drainase, mengingat longsor terjadi pada badan jalan utama, maka drainase permukaan di tepi jalan dan drainase bawah diperlukan agar tidak mengganggu akses jalan.



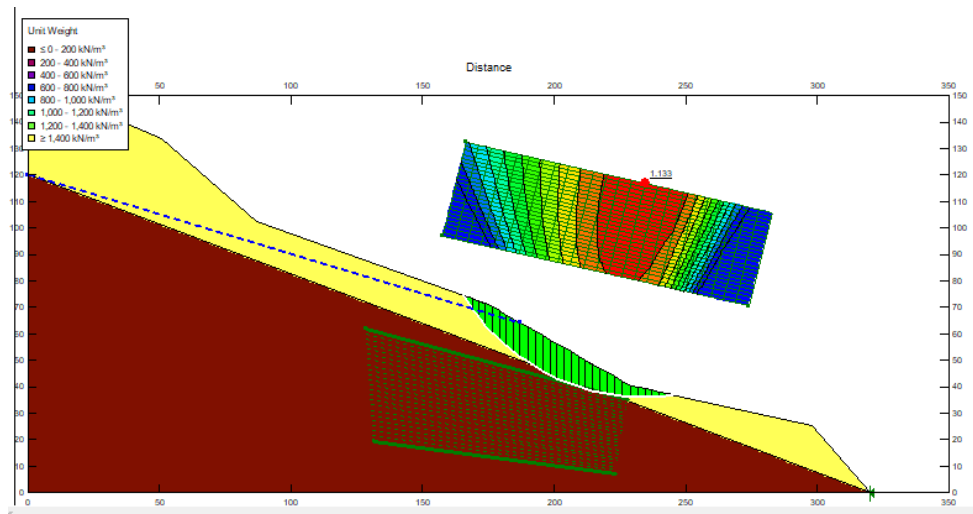
Gambar 7. Hasil perhitungan menunjukkan nilai FS 1,310 dengan kondisi muka air tanah kondisi normal



Gambar 8. Hasil perhitungan menunjukkan nilai FS 1,228 dengan kondisi muka air tanah 1m di atas kondisi normal



Gambar 9. Hasil perhitungan menunjukkan nilai FS 1,193 dengankondisimukaairtanah2m di atas kondisi normal



Gambar 10. Hasil perhitungan menunjukkan nilai FS 1,133 dengankondisimukaairtanah3m di atas kondisi normal

KESIMPULAN

Berdasar hasil investigasi lapangan, stratifikasi lapisan tanah penyusun lereng terdiridarizonalapukanberupapasirlempungan dan batuan dasar berupa granit. Batu granit yang masih kompak bersifat kedap air sehingga air tidak dapat menembus lapisan granit. Geomorfologi daerah Pangkalan terdiri dari perbukitan. Lokasi longsor berada suatu alur atau lembah, kondisi ini punya pengaruh tinggi terhadap kerawanan longsor. Apabila terjadi hujan maka resapan air tanah maupun aliran permukaan akan menuju titik terendah (alur atau lembah) sehingga lokasi ini mudah jenuh air.

Kenaikan muka air tanah terjadi akibat adanya muka air tanah temporal yang terbentuk oleh infiltrasi hujan. Kenaikan tersebut menurunkan nilai angka aman, dimana sebelumnya pada kondisi normal angka aman 1,310 truun menjadi 1,228 pada kenaikan mat sebesar 1 m dari kondisi normal, dan menjadi 1,193 saat m.a.t.naik 2m dengan kondisi terendah pada kenaikan m.a.t. 3m nilai faktor

keamanan sebesar 1,133. Indikasi tersebut menunjukkan bahwa penurunan muka air tanah melalui sistem drainase dapat menjadi solusi kestabilan lereng.

DAFTAR PUSTAKA

- Baum, R. L., Savage, W. Z. dan J. W. Godt, "TRIGRS—A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0", *U.S. Geological Survey*, 2008
- Bowles. J.E., 1984, Physical and Geotechnical Properties of Soil, second edition, *Institution of Civil Engineers*, London
- Geo-Slope International Ltd. 2007. Stability Modelling with Slope/w 2007 version- An Engineering Methodology First edition . Geo- Slope International Ltd: Canada
- Hardiyatmo, H.C., 2012, *Penanganan Tanah Longsor dan Erosi*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resources Research*, 36(7), h. 1897-1910
- Mukhlisin M., Nurul Aini Binti Abd Aziz 2016, Study of horisontal drain effect on slope stability, *journal of geological society of India*
- Muntohar A.S., 2008, "Proposal Ambang Hujan untuk Peringatan Dini Tanah Longsor", Seminar/workshop Application Research for Disaster and Humanitarian, 19 Desember 2009, University Club UGM
- Tohari, A., Dwi Sarah, EkoSoebowo, 2006, Geological and Geotechnical Investigation of a Slow – Moving Landslide In Volcanic Residual Soil Slope for the Purpose of Hazard Assessment. Proc. Intern. Symp. Geotech. Hazard: Prevention, *Mitigation and Engineering Response*, Yogyakarta, 24-27 April 2006
- Gouw Tjie Liong, Dave Juven George Herman, " Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium vs Finite Elemen Methode " <http://indogeotek.com/wpcontent/uploads/2012/11/2012-Dec-Hatti-GOUW-Dave-Kestabilan-Lereng-FEMvsLEM.pdf>
- Varnes, D.J., 1978, Slope Movement Types and Processes, Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- Wardana I. G.N , 2011 " Pengaruh perubahan Muka Air Tanah dan Terasering terhadap Perubahan Kestabilan Lereng " , Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Vol. 15 No.1 Januari 2011, Bali
- Zakaria, Zufialdi. (2008). MKKP: Geo mekanika, AKL& Kebencanaan Geologi. [Online] Tersedia: <http://blogs.unpad.ac.id/zufialdizakaria/> [2 Agustus 2010]
- Zomorodian, S. M. A., and Abodollahzadeh, S. M. (2010). Effect of Horisontal Drains on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition. *International Journal of Geology*, 4(4), 85–90.