



TANAH LONGSOR

Analisis - Prediksi - Mitigasi

Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar, M.Eng.Sc.

Tanah Longsor:

Analisis — Prediksi — Mitigasi

Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar, S.T., M.Eng.Sc.

*Dosen Program Studi Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

Acknowledgment

Sincerely thank goes to who has encouraged and supported the author to complete this book:

- Ir. Dr. Roslan Hashim, Associate Professor at Department of Civil Engineering, University of Malaya, Malaysia
- Dr. Hung-Jiun Liao, Professor at Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taiwan
- Dr. Ryosuke Kitamura, Professor at Department of Ocean Civil Engineering, Kagoshima University, Japan

PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohimi

Dengan Nama Allah Yang Maha Pengasih dan Maha
Penyayang

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah Yang Maha Agung, Tuhan Semesta Alam. Dia telah menurunkan tanda-tanda kekuasaannya baik melalui ayat-ayat kauniyah maupun kauliyah. Semua itu tentunya menjadi pelajaran yang baik bagi orang-orang yang mau berfikir dan menggunakan akalanya.

Sebagai ungkapan rasa syukur atas karunia-Nya, buku berjudul Tanah Longsor: Analisis - Prediksi - Mitigasi ini dapat diselesaikan. Penyusunan buku ini terinspirasi dari rangkaian kejadian tanah longsor di tanah air. Indonesia dengan karakteristik wilayah yang terdiri atas dataran tinggi dan rendah, curah hujan yang relatif tinggi, dan berada pada rangkaian "*ring of fire*" sangat rentan terhadap kejadian tanah longsor. Setidaknya terdapat 918 lokasi rawan longsor di Indonesia. Kerugian yang ditanggung akibat bencana tanah longsor sekitar Rp 800 miliar, sedangkan jiwa yang terancam sekitar 1 juta setiap tahunnya. Oleh karenanya, wilayah Indonesia memiliki tingkat risiko yang tinggi terhadap bencana tanah longsor. Salah satu usaha untuk mengurangi risiko bencana adalah dengan meningkatkan kapasitas. Buku ini adalah sebagai upaya untuk menambah pengetahuan masyarakat tentang tanah longsor guna meningkatkan kapasitas tersebut.

Secara konseptual, kejadian tanah longsor dapat ditinjau dari beberapa disiplin ilmu seperti geografi, geologi, ilmu tanah, geodesi, dan sebagainya. Sehingga, kajian tanah longsor memerlukan kajian multidisiplin. Pada ranah akademik, buku ini dimaksudkan untuk membantu para mahasiswa, peneliti, praktisi guna memahami proses, mekanisme, analisis dan prediksi, mitigasi, instrumentasi, dan analisis risiko bencana tanah longsor dalam perspektif disiplin geoteknik dan ketekniksipilan. Dalam matakuliah di Program Strata-1 Teknik Sipil,

bahasan Tanah Longsor merupakan bagian kecil dari pokok bahasan Analisis Stabilitas Lereng dalam matakuliah Mekanika Tanah, atau menjadi matakuliah pilihan. Sehingga bagi mahasiswa materi yang diberikan masih sangat terbatas untuk bekal terjun di jasa konstruksi. Pada kebanyakan praktek, teknik mitigasi tanah longsor lebih banyak dilakukan daripada pencegahan dini bahaya tanah longsor. Sedangkan pada ranah penelitian, kajian tentang prediksi dan pemodelan stabilitas lereng serta analisis risiko lebih banyak dilakukan. Dewasa ini, pemodelan tanah longsor ini telah banyak dikombinasikan dengan sistem informasi geografis (SIG) sebagai media penyajian yang lebih menarik.

Dalam penyusunan buku ini, penulis sedapat mungkin menambahkan hasil-hasil kajian terkini yang bersumber dari jurnal dan hasil penelitian. Buku ini disusun dari tujuh Bab yang terdiri atas Bab I tentang penjelasan umum kejadian tanah longsor, Bab II yang berisikan tipikal, proses, dan mekanisme tanah longsor, Bab III yang menguraikan ambang hujan dan peringatan dini, Bab IV tentang analisis stabilitas lereng, Bab V menjelaskan tentang integrasi model hidrologi dan stabilitas lereng, Bab VI menuliskan tentang instrumentasi dan teknik mitigasi, dan analisis risiko bencana tanah longsor dituliskan dalam Bab VII. Sehubungan dengan beberapa istilah asing yang terkadang kesulitan untuk dicari padanan katanya dengan Bahasa Indonesia, maka penulis tetap menyajikannya dalam bahasa asing tersebut. Guna lebih memahami pokok bahasan dalam buku ini diberikan contoh-contoh permasalahan dan penyelesaiannya. Secara keseluruhan buku ini memiliki tujuan instruksional sebagai berikut:

1. dapat memahami tipikal, proses, dan mekanisme tanah longsor.
2. dapat memahami pemodelan ambang hujan yang digunakan untuk evaluasi kejadian tanah longsor.
3. dapat memahami prinsip pemodelan fisika tanah longsor yang mengintegrasikan model hidrologi dan stabilitas lereng.
4. dapat memahami prinsip-prinsip analisis stabilitas lereng dengan metode deterministik dan probabilistik.
5. dapat mengetahui dan menerapkan prinsip-prinsip instrumentasi tanah longsor.
6. dapat mengetahui prinsip teknik mitigasi tanah longsor.
7. dapat memahami dasar-dasar analisis risiko bencana tanah longsor.

Buku ini disusun melalui proses yang cukup panjang. Banyak bahan rujukan jurnal ilmiah internasional diperoleh ketika penulis menempuh pendidikan Strata-3. Sebagian bahan penulisan buku ini diambilkan dari hasil penelitian pada saat mengikuti program *Post-Doctoral*. Sebagai akhir dari pengantar ini, walaupun buku ini telah disusun dengan sebaik mungkin, bukan berarti luput dari kekurangan dan kesalahan. Untuk itu segala bentuk kritik dan saran akan diterima dengan lapang dada oleh penulis guna perbaikan mutu buku ini. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan para guru dan dosen penulis yang telah memberikan teladan sebagai guru dan dosen profesional. Terima kasih kepada Prof. Dr. Ir. Kabul Basah Suryolelono, Dip.H.E., D.E.A., Ir. Sutojo Tjokrodihardjo (almarhum), Ir. Gendut Hantoro, M.T. (almarhum), dan dosen-dosen di Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta yang telah memberikan teladan dan motivasi kepada penulis untuk menyelesaikan buku ini. Ucapan terima kasih disampaikan pula kepada Saudara Ario Muhammad, S.T. (mahasiswa program *Master* di NTUST, Taiwan) yang telah membantu menyiapkan beberapa bagian naskah. Terima kasih yang tak terhingga pula atas dukungan yang diberikan oleh isteri R. Suprayanti, dan anak-anak tersayang: Rahma, Rasyid dan Rafid, serta orang tua terhormat: Harjono dan Kustiyah. Akhirnya, semoga buku ini bermanfaat dan mendapat berkah dari Allah SWT.

Dr.Eng. Agus Setyo Muntohar, S.T., M.Eng.Sc.

Untuk:

Agama-ku, Bangsa-ku, Muhammadiyah-ku

Ibu-Bapak-ku,

Isteri dan Anak-Anak-ku

1. PENDAHULUAN

1.1 PENGANTAR

Jenis tanah pelapukan yang sering dijumpai di Indonesia adalah hasil letusan gunung api. Tanah ini memiliki komposisi sebagian besar lempung dengan sedikit pasir dan bersifat subur. Tanah pelapukan yang berada di atas batuan kedap air pada perbukitan/punggungan dengankemiringan sedang hingga terjal berpotensi mengakibatkan tanah longsor pada musim hujan dengan curah hujan berkuantitas tinggi. Jika perbukitan tersebut tidak ada tanaman kerasberakar kuat dan dalam, maka kawasan tersebut rawan bencana tanah longsor. Pada kebanyakan peristiwa longsor (*rainfall triggering landslides*), keruntuhan lereng selalu terjadi ketika musim penghujan atau ketika terjadi badai taifun yang membawa curah hujan yang sangat tinggi hingga mencapai lebih dari 1000 mm. Pada Gambar 1.1 ditunjukkan kejadian tanah longsor yang pemukiman sebagai akibat curah hujan di Kulon Progo.

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng dunia yaitu lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng Australia yang bergerak saling menumbuk. Akibat tumbukan antara lempeng itu maka terbentuk daerah penunjaman memanjang di sebelah Barat Pulau Sumatera, sebelah Selatan Pulau Jawa hingga ke Bali dan Kepulauan Nusa Tenggara, sebelah Utara Kepulauan Maluku, dan

sebelah Utara Papua. Konsekuensi lain dari tumbukan itu maka terbentuk palungsamudera, lipatan, punggungan dan patahan di busur kepulauan, sebaran gunungapi, dan sebaran sumber gempabumi. Dengan demikian Indonesia rawan terhadap bencana gempabumi Tanah longsor dapat pula terjadi ketika terjadi gempa bumi. Dalam hal ini gempa bumi sebagai pemicu terjadinya longsor (*earthquake triggering landslides*). Pada kejadian gempa bumi di Indonesia, seperti gempa bumi di Yogyakarta pada 27 Mei 2006 dan Jawa Barat pada 7 September 2009, telah memicu terjadinya longsor baik berupa jatuhnya batuan (*topples*) dan longSORAN gelincir (*deep seated*) (Gambar 1.2).



Gambar 1. 1 Tanah longsor akibat curah hujan yang tinggi di Kabupaten Kulon Progo, Provinsi D.I. Yogyakarta

Tanah longsor ini tidak hanya terjadi pada lereng alami, namun dapat pula terjadi pada lereng yang telah diperkuat dengan struktur perkuatan (*engineered slope*). Gambar 1.3a menunjukkan suatu lereng yang diperkuat dengan teknik *geo-anchor* mengalami keruntuhan ketika terjadi badai hujan. Selain itu, longsor sangat dimungkinkan terjadi pada timbunan yang dibuat oleh manusia. Pada bulan Februari 2005, timbunan sampah di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPAS) Leuwigajah, Bandung mengalami longsor ketika terjadi hujan yang cukup lebat (Gambar

1.3b). Peristiwa ini merupakan salah satu contoh buruknya penanganan masalah sampah yang menyebabkan kerugian materi dan jiwa.



Gambar 1.2 Peristiwa longsor karena gempa bumi di Yogyakarta 27 Mei 2006: (a) jatuhnya batuan (*topples*), (b) longsoran gelincir (*deep-seated*).



Gambar 1.3 (a) Keruntuhan lereng yang diperkuat dengan teknik *geo-anchor* di Keelung, Taiwan, (b) kejadian longsor timbunan sampah di Leuwigajah, Bandung.

Terdapat suatu pertanyaan yang besar dalam analisis tanah longsor. Ketika terjadi hujan atau gempa bumi, lereng A mengalami keruntuhan. Namun pada saat hujan atau gempa bumi yang sama, lereng tersebut tidak longsor. Dengan demikian, tantangan dalam analisis tanah longsor adalah kapan (*when*), dimana (*why*) dan mengapa (*why*) lereng akan longsor. Oleh karena itu kajian terhadap tanah longsor ini menjadi semakin menarik bila bisa menjawab ketiga hal tersebut (Liao dkk., 2006). Penyebab longornya (*what*) suatu lereng secara pasti dapat diidentifikasi, yang mana akan dijelaskan dalam Bab II. Walaupun demikian mengapa bisa terjadi longsor masih belum dapat dipastikan.

1.2 BEBERAPA KEJADIAN TANAH LONGSOR

Tanah longsor merupakan bencana yang melanda hampir di semua belahan dunia. Berikut ini disajikan beberapa gambar peristiwa kejadian longsor yang dipicu oleh hujan dan gempa bumi.



Gambar 1. 4 Beberapa kejadian longsor di Indonesia: (a) longsor debris di Banjarnegara 4 Januari 2006, (b) longsor gelincir di Tawangmangu 25 Desember 2007, (c) longsor gelincir di Mataram 18 April 2009, dan (d) longsor tanggul Situ Gintung, Banten 27 Maret 2009.

1.2.1 Longsor di Indonesia

Pada Gambar 1.4 disajikan kejadian longsor debris (di Banjarmasin, Banjarnegara) dan longsor gelincir (di Mogol, Tawangmangu) serta keruntuhan bendungan (Situ Gintung, Banten) dengan hujan sebagai pemicu utamanya. Secara umum jenis gerakan tanah adalah longsor bahan rombakan berasal dari salah satu lereng. Untuk kejadian longsor di Mogol, Kristijono dkk., (2007) menyebutkan material longsor didominasi oleh endapan material tanah, pasir dan bongkah batuan bercampur dengan air dari sungai yang ada di tepi tebing serta pepohonan yang tumbang, kemudian bergerak dengan cepat ke area dibawahnya. Pada sebagian besar kejadian

longsor di Indonesia ini disebabkan oleh faktor curah hujan dan litologi serta perubahan tata guna lahan.

Aliran debris terjadi pula pada kejadian longsor tanggul Situ Gintung. Hujan lebat yang berlangsung lama dengan curah hujan yang tinggi di daerah hulu, mengakibatkan volume air waduk meningkat, sementara pintu air pembuang (*outlet*) dan saluran pembuangan tidak berfungsi secara optimal menyebabkan air melimpas melalui mercu permukaan tanggul atau dikenal dengan *over topping* (PVMBG, 2009). Berdasarkan catatan pada tanggal 26 Maret 2009 mulai pukul 14.00 sampai dengan 18.00 WIB, intensitas hujan mencapai 70 mm/jam dengan hujan kumulatif 113,2 mm (BMKG, 2009).

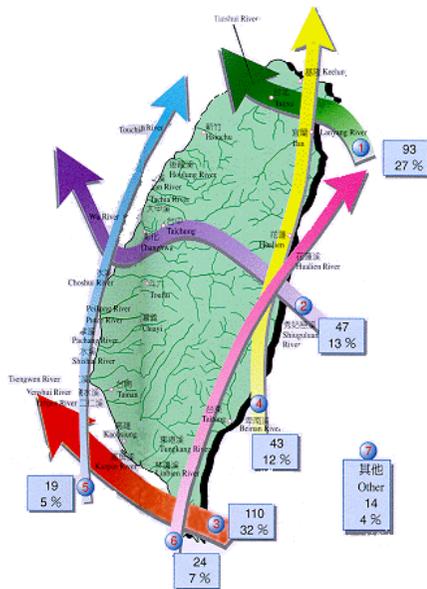


Gambar 1.5 Kejadian longsor pada ruas jalan T-18 dan T-21 di Taiwan: (a) longsor tipe runtuh batuan, (b) longsor gelincir, (c) aliran debris, dan (d) runtuh debris batuan (Liao dkk., 2006).

1.2.2 Longsor di Taiwan

Gambar 1.5 memberikan gambaran kejadian longsor pada lereng sepanjang jalan T-18 dan T-21 di Taiwan ketika terjadi badai hujan (*typhoon*) Herb pada tanggal 1 Agustus 1996 dan Mindulle pada tanggal 30 Juni 2004. Longsor tersebut disebabkan karena faktor curah hujan yang sangat tinggi, litologi,

dan morfologi lereng. Liao dkk., (2006) menyebutkan bahwa longsor tersebut terjadi ketika badai hujan yang membawa hujan dengan jumlah kumulatif dalam satu hari hingga lebih dari 1000 mm. Badai hujan ini selalu melintasi Taiwan setiap tahunnya terjadi lebih dari 20 badai dengan lintasan seperti pada Gambar 1.6.



Gambar 1. 6 Tipikal lintasan badai hujan yang melanda Taiwan (Liao dkk., 2006).

1.2.3 Longsor di Jepang

Longsor jenis aliran debris terjadi di atas hulu Sungai Hariharagawa, Izumi City, Kagoshima, Jepang pada tanggal 10 Juli 1997 (Gambar 1.7a). Aliran debris ini diawali dari longsor yang terjadi karena curah hujan yang sangat tinggi antara 7 - 9 Juli 1998. Longsor ini terjadi 14 jam setelah hujan puncak atau 4 jam setelah hujan berhenti (. Kecepatan aliran debris ini mencapai 80 km/jam. Hal ini sangat dimungkinkan karena proses pencairan masa tanah dan kondisi topografi yang memudahkannya mengalir ke bawah (Moriwaki dkk., 1998). Longsor aliran debris juga terjadi di Taishin, Fukushima pada tanggal 27 Agustus 1998 (Gambar 1.7b) yang disebabkan oleh curah hujan tinggi yang terjadi sejak 26 Agustus 1998. Curah hujan kumulatif mencapai hingga 1000 mm (Inokuchi, 1999).



Gambar 1.7 Longsor debris di Jepang: (a) longsor yang terjadi di Izumi, Kagoshima pada lereng bukit di sepanjang Hariharagawa, (b) longsor di Keyaki-sou, Fukushima.



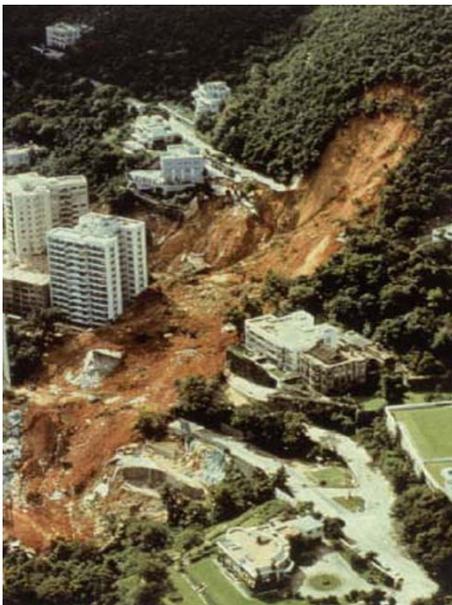
Gambar 1.8 Kejadian longsor akibat gempabumi: (a) jenis runtuhn batuan di Raiden Kaigan, Katanakake Iwanai-Cho, Hokkaido, (b) longsor aliran lumpur di Tsukidate, Tohoku.

Gambar 1.8a menggambarkan kejadian longsor di Raiden Kaigan, Hokkaido Jepang, yang disebabkan oleh gempa bumi magnitudo 7,8 pada tanggal 12 Juli 1993. Jenis longsor yang terjadi berupa runtuhn blok batuan. Pada Gambar 1.8b

ditunjukkan longsor di Tsukidate, Tohoku yang disebabkan gempa bumi 26 Mei 2006. Uzuoka dkk., (2005) menyebutkan bahwa longsor aliran lumpur tersebut terjadi beberapa saat setelah gempa. Hal ini menandakan bahwa terjadi proses pencairan masa tanah karena adanya hujan.

1.2.4 Longsor di Hong Kong

Longsor di Hong Kong lebih banyak disebabkan oleh faktor hujan, terutama ketika terjadi badai hujan. Salah satu kejadian longsor terbesar di Hong Kong adalah di Po Shan Road yang terjadi pada 18 Juni 1972. Jenis longsor berupa aliran debris dengan volume sumber longsor 40.000 m³ dan jarak luncur hingga 270 m ke arah bawah lereng (Gambar 1.9a). Sudut kemiringan lereng berkisar 35° disisi jalan. Retakan telah terjadi di area longsor yang dipicu oleh badai hujan Rose yang terjadi 11 bulan sebelumnya. GEO Hong Kong (1992) menyimpulkan bahwa longsor terjadi karena pekerjaan konstruksi di atas lereng yang bersamaan dengan hujan lebat. Tercatat bahwa hujan anteseden selama dua hari sebelum longsor mencapai 650 mm.



Gambar 1.9 Longsor di Hong Kong : aliran debris rombongan di Po Shan Road.

1.2.5 Longsor di El Salvador

Pada tanggal 13 Januari 2001 gempa bumi dengan magnitudo M_w 7.6 di El Salvador menyebabkan longsor di 445 lokasi. Bahan longsor ini merupakan tanah dari endapan vulkanik. Longsor di Las Colinas merupakan kejadian longsor yang sangat besar dimana pergerakan masa tanah mencapai 200.000 m^3 (Gambar 1.9). Masa tanah yang longsor seolah-olah menjadi masa yang agak cair (semi-liquid mass) sehingga mampu bergerak dengan jarak yang jauh. Bahan rombakan ini bergerak dari ketinggian 1070 m menuju bawah pada ketinggian 700-800 m. Dengan demikian masa tanah tersebut dapat bergerak dengan sangat cepat (Konagai dkk., 2002).



Gambar 1. 10 Longsor di Las Colinas, El Salvador.

1.3 DAFTAR PUSTAKA DAN REFERENSI

BMKG, 2009. Analisis Curah Hujan Seputar Jebolnya Tanggul Situ Gintung, Stasiun Klimatologi Pondok Betung-Tangerang, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Maret 2009, Jakarta.

Inokuchi T., 1999, Report on the Landslide Disaster in the Upper Part of the Abukuma River, Fukushima Prefecture, Due to Heavy Rainfall in August 1998, National Research Institute for Earth Science and Disaster, Prevention, Japan, 78p.

Konagai K., Johansson J., Mayorca P., Yamamoto T., Miyajima M., Uzuoka R., Pulido N.E., Duran F.C., Sassa K., and Fukuoka H., 2002. Las Colinas Landslide Caused by the January 13, 2001 of the Coast of El Salvador Earthquake. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 2, No.1, pp. 1 -15.

- Kristijono A., Tejakusuma I.G., Nurjaman D., Prawiradisastra S., Setiabudi A., Santoso E.W, Suryanto M., 2007. Laporan Rapid Assessment Bencana Longsor Di Dusun Mogol, Desa Legoksari, Kecamatan Tawangmangu, Kabupaten Karanganyar Provinsi Jawa Tengah. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Jakarta.
- Liao H.J., Ching J.Y., Lee W.F., and Wei J., 2006, Landslide along mountain roads in Taiwan. In Tham L-G, Chau K-T (eds): Proceeding of the Seminar on The State-of-the practice of Geotechnical Engineering in Taiwan and Hong Kong, 20 January 2006, Hong Kong: 75-99.
- Moriwaki H., Sato T., and Chiba M., 1998. Report on the Hariharagawa Debris Flow Disaster on July, 1997 in Kagoshima Prefecture, JAPAN, National Research Institute for Earth Science and Disaster, Prevention, Japan, 69p
- PVMBG, 2009, Laporan Singkat Bencana Situ Gintung, Kabupaten Tangerang, Provinsi Banten, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- Uzuoka R., Sinto N., Kazama M., and Unno T., 2005. Landslides during the Earthquake on May 26 and July 26, 2003 in Miyagi Japan. Soils and Foundations, Vol. 45 No. 4, pp. 149-163.
- Geotechnical Engineering Office (1989). Landslide Studies: Island Road Government School Landslip, Aberdeen, Volume 1, SPR 4/89. 262 p
- GEO, 1992. Reassessment of the Po Shan Landslide of 18 June 1992, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, SPR 16/92. 75 p.

2. PROSES DAN MEKANISME TANAH LONGSOR

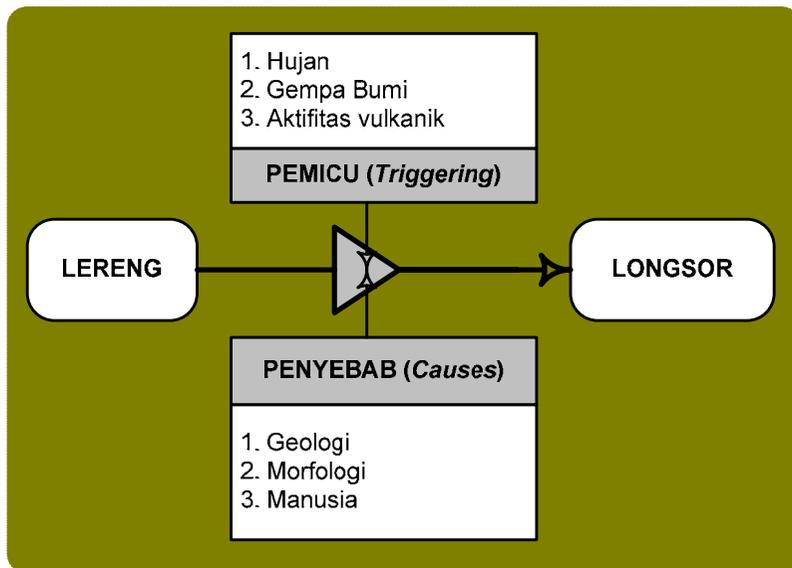
Tanah longsor adalah perpindahan material pembentuk lereng berupa batuan, bahan rombakan, tanah, atau material campuran tersebut, bergerak ke bawah atau keluar lereng. Proses terjadinya tanah longsor dapat diterangkan sebagai berikut: air yang meresap ke dalam tanah akan menambah bobot tanah. Jika air tersebut menembus sampai tanah kedap air yang berperan sebagai bidang gelincir, maka tanah menjadi licin dan tanah pelapukan di atasnya akan bergerak mengikuti lereng dan keluar lereng.

2.1 FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB DAN PEMICU TANAH LONGSOR

Kejadian tanah longsor memiliki dimensi ruang dan waktu. Longsor hanya dapat terjadi pada suatu lereng baik pada perbukitan, pegunungan, bantaran sungai, atau struktur timbunan. Tanah longsor dapat dimungkinkan untuk diketahui melalui identifikasi faktor-faktor penyebab (*causes*) dan pemicu (*trigger*) terjadinya tanah longsor. Konsep ini sederhana tapi penting. Gambar 2.1 menunjukkan skema dari penyebab dan pemicu terjadinya keruntuhan lereng.

Penyebab longsor dapat diartikan sebagai faktor-faktor yang membuat lereng menjadi rentan terhadap keruntuhan atau longsor pada lokasi dan pada waktu tertentu. Penyebab

terjadinya tanah longsor di jelaskan pada Tabel 2.1 yang meliputi faktor geologi, morfologi dan aktifitas manusia. Faktor penyebab dapat disebut sebagai faktor-faktor yang membuat lereng mengalami kegagalan struktur, yang kemudian membuat lereng menjadi tidak stabil. Pemicu adalah kejadian tunggal yang akhirnya bisa menyebabkan terjadinya tanah longsor. Sehingga bisa disimpulkan bahwa kombinasi faktor-faktor penyebab (*causes*) membuat kondisi struktur lereng mengalami kegagalan, sedangkan *trigger* yang akhirnya menyebabkan terjadinya keruntuhan/pergerakan. Biasanya, faktor pemicu mudah ditentukan setelah terjadinya tanah longsor (meskipun secara umum sangatlah sulit menentukan secara pasti kejadian alam yang memicu (terjadinya tanah longsor dari sebuah peristiwa keruntuhan/pergerakan). Secara umum, ketidakstabilan lereng atau mekanisme kegagalan struktur dapat dikelompokkan pada peningkatan nilai tegangan geser dan kuat geser tanah (Varnes, 1978).



Gambar 2.1 Faktor-faktor penyebab dan pemicu tanah longsor (dimodifikasi dari Varnes, 1978)

2.2 TIPIKAL TANAH LONGSOR

Tanah longsor dapat didefinisikan sebagai pergerakan masa tanah/batuan ke arah bawah yang disebabkan dan dipicu oleh faktor - faktor alam seperti jenis batuan, bentuk lahan, struktur

dan pelapisan batuan, kemiringan lereng, tebal tanah/bahan lapuk, curah hujan dan tutupan vegetasi. Proses pergerakan ini dapat secara bergeser (*sliding*), menggelinding (*rolling*), reruntuhan (*falling*), atau mengalir (*flowing*). Longsor biasanya terjadi pada lahan berbukit, lahan hasil pemotongan lereng untuk jalan atau permukiman, dan juga lahan-lahan galian tambang. Longsor terjadi karena lereng tidak stabil, sehingga material/batuan di atas lereng kemudian bergerak menurun. Ketidakstabilan lereng dapat dikarenakan beberapa sebab, yang utama adalah penjumlahan material oleh air (hujan). Penjumlahan material menyebabkan beban material semakin bertambah. Kemudian karena pengaruh gravitasi, aliran air yang tidak tertampung dan juga adanya batas kontak antara material stabil dan tidak stabil yang berfungsi sebagai bidang gelincir, material tidak stabil ini bergerak menuruni lereng sampai pada area dimana gravitasi tidak berpengaruh lagi.

Tabel 2. 1 Penyebab umum tanah longsor (TRB, 1996).

Kelompok Faktor Penyebab	Sumber Penyebab
Faktor Geologi:	<ul style="list-style-type: none"> a. Lapisan batuan yang lemah dan sensitif b. Pelapukan batuan c. Pergeseran batuan d. Retakan atau pertemuan lapisan batuan e. Perbedaan permeabilitas lapisan tanah f. Perbedaan kekuatan batuan (kaku, padat, plastis)
Faktor Morfologi:	<ul style="list-style-type: none"> a. Pengangkatan tektonik atau vulkanik b. Lapisan es c. Erosi d. Perubahan letak beban pada lereng e. Kerusakan tanaman pelindung pada lereng
Faktor Fisik:	<ul style="list-style-type: none"> a. Curah hujan yang sangat tinggi b. Pencairan es c. Hujan yang sangat lama d. Perubahan muka air tanah e. Gempa bumi f. Letusan vulkanik g. Kembang - susut karena pelapukan tanah
Faktor Manusia:	<ul style="list-style-type: none"> a. Penggalian lereng b. Penggundulan hutan (<i>deforestation</i>) c. Penambangan d. Getaran-getaran buatan, seperti percobaan nuklir

Sistem klasifikasi yang didasarkan pada parameter-parameter ini ditunjukkan pada Tabel 2.2. Sistem klasifikasi lain yang digunakan adalah dengan memasukkan beberapa variable tambahan, seperti kecepatan pergerakan (*the rate of movement*) dan kandungan air, udara dan es pada material yang mengalami longsor. Gambar 2.2 menunjukkan ilustrasi dari peristiwa tanah longsor beserta dengan penjelasan terminologi yang lazim. Dilihat dari mekanisme longsorannya, tanahlongsor dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis, yaitu luncuran (*slide*), reruntuhan (*fall*), jatuhan (*topple*), dan aliran (*flow*).

Tabel 2. 2 Klasifikasi pergerakan lereng (Varnes, 1978).

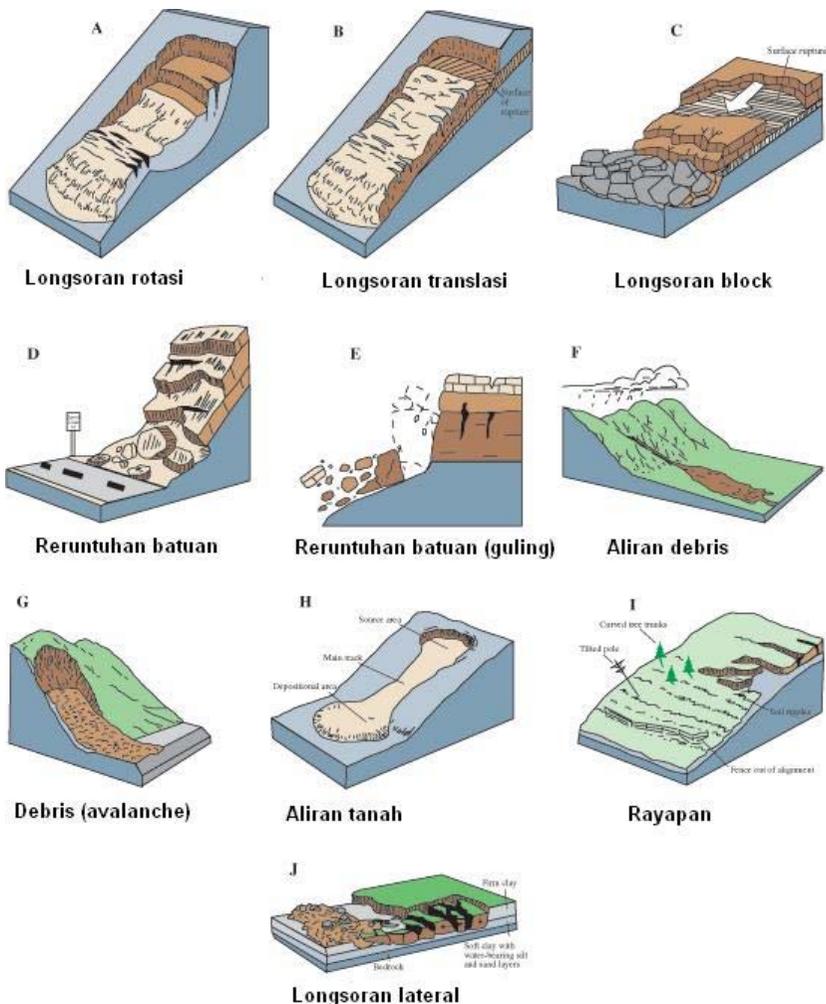
Jenis Pergerakan	Jenis Material		
	Batuan	Butir Kasar	Butir Halus
Reruntuhan (<i>falls</i>)	Reruntuhan batu	Reruntuhan debris	Reruntuhan tanah
Jatuhan (<i>topples</i>)	Jatuhan batu	Jatuhan debris	Jatuhan tanah
Longsoran (<i>slides</i>)	Longsoran batu	Debris slide	Earth slide
Lateral (<i>lateral spread</i>)	Batuan menyebar	Debris menyebar	Tanah menyebar
Aliran (<i>flow</i>)	Aliran batu Rayapan batu	Aliran debris Rayapan tanah	Aliran tanah Rayapan tanah
Komplek (<i>complex</i>)	Kombinasi dua atau lebih dari jenis pergerakan tanah		

a. Keruntuhan geser atau longsoran (*sliding failures*)

Pergerakan masa tanah ini terjadi karena perbedaan jenis lapisan tanah yang mana lapisan tanah atau batuan yang stabil berada di atas lapisan yang tidak stabil. Terdapat dua jenis utama untuk keruntuhan tanah longsoran yaitu longsoran rotasi dan longsoran tranlasi. Perbedaan keduanya adalah pada bentuk bidang gelincirnya. Bidang longsor pada jenis rotasi berbentuk cekung ke atas (Gambar 2.2a). Sedangkan bidang longsor berupa bidang datar dengan sedikit berbentuk cekungan ke atas (Gambar 2.2b). Pergerakan tanah jenis tranlasi dapat pula dalam satu kesatuan berupa blok tanah A (Gambar 2.2c).

b. Reruntuhan batuan (*fall failures*)

Keruntuhan jenis ini lebih sering terjadi pada lereng batuan yang mana batuan bergerak hingga terlepas dari lereng yang terjal seperti pada gambar 2.3d. Pergerakan masa batuan dipengaruhi oleh gravitasi, proses pelapukan mekanis, dan rembesan air. Longsor jenis reruntuhan batuan ini biasanya terjadi pada agregat batuan yang pelapukannya tidak merata, batuan yang mempunyai banyak kekar (*joint*) atau retakan (*fracture*), atau pada batas antara dua jenis batuan berbeda atau zona kontak batuan (*bedding planes*).



Gambar 2. 2 Skema jenis pergerakan tanah pada lereng (Highland, 2004).

c. Jatuhan (*toppling failures*)

Runtuhan (*topples*) adalah runtuhnya sekelompok massa batuan yang diakibatkan gravitasi bumi. Perbedaan longsoran jenis runtuh dengan jenis reruntuhan lainnya adalah adanya gerak rotasi massa material kedepan dari satu atau beberapa blok material, baik pada pusatnya, di bawah atau diadasar blok, pada wilayah yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi dan pada gaya desak yang disebabkan oleh blok material yang berdekatan atau kandungan air yang dimiliki oleh blok material tersebut pada wilayah longsoran (Gambar 2.2e).

d. Flows failures (Longsoran aliran)

Aliran (flow) adalah longsoran material yang menuruni lereng dengan ukuran yang bervariasi mulai dari fragmen tanah halus sampai bongkah yang bercampur dengan air. Longsor aliran memiliki perbedaan karakteristik, yaitu :

- 1) **Aliran debris (*debris flow*)**: Gambar 2.2f memperlihatkan skema aliran debris (debris flow). Pada tipe ini, material longsoran adalah campuran material-material berupa tanah lepas, batuan, bahan-bahan organik, udara, serta air yang membentuk massa material menjadi lebih cair, yang kemudian bergerak secara cepat menuruni lereng. Aliran debris meliputi kandungan lapisan tanah bergradasi baik kurang dari 50 % yang biasanya berasal dari aliran air permukaan (run-off water). Aliran air permukaan tersebut menghanyutkan dan membawa tanah lepas atau batuan pada lereng yang curam. Aliran debris secara umum juga berbeda dengan tipe tanah longsor lainnya, materialnya berada pada kondisi jenuh air, dan mengandung proporsi lanau dan pasir yang besar. Wilayah sumber aliran debris umumnya berbentuk selokan yang curam (*steep gullies*), dan sisa-sisa material aliran debris dapat diindikasikan oleh kandungan sebaran debris pada mulut selokan. Debris flow adalah longsoran material dengan ukuran yang bervariasi (dari halus hingga kasar) yang bercampur dengan air. Debris flow biasanya terjadi pada waktu hujan deras pada lereng curam. Debris flow merupakan salah satu jenis longsor yang sering terjadi di Indonesia.

- 2) **Debris bahan rombakan (*debris avalanche*)**: Jenis aliran ini adalah jenis aliran debris yang bergerak sangat cepat dan dalam masa yang besar. Skema ilustrasi aliran tipe ini ditunjukkan pada gambar 2.2g.
- 3) **Aliran tanah (*earthflow*)**: longsoran dengan jenis aliran ini memiliki karakteristik hampir sama dengan *aliran debris*, hanya saja ukuran materialnya relatif halus dan seragam. Aliran tanah biasanya terjadi pada lahan dengan kemiringan lereng yang tidak terlalu curam sebagaimana yang diperlihatkan pada gambar 2.2h. Tanah pada lereng berada dalam kondisi cair dan mengalir membentuk seperti sebuah "mangkuk". Longsoran ini selalu terjadi pada material-material yang bergradasi baik atau lempung bebatuan pada lereng yang lunak serta berada pada kondisi jenuh air. Akan tetapi, longsoran jenis ini juga bisa terjadi pada material granular yang kering. Jika aliran tanah mengandung 50% pasir, lanau, partikel lempung, maka material ini dapat bergerak secara cepat. Sehingga jenis aliran tanah ini sering disebut dengan aliran lumpur (*mudflow*).
- 4) **Rayapan (*creep*)**: Rayapan adalah aliran material berupa batuan dan tanah pada lereng, yang bergerak secara sangat perlahan dan dalam waktu yang relatif lama, mantap (*steady*), dan bergerak menurun (tidak seperti longsor yang sifat gerakannya cepat dan dalam waktu yang singkat). Pergerakan material disebabkan oleh cukupnya tegangan geser untuk mengakibatkan terjadinya deformasi tetap (*permanent deformation*), tetapi sangat kecil untuk mengakibatkan terjadinya retakan/kerusakan geser. Terdapat tiga jenis aliran creep yaitu : (1) berubah-ubah (*seasonal*), dimana pergerakan material terjadi sampai pada kedalaman tanah yang suhu dan kelembapannya berubah-ubah. (2) menerus (*continuous*), dimana tegangan geser secara terus menerus melebihi kekuatan material; dan (3) bertahap (*progressive*), dimana lereng mencapai titik keretakan seperti pada tipe pergerakan massa material lainnya. Secara visual kenampakan soil creep tidak mudah dikenali dalam waktu yang singkat karena kenampakan

morfologi permukaannya biasanya relatif tidak terlalu berubah. Namun ada beberapa indikator yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi rayapan, antara lain adanya pohon, tiang listik yang miring, dan retak - retak pada permukaan tanah seperti gelombang-gelombang tanah atau punggung bukit (Gambar 2.2i)

e. Longsoran lateral (*lateral-spreading failures*)

Longsoran lateral adalah peristiwa yang unik karena terjadi pada kemiringan yang landai atau pada wilayah yang cenderung datar (Gambar 2.2j). Karakteristik dominan dari pergerakan materialnya adalah perpanjangan lateral yang diikuti dengan retakan geser dan tarik. Longsoran terjadi karena likuifaksi, proses terjadinya likuifaksi karena kondisi material tanah yang jenuh air, lepas, serta daya lekat sedimennya rendah sehingga menyebabkan kondisi tanah berubah dari padat menjadi cair. Longsoran biasanya terjadi karena dipicu oleh pergerakan tanah yang cepat, seperti ketika terjadinya gempa, tapi terkadang juga tidak terlalu mempengaruhi. Ketika material yang saling terikat baik itu batuan dasar ataupun tanah, berubah kondisinya menjadi cair, blok bagian atas akan mengalami kerusakan/keretakan dan meluas dan kemudian material tersebut berkurang, berubah bentuk, berotasi/berputar, hancur atau mencair dan kemudian akan mengalir. Longsoran sebaran lateral di wilayah yang landai untuk material bergradasi baik berlangsung secara bertahap. Longsoran terjadi secara tiba-tiba pada sebuah wilayah yang sempit dan menyebar secara cepat. Secara umum, tanda terjadi longsor dimulai dengan adanya runtuh sedikit material walaupun pada beberapa pergerakan material tidak terdapat alasan yang jelas kenapa sehingga longsoran bisa terjadi. Kombinasi dua atau lebih jenis longsoran diatas disebut sebagai tanah longsor kompleks.

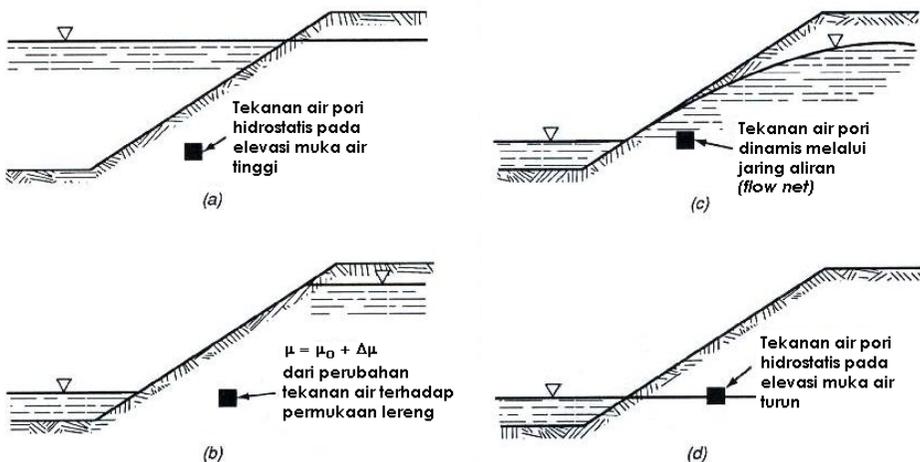
2.3 MEKANISME TANAH LONGSOR

Varnes (1978) menyebutkan bahwa proses tanah longsor merupakan rangkaian kejadian yang menerus dari penyebab

(*causes*) hingga dampak (*effect*). Menghilangkan faktor penyebab tanah longsor, meskipun kelihatannya mudah dilakukan, akan tetapi hal itu tidak selalu bisa dilakukan. Pada beberapa kasus, melakukan perbaikan dampak tanah longsor lebih ekonomis daripada menghilangkan faktor penyebab seperti dijelaskan di atas.

Suatu lereng akan mengalami keruntuhan atau longsor secara mekanika disebabkan oleh dua komponen yaitu meningkatnya tegangan geser dan berkurangnya kuat geser. Peningkatan tegangan geser pada lereng dapat disebabkan karena beberapa hal yaitu :

- 1) penambahan beban pada lereng seperti penambahan struktur bangunan dan timbunan di bagian atas lereng,
- 2) meniadakan struktur perkuatan karena pemotongan dan pemindahan bagian kaki lereng, atau keruntuhan lereng yang tertahan (*retarded slope failure*),
- 3) perubahan tinggi muka air tanah yang sangat cepat pada lereng (*sudden drawdown*) seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3,
- 4) gaya dari gempa bumi yang menyebabkan meningkatnya gaya yang mendorong blok tanah pada arah horizontal.



Gambar 2.3 Mekanisme perubahan tinggi muka air yang sangat cepat (Ralph dan Peck, 1967).

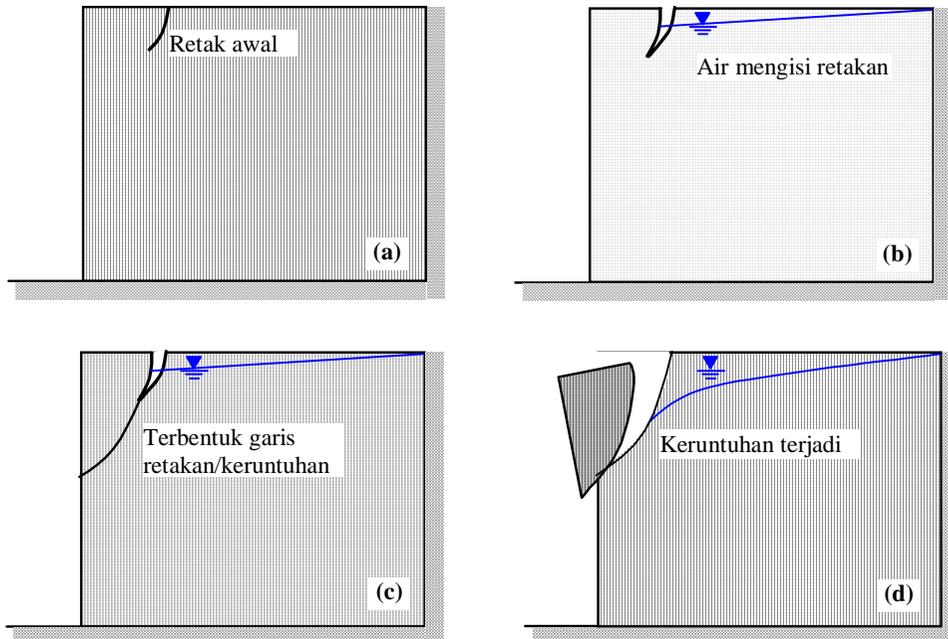
Ralph dan Peck (1967) menyebutkan terkait penyebab pertama bahwa bila pada area yang pernah terjadi longsor kemungkinan tidak akan terjadi longsor lagi maka biasanya aktifitas konstruksi akan segera dimulai di dekat area tersebut. Namun, bila area longsor tersebut kemungkinan terjadi lagi, maka konstruksi sekecil apapun akan menyebabkan longsor yang lebih luas.

Berkurangnya kuat geser dapat ditimbulkan karena beberapa faktor yaitu :

- 1) meningkatnya tekanan air pori karena infiltrasi air ke dalam lereng, debit air yang tidak terkontrol pada saluran drainase, atau gempa bumi yang mengakibatkan naiknya tekanan air pori,
- 2) tanah pada lereng mengandung mineral lempung yang mengembang sehingga mudah menyerap air tetapi dapat menghilangkan lekatan tanah,
- 3) pelapukan dan degradasi fisika - kimia karena pertukaran ion, proses hidrolisis, penggaraman,
- 4) keruntuhan yang bertahap karena penguatan regangan geser (*shear strain softening*).

Muntohar (2006) membuat suatu kajian terhadap mekanisme keruntuhan lereng karena infiltrasi air. Dari beberapa hasil uji keruntuhan ini dapat terlihat bahwa bentuk keruntuhan yang terjadi pada satu benda uji dengan benda uji yang lain berbeda. Namun, mempunyai mekanisme keruntuhan yang sama seperti dijelaskan dalam Gambar 2.4. Berdasarkan gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa keretakan (*crack*) tanah terjadi pada permukaannya terlebih dahulu (Fase I), kemudian akibat adanya rembesan air dalam tanah akan menyebabkan terbentuknya aliran air pada bagian lereng tersebut (Fase II), genangan air yang terjadi pada permukaan tanah merupakan akibat dari tekanan air yang naik dari dalam tanah yang akan menimbulkan erosi di permukaan tanah tersebut. Selanjutnya keretakan itu semakin lama akan semakin memanjang di sepanjang permukaan tanah dan membuat garis keruntuhan pada lereng (Fase III) hingga akhirnya akan terjadi keruntuhan secara tiba-tiba dan membentuk blok runtuh sendiri (Fase IV).

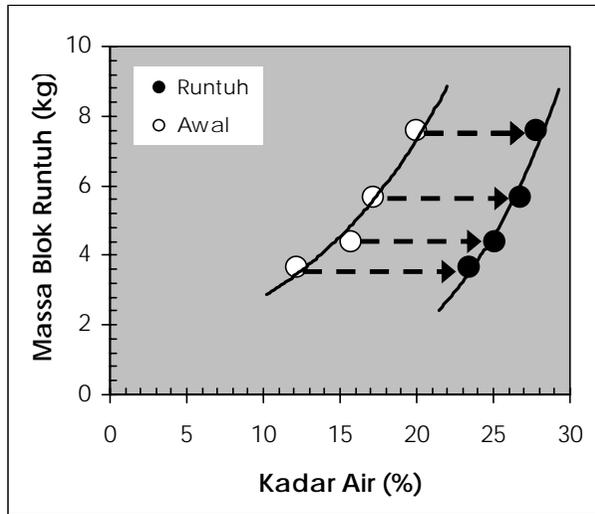
Shang-Lin dan Yu-Ku (2002) juga mensimulasikan bahwa perambatan retak (*crack propagation*) terjadi sebelum terjadinya keruntuhan.



Gambar 2. 4 Tahapan keruntuhan lereng akibat infiltrasi air (a) Tahap I: Retak awal, (b) Tahap II : Infiltrasi air, (c) Tahap III: Retak merambat, (d) Tahap IV : Keruntuhan (Muntohar, 2006).

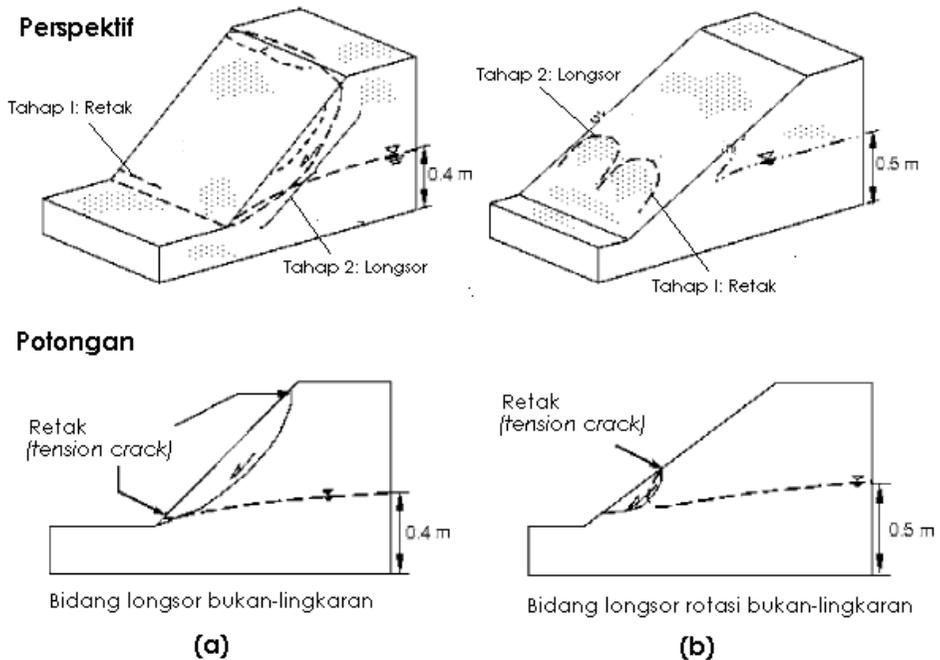
Perubahan kadar air akibat adanya resapan air yang masuk ke dalam tanah akan segera meningkatkan kadar air dan menurunkan kekuatan geser dalam tanah. Aliran air dalam tanah akan mempercepat terjadinya keruntuhan lereng karena air dapat menurunkan tingkat kelekatan butiran tanah. Semakin bertambah air yang masuk ke dalam pori-pori tanah maupun yang menggenang di permukaan tanah akan mempercepat terjadinya keruntuhan tanah. Ohsuka dan Yoshifumi (2001) menyebutkan bahwa peningkatan tekanan air pori menyebabkan terjadinya deformasi menjadi sangat cepat hingga mencapai keruntuhan. Meningkatnya tekanan air pori adalah salah satu penyebab utama keruntuhan lereng. Air yang mengalir dan mengisi retakan akan mendorong tanah ke arah lateral. Secara umum, kekuatan geser tanah akan berkurang apabila

mempunyai kadar air yang tinggi atau dalam kondisi yang sangat jenuh air. Peningkatan kadar air tanah hingga mencapai keruntuhan ditunjukkan dalam Gambar 2.5.

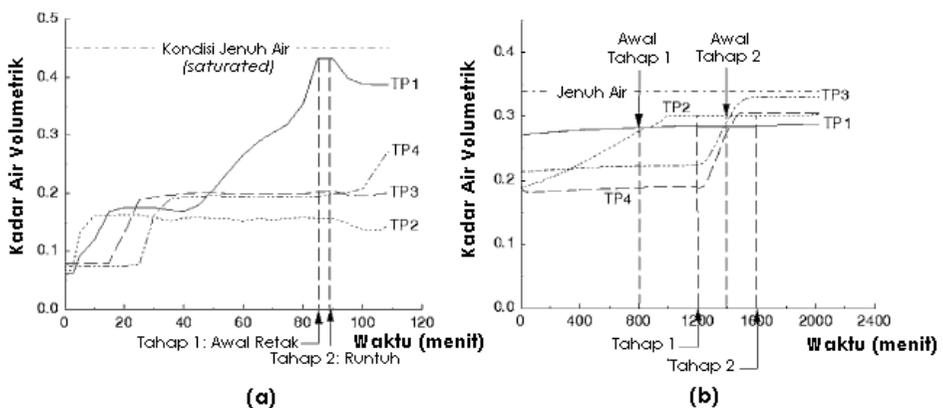


Gambar 2.5 Hubungan antara peningkatan kadar air tanah dan blok keruntuhan (Muntohar, 2006).

Mekanisme keruntuhan lereng juga dikaji oleh Tohari dkk., (2007). Pemahaman tentang mekanisme keruntuhan lereng ini menjadi penting guna menentukan sistem peringatan dini berdasarkan model fisika. Gambar 2.6 menunjukkan mekanisme keruntuhan dari dua lereng yang berbeda yang disebabkan oleh intensitas hujan yang sama 100 mm/jam. Keruntuhan pada lereng dengan kemiringan 45° (Gambar 2.6a) diawali dengan retakan yang terjadi di kaki lereng, dan tahap kedua mulai terjadi longsoran dari kaki hingga puncak lereng. Sedangkan untuk lereng dengan kemiringan 32° (Gambar 2.6b), longsoran hanya terjadi pada kaki lereng saja. Hasil pengamatan ini membuktikan bahwa lereng yang lebih curam lebih mudah mengalami keruntuhan dengan area yang lebih luas akibat adanya rembesan air hujan ke dalam tanah. Seperti halnya yang dikemukakan oleh Muntohar (2006), Tohari dkk. (2007) juga menunjukkan bahwa telah terjadi peningkatan kadar air pada lereng hingga mencapai keruntuhan (Gambar 2.7).



Gambar 2.6 Mekanisme runtuh lereng pada model lereng di laboratorium : (a) kemiringan lereng 45°, (b) kemiringan lereng 32° (Tohari dkk., 2007).



Gambar 2.7 Perubahan kadar air pada setiap tahap: (a) kemiringan lereng 45°, (b) kemiringan lereng 32° (Tohari dkk., 2007).

2.4 LATIHAN SOAL

1. Jelaskan tentang faktor penyebab dan pemicu tanah longsor !
2. Uraikan faktor-faktor penyebab terjadinya longsor !
3. Apakah yang menyebabkan lereng longsor ? Jelaskan !
4. Faktor apa saja yang dapat meningkatkan tegangan pada lereng ?

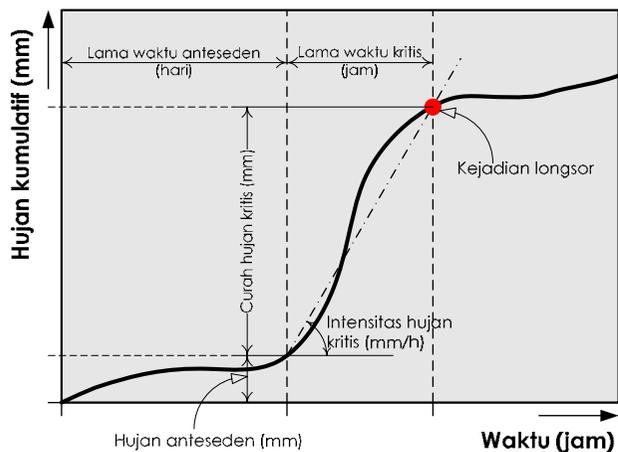
5. Apakah yang dimaksud dengan *sudden draw down* ?
6. Tanah longsor biasanya terjadi ketika hujan. Apakah dapat dikatakan bahwa hujan merupakan faktor penyebab utama longsor? Jelaskan!
7. Uraikan tentang tipikal tanah longsor !
8. Apakah perbedaan antara longsor runtuh (*falls*) dan jatuhnya (*topples*) ? Jelaskan !
9. Jelaskan perbedaan dan persamaan antara longsor debris dan debris bahan rombakan !
10. Bagaimanakah cara mengetahui bahwa suatu lereng terjadi longsor tipe rayapan (*creep*) ?
11. Bagaimanakah mekanisme longsor akibat rembesan air hujan ? Jelaskan dengan disertai gambar !
12. Suatu wilayah A dan B dihubungkan dengan jalan melalui perbukitan. Lereng di sisi jalan selalu mengalami longsor bila hujan. Apakah yang harus dilakukan agar kedua wilayah dapat terhubung kembali ? Berikan alasannya !

2.5 DAFTAR PUSTAKA DAN ACUAN

- Highland L., 2004, Landslide type and processes. Fact-Sheet No. 2004-3072, July 2004, U.S. Geology Survey.
- Muntohar, A.S., 2006. Mekanisme keruntuhan lereng tegak dan teknik perkuatannya dengan geotekstil. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 6 No.2, pp. 51-66.
- Ohtsuka, S., and Yoshifumi, 2001, Consideration on landslide mechanism based on pore water pressure loading test, The 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 27-31 August 2001, Istanbul, Turkey.
- Shang Lin, J. dan Yu Ku, C., 2002, Simulation of slope failure using a meshed based partition of unity method, The 15th Engineering Mechanics Conference (EM2002), 2-5 June 2001, Columbia University, New York.
- Tohari A., Nishigaki M., and Komatsu M., 2007. Laboratory Rainfall-Induced Slope Failure with Moisture Content Measurement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 5 pp. 575 - 587.
- TRB, 1996. *Landslide: Investigation and Mitigation*. Special Report No. 247, Transportation Research Board, National Science Council, USA.
- Varnes D.J., 1978, Slope movements, types and processes. In: "Landslides, Analysis and Control", Schuster R.L., and Krizek R.J. (Eds.), Transportation Research Board Special Report No. 176, NAS-NRC, Washington D.C., pp. 11-33.

3. AMBANG HUJAN DAN PERINGATAN DINI

Secara umum, ambang hujan (*rainfall threshold*) dapat didefinisikan sebagai batas kritis (maksimum atau minimum) jumlah hujan yang turun hingga mencapai tanah (Reichenbach, dkk. 1998). Hujan kritis adalah hujan yang diukur dari awal kejadian, yaitu pada saat intensitas hujan meningkat sangat drastis, hingga waktu kejadian tanah longsor (Gambar 3.1). Peningkatan intensitas hujan yang sangat tajam ini menyebabkan lonjakan kurva hujan kumulatif yang tiba-tiba (Aleotti, 2004).



Gambar 3.1 Parameter hujan yang digunakan untuk ambang hujan pemicu tanah longsor (dimodifikasi dari Aleotti, 2004).

Hujan dapat dikategorikan berdasarkan cakupan wilayah yaitu hujan global, regional dan lokal. Hujan global ditentukan dengan menggunakan data yang tersedia di seluruh belahan dunia. Hujan global merupakan hujan yang lebih umum tidak bergantung dengan kondisi lokal dan pola serta riwayat hujan yang terjadi pada wilayah tertentu. Cara yang paling mudah untuk mendefinisikan hujan global ini adalah dengan mengetahui nilai batas bawah pada semua data rekaman hujan yang dihasilkan pada peristiwa tanah longsor. Hujan regional didefinisikan sebagai kumpulan data hujan pada wilayah-wilayah yang memiliki kesamaan karakteristik secara meteorologi, geologi dan fisiografis. Hujan local secara tegas dan implisit mempertimbangkan kondisi iklim dan geomorfologi suatu wilayah. Data-data hujan yang memicu terjadinya tanah longsor dari berbagai jenis hujan diatas dipisahkan dengan data hujan yang tidak memicu terjadinya tanah longsor. Hujan dapat ditentukan dengan menggunakan tiga pendekatan yaitu pemodelan empiric (*empirical based model*), pemodelan proses fisik (*physical-process model*) dan pemodelan statistik (*statistic-based model*) (Guzzetti, dkk. 2005)

3.1 MODEL EMPIRIK

Hujan empirik (*empirical based model*) ditentukan dengan cara mempelajari kondisi hujan yang terjadi pada longsoran lereng. Sebagian besar pemodelan empirik menunjukkan hasil yang sangat baik pada lokasi dimana model tersebut dikembangkan, akan tetapi kurang tepat jika digunakan di tempat lainnya walaupun berada dalam suatu wilayah yang sama (Crosta, 1989). Ambang hujan dalam model empirik menggunakan data riwayat hujan dari beberapa kejadian baik yang menyebabkan atau tidak memicu tanah longsor. Secara umum, ambang hujan empirik ini dapat dikelompokkan menjadi empat kategori yaitu :

- (i) ambang intensitas - lama waktu hujan (*intensity - duration/ID*),
- (ii) ambang berdasarkan jumlah total kejadian hujan,
- (iii) ambang kejadian - lama waktu hujan (*event - duration/ED*), dan
- (iv) ambang kejadian- intensitas hujan (*event - intensity/EI*).

Hubungan intensitas - lama waktu hujan paling banyak digunakan dalam beberapa pustaka. Model dituangkan menjadi

suatu kurva yang dikenal sebagai *I-D curve*. Kurva empirik ini adalah kurva batas bawah (*lower limit curve*) kejadian longsor pada saat hujan. Kurva ini akan memberikan hasil yang lebih baik bila menggunakan pula data hujan yang tidak menyebabkan terjadinya tanah longsor. Gambar 3.2 dan 3.3 menunjukkan hubungan antara intensitas hujan dan lama waktu pada pemodelan hujan empirik yang dikembangkan oleh Chelborad dkk. (2006) untuk jenis longsor dangkal di Seattle, Washington dan Chen, dkk. (2005) untuk aliran debris di Taiwan.

Karena ambang hujan didefinisikan secara empirik, maka persamaan-persamaannya bervariasi dari satu lokasi ke lokasi yang lain. Sehingga, ketepatan hubungan tersebut dapat dikategorikan dalam lingkup global, regional dan lokal. Tabel 3.1 menampilkan 52 model persamaan empirik yang diusulkan oleh beberapa peneliti. Masing-masing persamaan empirik tersebut ditampilkan dalam suatu kurva seperti pada Gambar 3.4. Berdasarkan persamaan-persamaan empirik pada Tabel 3.1, kurva ID dapat dituliskan dalam suatu bentuk yang umum yaitu :

$$I = c + \alpha \cdot D^{\beta} \quad (0.1)$$

dengan,

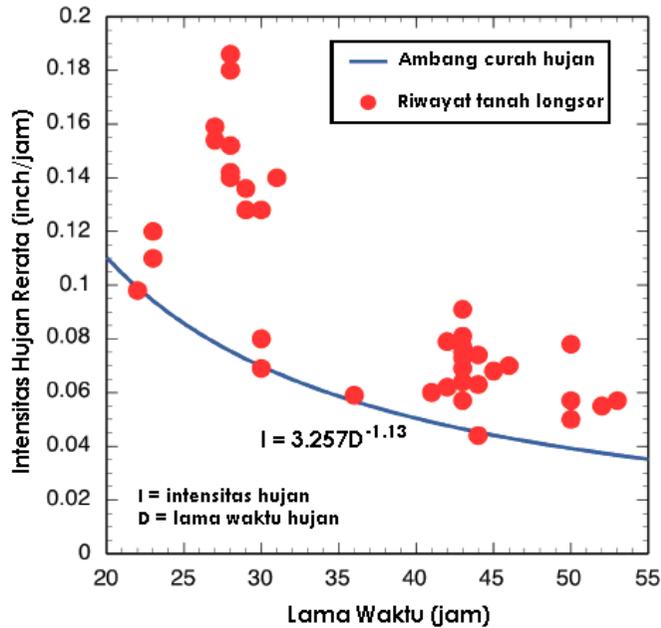
I = intensitas hujan,

D = lama waktu hujan,

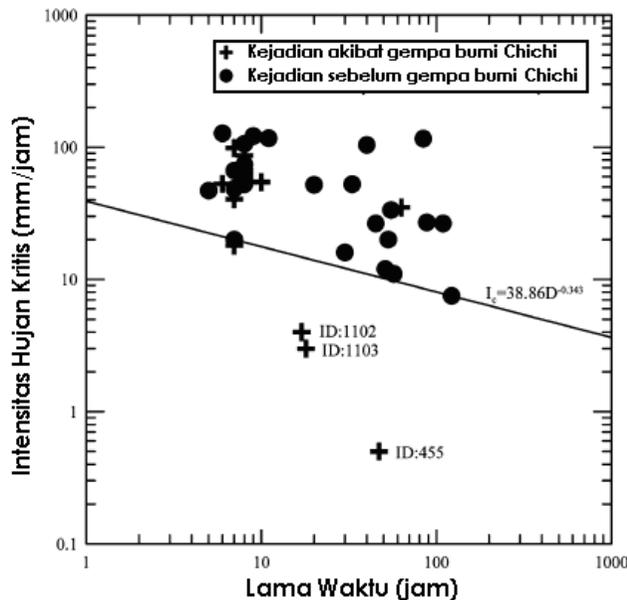
c , α , dan β = parameter empirik.

Persamaan empirik pada Tabel 3.1 memiliki batasan intensitas dan lama waktu masing-masing. Secara umum, batasan lama waktu hujan berkisar antara 1 hingga 100 jam, dan rentang intensitas dari 1 hingga 200 mm (Gambar 3.4). Sebagian besar persamaan ambang ID (45 persamaan) memiliki nilai parameter $c = 0$. Untuk $c = 0$, maka persamaan 3.1 mengikuti model *simple power law*. Keseluruhan persamaan yang disajikan dalam Tabel 3.1 memiliki nilai eksponensial (β) negatif yang berkisar antara -2,0 hingga -0,19, dan parameter α berada dalam rentang 4,0 hingga 176,4. Secara konsep, bentuk eksponensial negatif memiliki keterbatasan untuk periode waktu yang lebih panjang (contohnya $D > 500$ jam). Pada kondisi ini sangat dimungkinkan bahwa untuk intensitas hujan

yang rendah menghasilkan longsor. Untuk mengatasi keterbatasan ini, beberapa peneliti (seperti Cannon dan Ellen, 1985; Wieczorek, 1987; Crosta and Frattini, 2001) mengusulkan bagian kurva asimtotik dengan nilai $\beta = -1$ untuk lama waktu hujan yang panjang.



Gambar 3.2 Ambang intensitas hujan dan lama waktu untuk jenis longsor dangkal (Chleborad dkk., 2006)



Gambar 3. 3 Ambang hujan empirik untuk aliran debris di Taiwan (Chen dkk., 2005).

Ambang hujan global masih dapat digunakan pada cakupan local atau regional bila terdapat informasi tentang hujan di wilayah tersebut. Ketersediaan informasi untuk ambang hujan regional akan lebih baik dan dapat dikembangkan menjadi suatu sistem peringatan dini tanah longsor (*early warning system*) bila dikombinasikan dengan perkiraan atau pengukuran hujan pada wilayah tersebut.

Tabel 3. 1 Persamaan-persamaan empirik ambang intensitas hujan - lama waktu pemicu longsor (Guzzetti dkk., 2007).

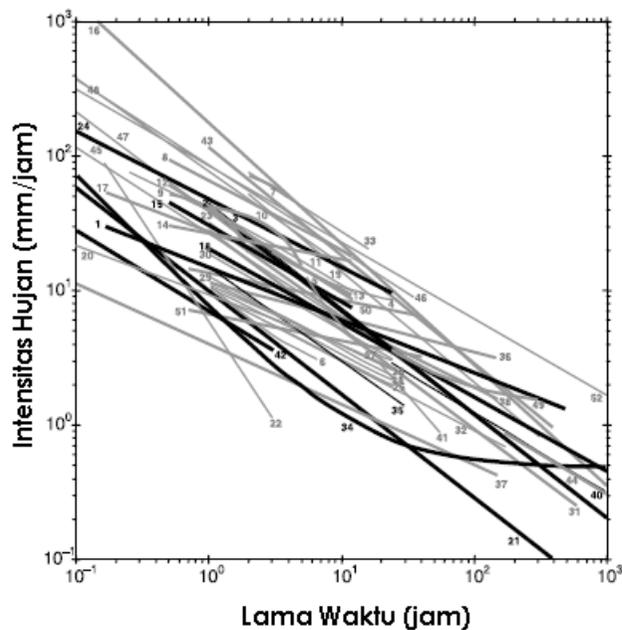
No.	Sumber	Sifat	Wilayah	Jenis Longsor	Persamaan	Batasan
1	Caine (1980)	G	Dunia	Sh, D	$I = 14,82D^{-0,39}$	$0,167 < D < 500$
2	Moser & Hohensinn (1983)	R	Austria	S	$I = 41,66D^{-0,77}$	$1 < D < 1000$
3	Cancelli & Nova (1985)	L	Northern Italy	S	$I = 44,67D^{-0,78}$	$1 < D < 1000$
4	Cannon & Ellen (1985)	L	San Fransisco	D	$I = 6.9 + 38D^{-1,0}$	$2 < D < 24$
5	Cannon & Ellen (1985)	L	San Fransisco	D	$I = 2.5 + 300D^{-2,0}$	$5.5 < D < 24$
6	Wieczorek (1987)	L	Santa Cruz	D	$I = 1.7 + 9D^{-1,0}$	$1 < D < 6.5$
7	Jibson (1989)	R	Indonesia	D	$I = 92,06 - 10,68D$	$2 < D < 4$
8		R	Puerto Rico	D	$I = 66,18D^{-0,52}$	$0,5 < D < 12$
9		R	Brazil	D	$I = 63,38 - 22,19D$	$0,5 < D < 2$
10		R	China	D	$I = 49,11 - 6,81D$	$1 < D < 5$
11		R	Hong Kong	D	$I = 41,83D^{-0,58}$	$1 < D < 12$
12		R	Japan	D	$I = 39,71D^{-0,62}$	$0,5 < D < 12$
13		R	California	D	$I = 35,23D^{-0,54}$	$3 < D < 12$
14		R	California	D	$I = 26,51D^{-0,19}$	$0,5 < D < 12$
15		G	Dunia	D	$I = 30,53D^{-0,57}$	$0,5 < D < 12$
16	Gudagno (1991)	R	Southern Italy	D	$I = 176,40D^{-0,90}$	$0,1 < D < 1000$
17	Rodolfo Arguden (1991)	L	Mayon, Philippine	L	$I = 27,3D^{-0,38}$	$0,167 < D < 3$
18	Ceriani (1992)	dkk R	Northern Italy	A	$I = 20,1D^{-0,55}$	$1 < D < 1000$
19	Larsen & Simon (1993)	R	Puerto Rico	A	$I = 91,46D^{-0,82}$	$2 < D < 312$
20	Arboleda & Martinez (1996)	L	Philippine	L	$I = 9,23D^{-0,37}$	$0,08 < D < 7,92$
21	Clarizia	dkk G	Dunia	S	$I = 10D^{-0,77}$	$0,1 < D < 1000$

No.	Sumber	Sifat	Wilayah	Jenis Longsor	Persamaan	Batasan
	(1996)					
22	Tungol & Regalado	L	Philippine	L	$I = 5,94 \cdot D^{-1,50}$	$0,167 < D < 3$
23	Zimmermann dkk (1997)	R	Switzerland	A	$I = 32D^{-0,70}$	$1 < D < 45$
24	Paronuzzi dkk (1998)	R	Alps, Italy	D	$I = 47,742D^{-0,507}$	$0,1 < D < 24$
25	Bolley & Olliaro (1999)	L	Piedmont, Italy	D	$I = 9,521D^{-0,4955}$	$1 < D < 24$
26		L	Piedmont, Italy	D	$I = 11,698D^{-0,4783}$	$1 < D < 24$
27		L	Piedmont, Italy	D	$I = 11D^{-0,4459}$	$1 < D < 24$
28		L	Piedmont, Italy	D	$I = 10,67D^{-0,5043}$	$1 < D < 24$
29		L	Piedmont, Italy	D	$I = 12,649D^{-0,5324}$	$1 < D < 24$
30		L	Piedmont, Italy	D	$I = 18,675D^{-0,565}$	$1 < D < 24$
31	Calcaterra dkk (2000)	R	Campania, Italy	A	$I = 28,1D^{-0,74}$	$1 < D < 600$
32	Montgomery dkk (2000)	L	Oregon	A	$I = 9,9D^{-0,52}$	$1 < D < 170$
33	Wieczorek dkk (2000)	L	Virginia	D	$I = 116,48D^{-0,63}$	$2 < D < 16$
34	Crosta & Frattini (2001)	G	Dunia	Sh	$I = 0,48 + 7.2D^{-1,0}$	$0,1 < D < 1000$
35	Marchi dkk (2002)	L	Torent, Italy	A	$I = 15D^{-0,70}$	$1 < D < 30$
36	Ahmad (2003)	R	Jamaica	Sh	$I = 11,5D^{-0,26}$	$1 < D < 150$
37	Jakob & Weatherly (2003)	R	Vancouver, Canada	Sh	$I = 4,0D^{-0,45}$	$0,1 < D < 150$
38	Aleotti (2004)	R	Piedmont, Italy	Sh	$I = 19D^{-0,50}$	$4 < D < 120$
39	Barbero (2004)	L	Piedmont, Italy	A	$I = 44,668D^{-0,78}$ N	$1 < D < 1000$
40	Floris (2004)	L	Valzangona, Italy	A	$I = 18,83D^{-0,59}$	$24 < D < 3360$
41	Baum (2005)	L	Seattle, Washington	S	$I = 82,73D^{-1,13}$	$20 < D < 55$
42	Cannon & Gartner (2005)	G	Dunia	D	$I = 7D^{-0,60}$	$0,1 < D < 3$
43	Chien (2005)	R	Taiwan	A	$I = 115,47D^{-0,80}$	$1 < D < 400$
44	Corominas	R	Spain	A	$I = 17,96D^{-0,59}$	$D > 168$

No.	Sumber	Sifat	Wilayah	Jenis Longsor	Persamaan	Batasan
	dkk (2005)					
45	Giannecchini (2005)	L	Tuscany, Italy	Sh	$I = 26,871D^{-0,638}$	$0,1 < D < 35$
46		L	Tuscany, Italy	Sh	$I = 85,584D^{-0,781}$	$0,1 < D < 35$
47		L	Tuscany, Italy	Sh	$I = 38,363D^{-0,743}$	$0.1 < D < 12$
48		L	Tuscany, Italy	Sh	$I = 76,199D^{-0,692}$	$0.1 < D < 12$
49	Hong (2005)	dkk R	Shikoku, Japan	A	$I = 1,35 + 55D^{-1,0}$	$24 < D < 300$
50	Jan & Chen (2005)	R	Taiwan	D	$I = 13,5D^{-0,20}$	$0,7 < D < 40$
51		R	Taiwan	D	$I = 6,7D^{-0,20}$	$0,7 < D < 40$
52	Zezere (2005)	dkk L	Lisbon, Portugal	A	$I = 84,3D^{-0,57}$	$0,1 < D < 2000$

Keterangan:

Sifat : G = global, R = regional, L = lokal. Jenis Longsor : D = debris, S = longsor gelincir, Sh = longsor dangkal, L = lahar, A = semua. Persamaan : I = intensitas hujan (mm/h), D = lama waktu hujan (jam)



Gambar 3.4 Kurva intensitas hujan - lama waktu (angka pada grafik adalah nomor urut persamaan sesuai Tabel 3.1)

Analisis Gambar 3.4 menunjukkan bahwa ambang lokal sedikit lebih besar daripada ambang regional. Hal ini mengindikasikan

bahwa pada lama waktu tertentu, prediksi hujan yang memicu longsor dari ambang lokal lebih besar daripada intensitas hujan rerata ambang regional dan global. Rentang lama waktu pada ambang lokal sangat terbatas bila dibandingkan dengan ambang regional dan global. Ambang hujan regional dan lokal masih dapat digunakan untuk memprediksi di wilayah lain yang memiliki karakteristik morfologi dan litologi yang sama apabila kurva ID mempertimbangkan pengaruh meteorology dan perubahan iklim. Untuk itu beberapa usaha yang dapat dilakukan adalah dengan cara membuat normalisasi intensitas hujan dengan nilai empirik dari iklim lokal setempat. Normalisasi yang lazim dilakukan adalah membagi intensitas hujan dengan curah hujan tahunan rata-rata (*mean annual precipitation*/MAP) (Cannon, 1988; Jibson, 1989; Ceriani dkk., 1992; Paronuzzi dkk., 1998; Wieczorek dkk., 2000; Aleotti dkk., 2002; Bacchini and Zannoni, 2003). Beberapa persamaan untuk model normalisasi intensitas dan lama waktu hujan disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Persamaan-persamaan empirik ambang intensitas hujan ternormalisasi - lama waktu hujan (Guzzetti dkk., 2007)

No.	Sumber	Sifat	Wilayah	Jenis Longsor	Persamaan	Batasan
53	Cannon (1988)	L	San Fransisco, California	D	$D = 46,1 - 3,6 \cdot 10^3 \times I_{MAP} + 7,4 \cdot 10^4 \times (I_{MAP})^2$	$1 < D < 24$
54	Jibson (1989)	R	Indonesia	D	$I_{MAP} = 0,07 - 0,01 \times D^1$	$2 < D < 4$
55		R	Puerto Rico	D	$I_{MAP} = 0,06 D^{-0,59}$	$1 < D < 12$
56		R	Brazil	D	$I_{MAP} = 0,06 - 0,02 \times D^1$	$0,5 < D < 2$
57		R	Hong Kong	D	$I_{MAP} = 0,02 D^{-0,68}$	$1 < D < 12$
58		R	Japan	D	$I_{MAP} = 0,03 D^{-0,63}$	$1 < D < 12$
59		R	California	D	$I_{MAP} = 0,03 D^{-0,33}$	$1 < D < 12$
60		R	California	D	$I_{MAP} = 0,03 D^{-0,21}$	$0,5 < D < 8$
61		G	Dunia	D	$I_{MAP} = 0,02 D^{-0,65}$	$0,5 < D < 12$
62	Ceriani (1992) dkk	R	Northern Italy	D	$I_{MAP} = 2,0 D^{-0,55}$	$1 < D < 100$
63	Paronuzzi (1998) dkk	R	Alps, Italy	D	$I_{MAP} = 0,026 D^{-0,507}$	$0,1 < D < 24$
64	Wieczorek (2000) dkk	L	Blue Ridge, Virginia	D	$I_{MAP} = 0,09 D^{-0,63}$	$2 < D < 16$
65	Aleotti dkk	L	Piedmont,	Sh	$I_{MAP} = 1,112 D^{-0,248}$	$1 < D < 200$

No.	Sumber	Sifat	Wilayah	Jenis Longsor	Persamaan	Batasan
	(2002)		Italy			
66		L	Piedmont, Italy	Sh	$I_{MAP} = 0,62D^{-0,228}$	$1 < D < 200$
67		L	Piedmont, Italy	Sh	$I_{MAP} = 1,61D^{-0,464}$	$1 < D < 200$
68		L	Piedmont, Italy	Sh	$I_{MAP} = 1,68D^{-0,553}$	$1 < D < 200$
69	Bacchini & Zannoni (2003)	L	Dolomites, Italy	D	$I_{MAP} = 0,74D^{-0,56}$	$0,1 < D < 100$
70	Aleotti (2004)	L	Piedmont, Italy	Sh	$I = 0,76D^{-0,33}$	$2 < D < 150$
71		L	Piedmont, Italy	Sh	$I = 4,62D^{-0,79}$	$2 < D < 150$

Keterangan:

Sifat : G = global, R = regional, L = lokal. Jenis Longsor : D = debris, S = longsor gelincir, Sh = longsor dangkal, Persamaan : I_{MAP} = intensitas hujan ternormalisasi (h^{-1}), D = lama waktu hujan (jam)

3.2 MODEL FISIKA

Model fisika atau proses (*process-based model*) digunakan untuk mengkorelasikan data hujan lokal maupun regional dengan data karakteristik wilayah seperti kemiringan lereng, jenis tanah, litologi, geologi, dan sebagainya. Model fisika ini lazimnya didasarkan pada pendekatan modelan hidraulik - hidrologi. (Montgomery dan Dietrich, 1994; Crosta, 1998; Terlien, 1998). Pemodelan fisik dikalibrasikan menggunakan data hujan dari pengukuran hujan dengan lokasi serta waktu dimana terjadinya longsor.

Pemodelan fisika ini kurang dikembangkan secara luas karena membutuhkan peralatan yang kompleks seperti pengukur hujan, pengukur tekanan air (*piezometer* dan *tensiometer*) untuk memperoleh data kondisi suatu wilayah. Model fisika ini memodelkan ambang hujan berdasarkan model hidrologi dan hidraulika (Borga dkk, 1998; Cho dan Lee, 2002; Frattini dkk, 2004). Untuk mengevaluasi longsor atau tidaknya suatu lereng, pemodelan fisika ini juga diintegrasikan dengan analisis stabilitas lereng seperti model lereng tak-hingga (*infinite slope model*) yang biasanya digunakan dalam disiplin geoteknik (Wu and Sidle, 1995; Iverson, 2000). Model hidrologi yang banyak digunakan dalam pemodelan fisika adalah model infiltrasi air seperti model fisik Green dan Ampt, persamaan Philip atau persamaan Richard (Chow

dkk., 1988). Secara konsep, ambang hujan yang dihasilkan dari model fisika ini bersifat lokal hingga regional.

Pradel dan Raad (1993) mengusulkan suatu kurva hubungan intensitas dan lama waktu hujan untuk mengevaluasi keruntuhan lereng jenis longsor dangkal (Gambar 3.5). Model fisika dibuat berdasarkan model infiltrasi Green - Ampt. Pada model ini, diasumsikan lereng akan mengalami keruntuhan bila permukaan tanah mencapai derajat jenuh air hingga zona pembasahan (*wetting front*). Berdasarkan model tersebut, waktu yang diperlukan T_w untuk menjenuhkan permukaan lereng hingga kedalaman Z_w adalah :

$$T_w = \frac{\mu}{k_s} \left[Z_w - S \cdot \ln \left(\frac{S + Z_w}{S} \right) \right] \quad (0.2)$$

dengan,

k_s = koefisien permeabilitas tanah,

μ = porositas tanah,

S = tekanan air pori negatif (*suction*) pada zona pembasahan,

Z_w = kedalaman zona pembasahan.

Kecepatan infiltrasi air v_i yang masuk ke dalam permukaan tanah, menurut model Green - Ampt :

$$v_i = k_s \left(\frac{S + Z_w}{Z_w} \right) \quad (0.3)$$

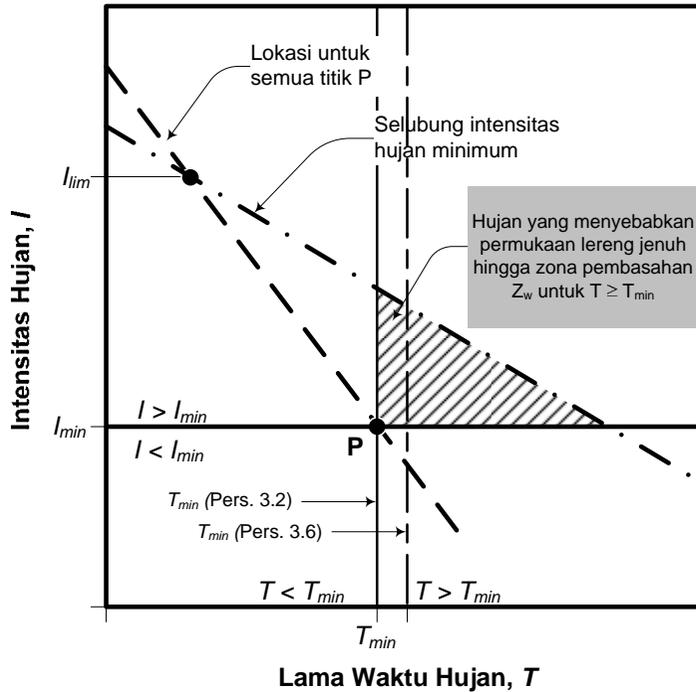
Model fisik ini menganggap bahwa sebelum mengalami keruntuhan, suatu lereng harus mencapai derajat jenuh air. Mengacu asumsi ini maka intensitas hujan harus lebih besar dari kecepatan infiltrasi dan curah hujan harus berlangsung lebih lama dari waktu T_w (Persamaan (0.2)). Kedua kondisi ini dapat menentukan kedalaman zona pembasahan yang diperlukan untuk mencapai kondisi jenuh air. Maka :

$$T_{\min} = T_w \quad (0.4)$$

$$I_{\min} = v_i \quad (0.5)$$

Digunakan Persamaan (0.2), (0.4) dan (0.5), maka akan dihasilkan hubungan antara intensitas hujan I_{\min} dan lama waktu hujan T_{\min} :

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} \left[Z_w - S \cdot \ln \left(\frac{S + Z_w}{S} \right) \right] \left(\frac{S + Z_w}{Z_w} \right) \quad (0.6)$$



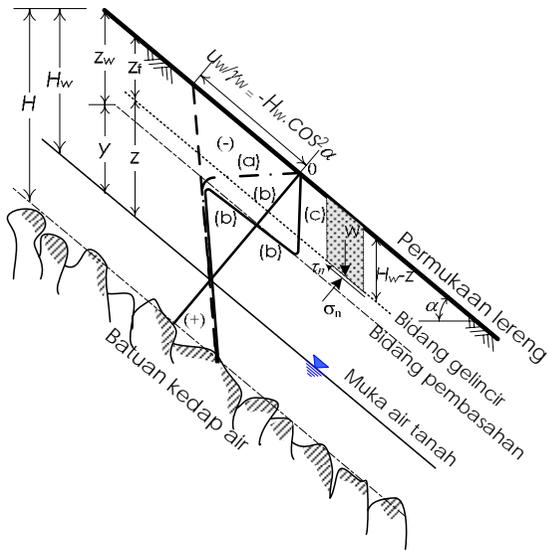
Gambar 3.5 Ambang intensitas hujan yang menyebabkan permukaan lereng jenuh air hingga zona pembasahan (dimodifikasi dari Pradel & Raad, 1993).

Cho dan Lee (2002) memodifikasi Persamaan (0.2) dengan mempertimbangkan pengaruh air yang berada di atas permukaan lereng (*ponding*). *Ponding* terjadi bila permukaan tanah mencapai jenuh air. Maka, waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat jenuh air hingga ke zona pembasahan menjadi :

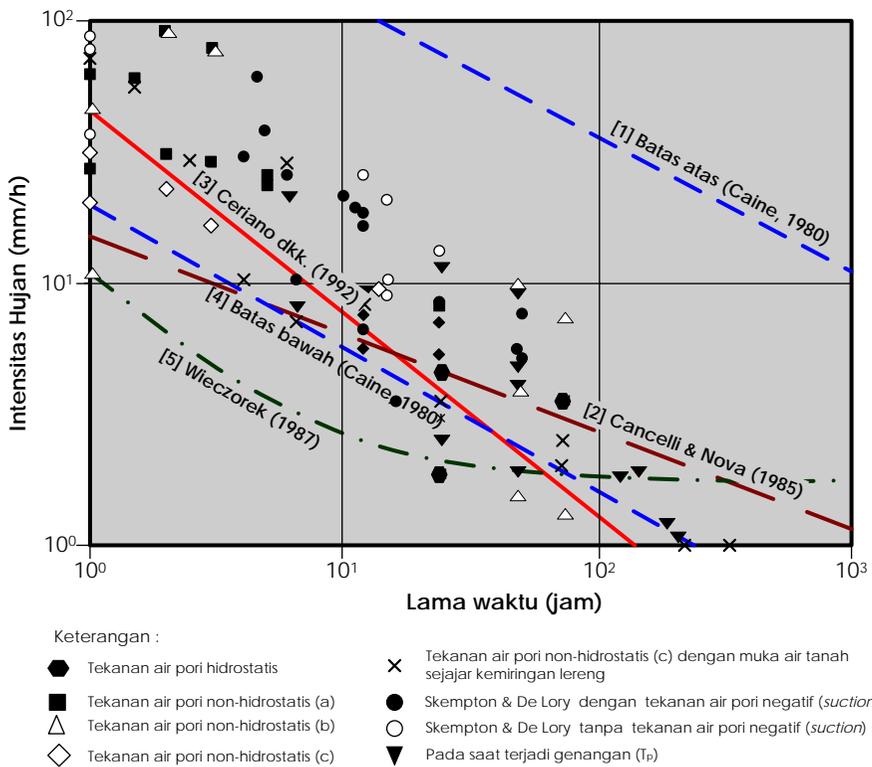
$$T_{w(p)} = T_p + \frac{\mu}{k_s} \left[Z_w - Z_p + S \cdot \ln \left(\frac{S + Z_p}{S + Z_w} \right) \right] \quad (0.7)$$

dengan, $T_p = \frac{k_s \cdot \mu \cdot S}{(v_i - k_w)}$ (0.8)

T_p adalah waktu yang dicapai pada saat terjadi *ponding*. Hubungan intensitas - lama waktu hujan tersebut dapat dibuat dengan berbagai kala ulang hujan untuk menentukan curah hujan kritis pemicu longsor.



(a) Model fisik untuk lereng dengan jenis longsor dangkal.



(b) Kurva intensitas hujan - lama waktu untuk model fisik

Gambar 3.6 Validasi kurva ambang hujan dengan model fisik (dimodifikasi dari Crosta, 1998)

Crosta (1998) menggunakan model analisis lereng tak-hingga dan model rembesan air tanah paralel dengan kemiringan lereng (Gambar 3.6a). Stabilitas lereng ditentukan dengan beberapa kondisi tekanan air pori. Selanjutnya, hasil analisis stabilitas lereng ini divalidasi dengan kurva ID (Gambar 3.6b). Ambang hujan batas bawah yang diusulkan oleh Caine (1980) lebih sesuai digunakan sebagai ambang hujan untuk lokasi lereng yang dikaji oleh Crosta (1998).

Matsushi dan Matsukura (2007) mengembangkan model ambang hujan untuk jenis longsoran dangkal berdasarkan data pengukuran tekanan air pori yang dikombinasikan dengan analisis lereng tak-hingga. Hubungan antara intensitas hujan dan waktu/durasi diberikan melalui persamaan sebagai berikut :

$$I = 176,7 D^{-0,91} ; \text{ untuk } 8 \text{ h} < D < 80 \text{ h} \quad (0.9)$$

$$I = 44,9 D^{-0,70} ; \text{ untuk } 2 \text{ h} < D < 15 \text{ h} \quad (0.10)$$

Muntohar dan Liao (2009) membuat kurva ambang hujan ternormalisasi berdasarkan model fisik infiltrasi hujan dan stabilitas lereng tak-hingga. Pengembangan model ini akan dijelaskan lebih rinci dalam Bab V selanjutnya. Model ini mengangg bahwa longsor dipicu oleh kombinasi intensitas hujan dan hujan kumulatif selama periode tertentu. Intensitas hujan dan hujan kumulatif tersebut dinormalisasi dengan parameter fisik lereng (yaitu sudut kemiringan lereng), hidraulik (yaitu kadar air volumetrik dan koefisien permeabilitas tanah jenuh air) dan mekanik tanah (yaitu tekanan *suction*). Persamaan (3.11) memberikan rumusan hujan kumulatif dan intensitas hujan ternormalisasi.

$$\begin{aligned} NAR &= \frac{R(t)}{(k_s \cdot \cos \beta \cdot \psi_f \Delta \theta)} \\ NRI &= \frac{I(t)}{(k_s \cdot \cos \beta \cdot \psi_f \Delta \theta)} \end{aligned} \quad (0.11)$$

dengan,

NAR = hujan kumulatif ternormalisasi (h/mm),

NRI = intensitas hujan ternormalisasi (mm^{-1}),

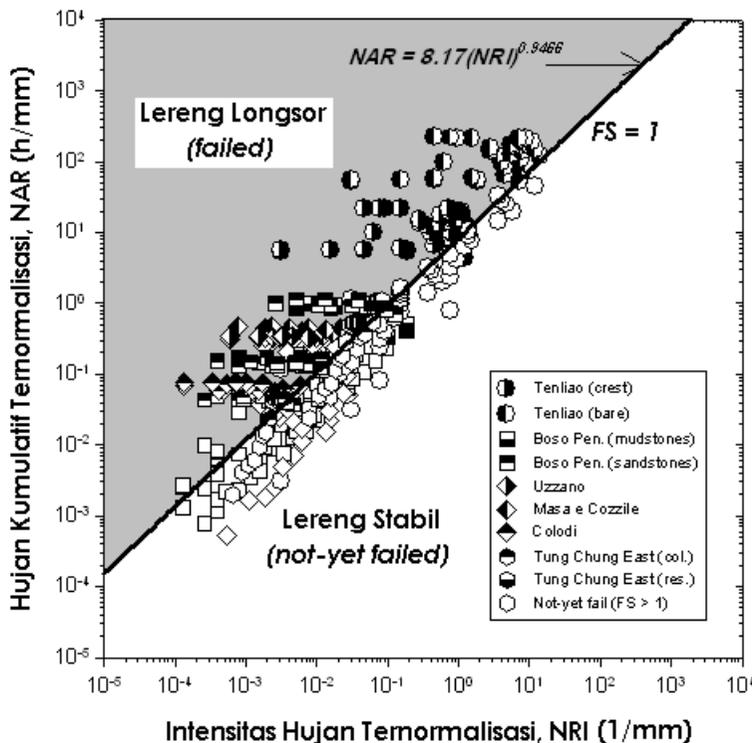
$R(t)$ = hujan kumulatif (mm) pada waktu t ,

- $I(t)$ = intensitas hujan (mm/h) pada waktu t ,
- k_s = koefisien permeabilitas tanah jenuh air (mm/h),
- $\Delta\theta$ = kadar air volumetrik tanah,
- ψ_f = tinggi tekanan *suction* pada zona pembasahan (mm),
- β = sudut kemiringan lereng.

Ketiga parameter pembagi yaitu k_s , $\Delta\theta$, dan ψ_f merupakan parameter yang digunakan dalam persamaan infiltrasi Green - Ampt.

Prinsip dari model yang dikembangkan adalah menghubungkan hujan yang menghasilkan lereng dalam kondisi kritis dimana nilai faktor keamanan lereng sama dengan satu (FS = 1). Bila dibuatkan menjadi suatu grafik (Gambar 3.7), garis yang menghubungkan nilai-nilai hujan pada kondisi FS = 1 diberikan oleh Persamaan (3.12) berikut :

$$NAR = 8,17 (NRI)^{0,9466} \tag{0.12}$$



Gambar 3. 7 Kurva ambang hujan ternormalisasi berdasarkan model fisik (Muntohar dan Liao, 2009).

Persamaan (0.12) tidak hanya memberikan informasi tentang potensi longsor pada kurun waktu hujan tertentu, tetapi dapat pula digunakan untuk memperkirakan lama waktu hujan kritis yang memicu longsor. Turunan Persamaan(0.12), yaitu gradien dari garis $(\Delta y/\Delta x)$ dalam Gambar 3.7 merupakan lama waktu hujan (ΔT) yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\Delta T = 7,734 (NRI)^{-0.0534} \quad (0.13)$$

Satuan dari ΔT adalah jam (h).

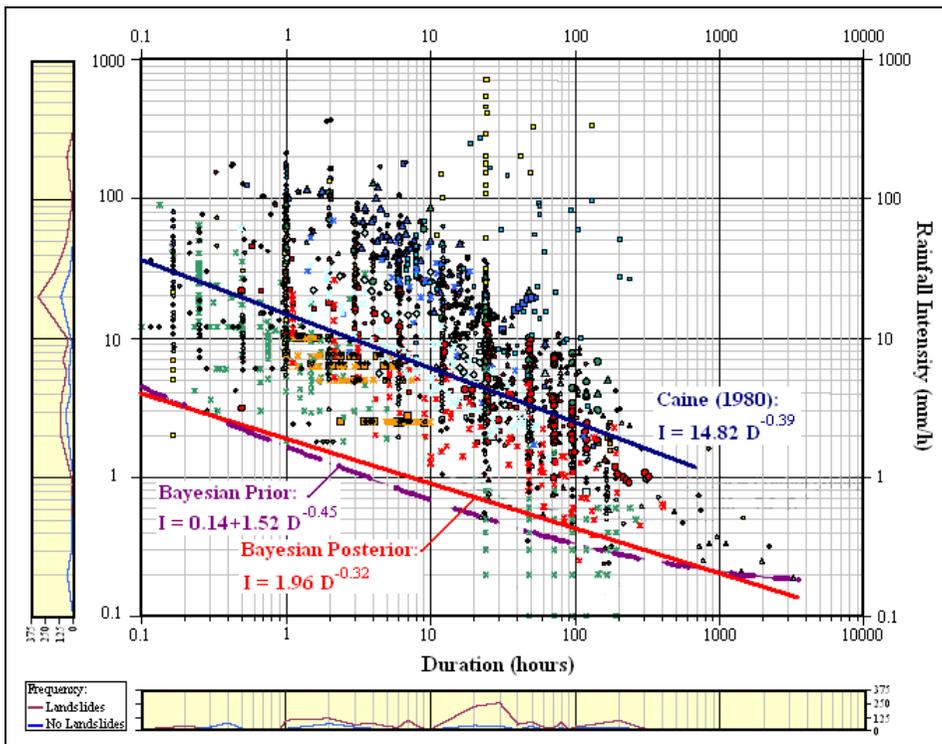
Pemodelan fisika lebih sesuai dikembangkan untuk menentukan jumlah hujan, lokasi dan waktu yang memungkinkan terjadinya longsor, mempermudah dalam pembuatan sistem peringatan dini tanah longsor. Akan tetapi, keterbatasan model fisika ini kesulitan ketersediaan data yang akurat terutama untuk cakupan wilayah yang lebih luas. Informasi detail tentang kondisi hidrologi, litologi, morfologi, dan karakteristik tanah yang merupakan parameter untuk mengetahui kemungkinan terjadinya tanah longsor jarang sekali tersedia lengkap, sehingga membutuhkan instrumentasi dan penyelidikan lapangan yang lebih lanjut.

3.3 MODEL STATISTIKA

Dalam usaha untuk mengurangi subjektivitas pada pemilihan batasan hujan, sebuah model statistika Bayesian digunakan untuk menentukan perbedaan batasan rendah dari hujan. Analisis Bayesian adalah sebuah analisis statistic yang berusaha untuk mengukur parameter-parameter tertentu pada area dengan distribusi data terbanyak berdasarkan penyebaran data yang diamati. Setiap data intensitas dan durasi hujan dianggap sebagai variable yang independent dan tidak berkorelasi. Kumpulan data-data intensitas dan durasi digabungkan untuk mendapatkan sebuah garis kemungkinan (*likelihood*) yang bisa digunakan untuk memprediksi terjadinya tanah longsor. Area kemungkinan ini dihitung sebagai sebuah fungsi dari nilai parameter-parameter yang ada. Analisis Bayesian terlebih dahulu menyediakan sebuah pemodelan prediksi dari nilai parameter-parameter yang berkorelasi

kemudian, pemodelan prediksi ini dikoreksi dengan model lain yang berasal dari data-data pengukuran/observasi. Garis kemungkinan tersebut membentuk deskripsi statistika Bayesian awal (*prior Bayesian*) dari parameter-parameter yang ada kedalam sebuah garis distribusi Bayesian yang baru (*posterior Bayesian*). Pada model yang diadopsi, Guzzetti dkk (2005) mengasumsikan distribusi awal (*prior distribution*) sebagai distribusi Pareto, yang menentukan secara acak kemungkinan luasnya area longsor.

Menggunakan model Bayesian dan memperhatikan data yang tersedia, Guzzetti dkk (2005) menentukan batasan hujan berdasarkan hubungan antara intensitas dan durasi/waktu (garis merah pada Gambar 3.8). Garis batasan yang diberikan tersebut lebih rendah dibandingkan dengan garis batasan yang direkomendasikan oleh Caine (1980). Untuk durasi yang lebih pendek dan lebih lama, garis batasan tersebut memprediksi intensitas hujan pada level yang lebih rendah untuk permulaan terjadinya tanah longsor.



Gambar 3.8 Ambang hujan batas bawah dihitung dengan model statistika Bayesian (Guzzetti et al., 2005).

3.4 KELEBIHAN DAN KETERBATASAN AMBANG HUJAN

Keunggulan utama yang dimiliki oleh metode batasan empiric hujan untuk memprediksi terjadinya tanah longsor adalah sederhana dan tidak mahal ketika akan memprediksi wilayah yang cukup luas. Ketika informasi tentang tanah longsor dan hujan tersedia, plot data dapat dilakukan dan garis batasan dapat digunakan untuk menentukan batas awal terjadinya longsor pada lereng.

Kendala praktis yang sering dijumpai untuk menentukan ambang hujan berupa ketersediaan data yang valid, resolusi dan lamanya hujan. Selama berlangsungnya hujan, alat pengukur curah hujan mencatat data intensitas hujan yang terjadi, kemudian sesaat setelah hujan reda data tersebut dikirimkan oleh sebuah jaringan yang kemudian akan dikumpulkan sebagai data-data tanah longsor. Sehingga, kejadian tunggal yang terjadi secara intens (“ekstrim” dengan periode di atas 100 tahun) tidak dapat merepresentasikan kondisi ketidakstabilan di wilayah tersebut. Penggunaan ambang hujan yang didasarkan pada kejadian yang ekstrim dapat menimbulkan kesalahan untuk memprediksi kapan dan dimana terjadinya longsor. Oleh karena itu, rekaman data hujan yang panjang dari berbagai wilayah yang kondisi metereologinya berbeda-beda harus dianalisis untuk menemukan ambang hujan yang sesuai. Sayangnya, informasi yang memadai tentang jumlah curah hujan yang terjadi jarang tersedia (Guzzeti dkk, 2005).

Ambang hujan menggunakan hubungan antara intensitas hujan dan lama waktu, tidak memperhatikan kejadian hujan yang terdahulu. Karena itu, penggunaan metode ini kurang tepat bila digunakan untuk memprediksi kejadian longsor tipe longsor dalam (*deep-seated*) atau longsor dengan intensitas hujan yang rendah. Sehingga penentuan batasan hujan menggunakan hubungan kurva ID tidak dapat dipakai untuk memprediksi tanah longsor yang terjadi beberapa jam setelah hujan berhenti dan tidak mampu memberikan gambaran yang spesifik dan jelas lokasi terjadinya tanah longsor. Selain itu, ambang hujan menggunakan metode ini, membutuhkan data yang kualitasnya dan resolusi tinggi (minimal data hujan per jam), yang tersedia secara lokal dan pada kurun waktu yang singkat (kurang lebih 20-30 tahun). Karena

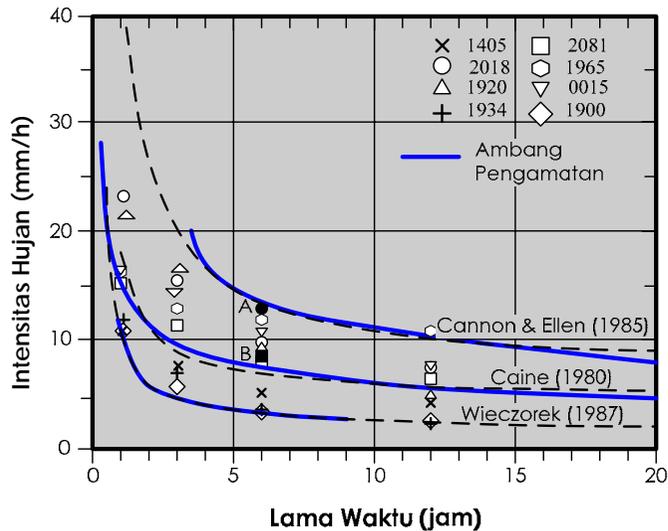
proses analisis yang cukup sulit, metode ini tidak dapat digunakan untuk menilai stabilitas lereng ketika terjadi badai dan tidak dipakai untuk memprediksi periode berkala terjadinya tanah longsor (*the return period of landslide*) (D'Odorico, dkk, 2005).

3.5 APLIKASI AMBANG HUJAN UNTUK PERINGATAN DINI

Hubungan antara hujan dan tanah longsor telah banyak diketahui, tetapi masih terdapat banyak ketidakpastian hujan yang dapat memicu terjadinya longsor. Setidaknya terdapat beberapa pertanyaan tentang hujan pemicu longsor apakah didasarkan pada hubungan hujan anteseden - intensitas hujan yang turun pada hari dimana terjadi longsor, ataukah hubungan antara hujan pemicu - intensitas hujan yang turun pada saat terjadi terjadinya longsor. Pengalaman dari beberapa wilayah di belahan dunia memberikan hasil yang berbeda-beda terhadap peran hujan anteseden sebagai pemicu tanah longsor (Morgenstern, 1992). Model empirik ambang hujan dapat dikembangkan menjadi sistem peringatan dini (*early warning system/EWS*) tanah longsor. EWS ini meliputi prakiraan dan pengukuran hujan (*forecasting and measurement*), pemantauan pada saat hujan dan kejadian longsor (*real-time monitoring*). Dengan demikian, ambang hujan pemicu longsor ini adalah elemen penting dalam EWS.

Salah satu EWS yang pertama dikembangkan adalah oleh USGS di kawasan San Fransisco Bay (Keefer et al., 1987). EWS ini didasarkan pada prakiraan jumlah curah hujan (*quantitative precipitation rainfall forecast/QPRF*) yang disediakan dari 40 jaringan pengukur curah hujan dari National Weather Service (masing-masing prakiraan dapat dilakukan untuk 6 jam kemudian) dengan jaringan telemetri lebih dari 40 alat pengukur curah hujan. Data ini kemudian dikombinasikan dengan ambang hujan pemicu longsor berdasarkan model empirik (Cannon and Ellen, 1985). Kombinasi antara ambang hujan dengan data yang berasal dari pengamatan dan pengukuran (*real-time monitoring*) pada jaringan telemetri hujan dan prakiraan cuaca (pada Gambar 3.5), dapat digunakan untuk mengeluarkan peringatan dini tanah longsor. Prinsip dari sistem ini adalah bila hasil pengukuran curah hujan yang nyata dari waktu ke waktu berimpit atau sama dengan

ambang hujan, maka peringatan kejadian longsor dikeluarkan. Konsep sistem ini juga yang dikembangkan di Hong Kong (Brand et al., 1984), Italia (Sirangelo and Braca, 2001), Jepang (Onodera et al., 1974), Selandia Baru (Crozier, 1999), Afrika Selatan (Gardland and Olivier, 1993), dan Virginia (Wieczorek and Guzzetti, 1999).

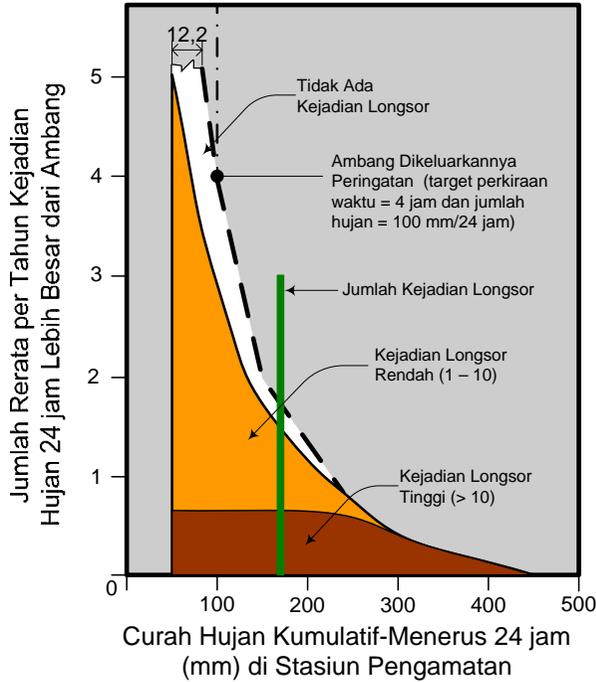


Gambar 3.9 Ambang hujan yang dikombinasikan dengan pengukuran hujan untuk peringatan dini tanah longsor (Keefer et al., 1987).

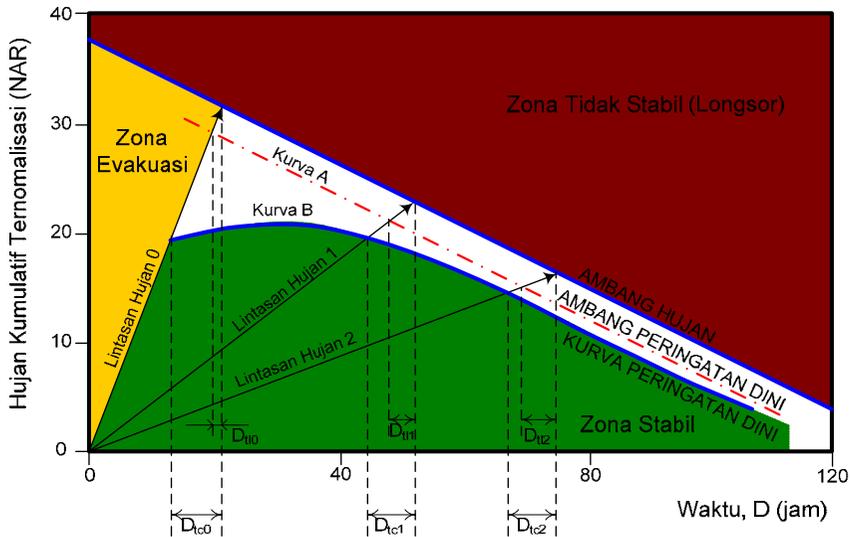
I

Di Hong Kong, Geotechnical Engineering Office (GEO) mengembangkan EWS dengan sistem komputer otomatis yang terintegrasi dengan jaringan telemetri dan pengamatan radar, serta citra satelit untuk memantau pergerakan dan pembentukan awan pembawa hujan (Premchitt, 1997). Peringatan longsor dibuat berdasarkan hujan 24 jam dan hujan per jam. Penentuan tingkat bahaya yang dikeluarkan berdasarkan tingkat kejadian longsor. Penentuan tingkat peringatan dibuat dua kali dari frekuensi tingkat kejadian longsor. Jika tingkat kejadian longsor saja yang digunakan maka waktu peringatan sebelum kejadian sejumlah longsor akan sangat pendek dan kemungkinan pula kejadian longsor yang sebenarnya terjadi sebelum pemberian peringatan. Bila jumlah kejadian tidak dapat diperkirakan tetapi curah hujan yang terjadi meningkat hingga tingkat kejadian longsor, maka peringatan dini harus dikeluarkan (Gambar 3.10). Peringatan kejadian longsor (*landslip warning*) dikeluarkan bila hujan 24 jam yang terukur

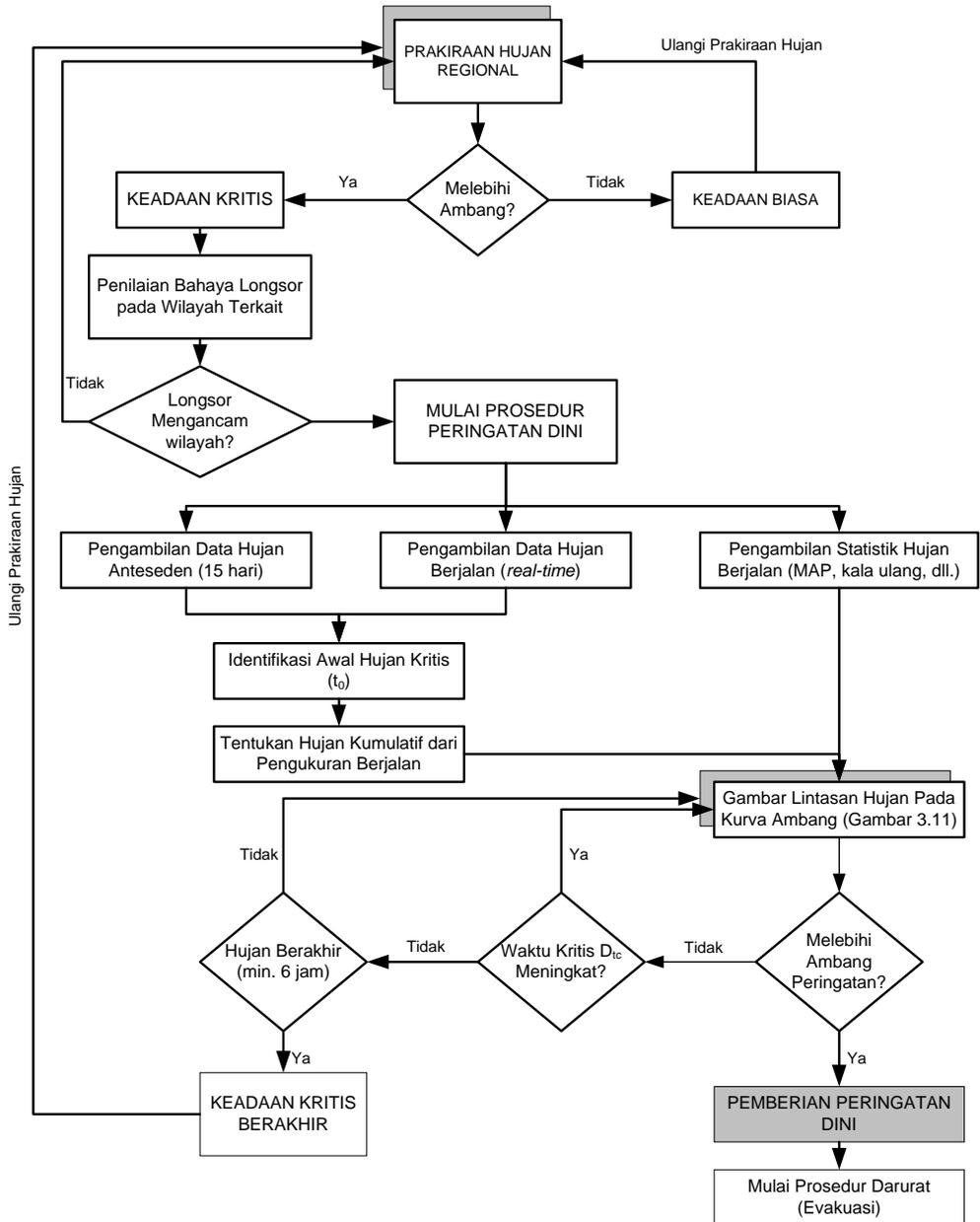
melebihi 175 mm, atau hujan 1 jam melebihi 70 mm di seluruh wilayah penting. Pada keadaan ini, radio dan televisi lokal diminta untuk memberitakan tentang peringatan dini kepada masyarakat selama rentang waktu tertentu.



Gambar 3.10 Jumlah rerata per tahun kejadian longsor pada variasi jumlah hujan (dimodifikasi dari Premchitt, 1997)



Gambar 3.11 Kriteria untuk kurva peringatan longsor berdasarkan ambang hujan (dimodifikasi dari Aleotti, 2004)



Gambar 3.12 Diagram alir proses pengeluaran peringatan dini longsor (dimodifikasi dari Aleotti, 2004)

Ambang peringatan (*warning threshold*) dapat pula dimulai dari batas atas hingga mendekati ambang hujan (*triggering threshold*) yang sesungguhnya (RBM CJ, 1985), yaitu suatu batas yang mengaktifkan prosedue darurat pada wilayah yang rentan terhadap longsor (Gambar 3.11). Ambang peringatan selanjutnya dapat diidentifikasi dari kondisi curah hujan yang melewati batas atas

grafik. Sebagai contohnya, ambang peringatan ditentukan sebagai kurva yang sejajar (parallel) dengan ambang hujan (kurva A dalam Gambar 3.10), atau kurva yang mana waktu kritis (D_{tc}) tetap konstan terhadap lintasan curah hujan kritis, $D_{tc1} = D_{tc2}$ (kurva B dalam Gambar 3.11).

Contoh Soal 1:

Riwayat longsor dan hujan yang tercatat di suatu wilayah diberikan sebagai berikut:

No.	Hujan Tercatat		
	Rata-Rata Harian (mm)	Lama Waktu (hari)	Kumulatif (mm)
[1]	[2]	[3]	[4]
1	148	4	221
2	25	1	188
3	223	3	256
4	147	3	68
5	147	3	168
6	25	7	175
7	119	2	176
8	3	6	274
9	20	4	104
10	93	4	369
11	375	10	633
12	120	2	233

Berdasarkan data tersebut, buatlah kurva ambang hujan (kurva ID) yang menyebabkan longsor !

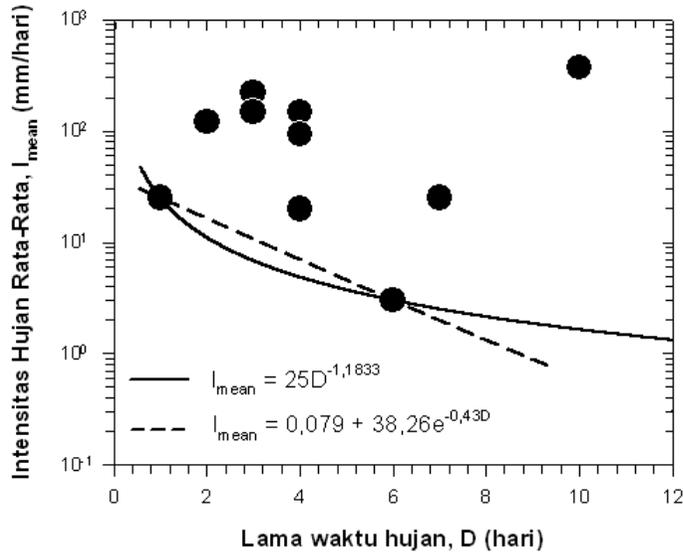
Penyelesaian:

Kurva ID dibuat dengan menggunakan data pada kolom 2 dan 3, menjadi suatu grafik sebagai berikut (Gambar 3.13). Batas bawah data hujan tersebut adalah data No. 2 ($I = 25$ mm/hari; $D = 1$ hari) dan No 8 ($I = 3$ mm/hari; $D = 6$ hari). Menggunakan 2 data hujan ini, dibuatkan persamaan empirik yang sesuai yaitu :

- *Power law decay* : $I_{mean} = 25D^{-1,1833}$; untuk $1 \leq D < 15$ hari
- *Exponential decay*: $I_{mean} = 0,079 + 38,26e^{-0,43D}$; untuk $1 \leq D < 9$ hari

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa persamaan *power law* atau *exponential decay* akan memberikan prediksi curah hujan yang

kurang dari 1 mm/hari atau mendekati nol bila lama waktu hujan sangat panjang. Untuk batas lama waktu yang menghasilkan $I < 1$ mm/hari adalah 15 hari untuk persamaan *power law* dan 9 hari untuk *exponential decay*.



Gambar 3.13 Ambang hujan dengan metode empirik untuk contoh soal 1.

Contoh Soal 2:

Suatu lereng memiliki karakteristik sebagai berikut: $k_s = 36$ mm/h, $\mu = 0,08$, kedalaman bidang longsor = 1000 mm, dan $S = 1050$ mm. Riwayat hujan jam-jaman (dalam satuan mm/jam) diberikan dalam kala ulang seperti berikut ini :

Waktu t (menit)	Kala Ulang (tahun)							
	2	5	10	20	30	40	50	100
5	230,05	277,47	302,37	322,90	333,62	340,71	345,98	361,43
10	144,92	174,80	190,48	203,42	210,17	214,63	217,95	227,68
15	110,60	133,40	145,36	155,24	160,39	163,80	166,33	173,76
20	91,29	110,12	120,00	128,14	132,40	135,21	137,30	143,43
45	53,17	64,13	69,88	74,63	77,11	78,75	79,96	83,53
60	43,89	52,94	57,69	61,61	63,65	65,00	66,01	68,95
120	27,65	33,35	36,34	38,81	40,10	40,95	41,58	43,44
180	21,10	25,45	27,73	29,62	30,60	31,25	31,73	33,15
360	13,29	16,03	17,47	18,66	19,28	19,69	19,99	20,88
720	8,37	10,10	11,01	11,75	12,14	12,40	12,59	13,16

Tentukan ambang hujan yang menyebabkan longsor dengan menggunakan metode yang diusulkan oleh Pradel dan Raad (1993) !

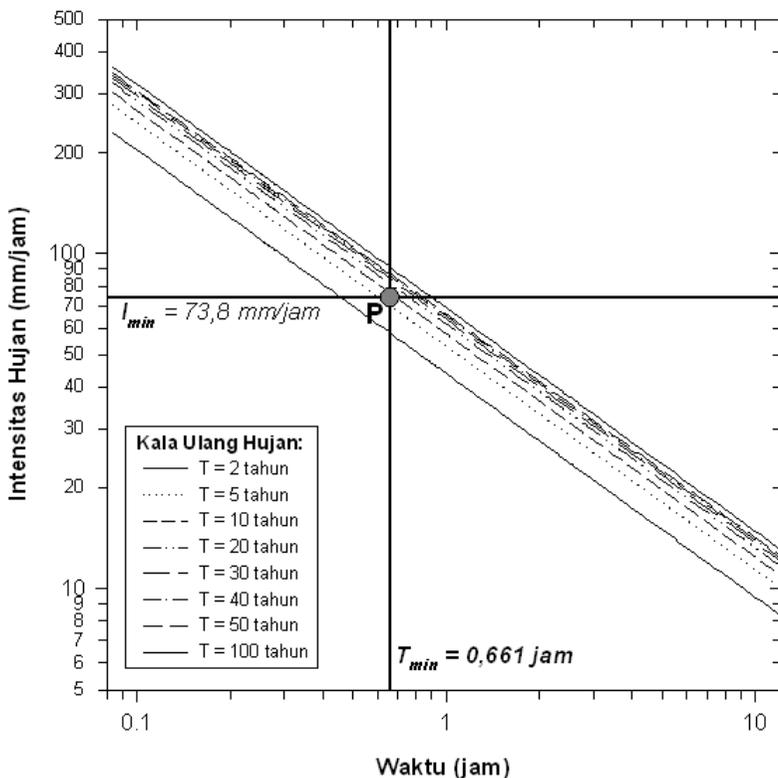
Penyelesaian:

Ambang hujan ditentukan dengan menggunakan persamaan 3.2 dan 3.5. Dalam hal ini kedalaman zona pembasahan Z_w dianggap sama dengan kedalaman bidang longsor yaitu 1000 mm. Maka :

$$T_w = \frac{0,08}{36} \left[1000 - 1050 \cdot \ln \left(\frac{1050 + 1000}{1050} \right) \right] = 0,661 \text{ jam} = T_{min}$$

$$I_{min} = \frac{0,08}{0,661} \left[1000 - 1050 \cdot \ln \left(\frac{1050 + 1000}{1050} \right) \right] \left(\frac{1050 + 1000}{1000} \right) = 73,8 \text{ mm/jam}$$

Data hujan jam-jaman untuk masing-masing kala ulang digambarkan seperti cara pada Gambar 3.5, sehingga menghasilkan kurva seperti Gambar 3.14. Intensitas hujan minimum yang menyebabkan longsor adalah 73, 8 mm/jam dengan lama waktu 0,661 jam = 40 menit yang mana berimpit dengan kala ulang 10 tahun.



Gambar 3.14 Ambang hujan metode Pradel dan Raad (1993) untuk contoh soal 2.

3.6 SOAL-SOAL LATIHAN

1. Apakah yang dimaksud dengan ambang hujan ? Jelaskan !
2. Sebutkan metode-metode yang dapat digunakan untuk menentukan ambang hujan ! Jelaskan masing-masing metode tersebut !
3. Apakah yang dimaksud dengan ambang hujan lokal, regional, dan global ? Ambang hujan manakah yang dikembangkan sebagai sistem peringatan dini ?
4. Mengapa metode fisika untuk ambang hujan jarang dibuat dibandingkan dengan metode empirik ? Jelaskan !
5. Jelaskan tentang prinsip peringatan dini longsor berdasarkan ambang hujan !
6. Riwayat hujan regional yang menyebabkan longsor pada suatu wilayah tersebut diberikan sebagai berikut :

No.	Intensitas Hujan (mm/hari)	Lama Waktu (hari)	Hujan Anteseden (mm)
1	115,5	5	248,1
2	7,1	5	185,2
3	3,8	3	237,0
4	47,5	5	128,9
5	32,9	6	245,6
6	12,7	1	152,4
7	37	2	167,7

Tentukan ambang hujan dengan kurva ID ! Bandingkan hasilnya dengan persamaan empirik lainnya (pada Tabel 3.1) !

7. Riwayat hujan seperti dalam soal No. 1. Buatlah ambang hujan berdasarkan hubungan intensitas hujan dan hujan anteseden !
8. Buatlah ambang hujan dengan kurva ID berdasarkan data dalam soal No.1 dan contoh soal 1 ! Bandingkan hasilnya dengan persamaan empirik lainnya !
9. Suatu lereng memiliki sifat-sifat tanah : $k_s = 3,6$ mm/jam, $\mu = 0,10$. Kedalaman zona pembasahan $Z_w = 2200$ mm, dan tinggi tekanan suction $S = 1800$ mm. Tentukan intensitas dan lama waktu hujan minimum yang menyebabkan longsor berdasarkan metode Pradel dan Raad (1993) dan metode Cho dan Lee (2002) !

10. Tentukan ambang hujan dengan metode Cho dan Lee (2002) untuk lereng yang memiliki karakteristik berikut :

Jenis Tanah	μ	S (cm)	k_s (m/s)
Tanah 1	0,35	70,6	$5,43 \times 10^{-5}$
Tanah 2	0,15	58,5	$4,33 \times 10^{-6}$
Tanah 3	0,14	247,7	$2,53 \times 10^{-7}$

3.7 DAFTAR PUSTAKA DAN REFERENSI

- Aleotti P., 2004, A Warning System for Rainfall-Induced Shallow Failures. *Engineering Geology*, Vol. 73: 247-265.
- Caine N., 1980, The Rainfall Intensity-Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. *Geografiska Annaler*, Vol. 62A (1-2): 23-27.
- Cancelli A., and Nova R., 1985. Landslides in Soil Debris Cover Triggered By Rainstorms in Valtellina (Central Alps, Italy). In: Sassa K. (ed) *Proceedings of 4th International Conference on Landslides*, Tokyo, The Japanese Landslide Soc, Tokyo, pp 267-272.
- Ceriani M., Lauzi S., and Padovan N., 1992, Rainfalls and Landslides In The Alpine Area Of Lombardia Region, Central Alps Italy. In: Aulitzky A (Ed.) *Proceedings of Interpraevent 1992*, Bern, Switzerland, Österr. Wasserwirtsch., Klagenfurt, 2 :9-20.
- Chleborad A F., Baum R L., and Godt J W., 2006, Rainfall thresholds for forecasting landslides in the Seattle, Washington, Area – Exceedance and probability: U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1064.
- Cho E., and Lee S.R., 2002, Evaluation of surficial stability for homogenous slopes considering rainfall characteristics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128(9): 756-763.
- Chow V.T, Maidment D.R., and Mays L.W., 1988, *Subsurface water*. Ch. 4 in *Applied Hydrology*, Mc. Graw-Hill New York.
- Crosta G., 1998, Regionalization of Rainfall Thresholds: An Aid to Landslide Hazard Evaluation. *Environmental Geology*, Vol. 35: 131-145.
- D'Odorico P., Fagherazzi S., and Rigon R., 2005, Potential for Landsliding: Depending In Hyetograph Characteristics. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110: F01007 (doi:10.1029/2004JF000127).
- Gardland, G.G., Olivier, M.J., 1993. Predicting Landslides From Rainfall In A Humid, Subtropical Region. *Geomorphology*, Vol. 8: 165- 173.
- Glade T., Crozier M., and Smith P., 2000, Applying Probability Determination to Refine Landslide-triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical “Antecedent Daily Rainfall Model”. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 157: 1059-1079.

- Godt J W., Baum R L., and Chleborad A F., 2006. Rainfall Characteristics for Shallow Landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 31: 97-110.
- Guzzetti F., Peruccacci S., and Rossi M., 2005. Definition of Critical Threshold for Different Scenarios. RISK-Advanced Weather Forecast System to Advise on Risk Events and Management (RISK-AWARE), Action 1.16, IRPI CNR, Perugia, Italy: 36p.
- Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., and Stark C. P., 2007. Rainfall Thresholds for the Initiation of Landslides in Central And Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, Issue 3-4, pp. 239-267.
- Morgenstern N R., 1992, The Role of Analysis in the Evaluation of Slope Stability. Keynote Paper, Proceeding 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, Vol. 3, pp.1615-1630.
- Pradel D., and Raad G., 1993, Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119(2): 315-332.
- Premchitt, J., 1997. Warning System Based on 24-hour Rainfall in Hong Kong. "Manual for zonation on areas susceptible to rain-induced slope failure". Asian Technical Committee on Geotechnolgy for Natural Hazards in International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 72- 81.
- RBMCJ, 1985. Study on the Disaster Prevention System to Mitigate Sediment Disasters Caused by Heavy Rains, Overall Debris Countermeasures, River Bureau, Ministry of Construction of Japan.
- Skempton A W., and DeLory F A., 1957, Stability of natural slopes in London Clay. Proceedings of the 4th International Conference International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering), London, Butterworks 2: 378-381.
- Wieczorek G F., 1987, Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. In: Costa JE, Weiczorek GF (Eds.) Debris flow/avalanches: process, recognition and mitigation. *Reviews in Engineering Geology*, Vol 7, Geological Society of America, Boulder, Colorado, pp 93-104.
- Wieczorek, G.F., Guzzetti, F., 1999. A review of rainfall thresholds for triggering landslides. Proc. of the EGS Plinius Conference, Maratea, Italy October 1999, pp. 407- 414.

4. ANALISIS STABILITAS LERENG: TANAH

Pada permukaan tanah yang miring atau lereng, komponen gaya gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap gesekan tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka akan terjadi longsor. Analisis stabilitas lereng tidak mudah karena terdapat banyak faktor yang sangat mempengaruhi hasil hitungannya. Faktor-faktor tersebut misalnya, kondisi tanah yang berlapis-lapis, kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah. Secara umum longsor suatu lereng dikarenakan bertambahnya tegangan geser (*shear stress*) dan berkurangnya kuat geser tanah (*shear strength*). Bertambahnya tegangan geser dapat disebabkan antara lain oleh bertambahnya beban pada lereng, tidak adanya lagi bagian penahan lereng seperti dinding penahan tanah, perubahan muka air tanah yang begitu cepat, dan beban akibat gempa bumi. Pengurangan kuat geser tanah terjadi karena meningkatnya tekanan air pori, lapisan tanah lempung yang banyak menyerap air, pelapukan tanah, dan pengaruh *strain softening*.

Analisis stabilitas tanah pada permukaan yang miring ini disebut analisis stabilitas lereng. Analisis ini sering juga digunakan pada perancangan-perancangan konstruksi-konstruksi sipil seperti : jalan kereta api, jalan raya, bandara, dan lain-lain. Stabilitas suatu lereng

dapat dilakukan dengan metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*) dan analisis deformasi (*deformation analysis*). Metode keseimbangan batas berdasarkan keseimbangan gaya atau momen yang menghitung tegangan geser dan kuat geser pada lereng. Sehingga untuk metode ini, stabilitas lereng dinyatakan dalam faktor aman (*factor of safety*). Analisis deformasi biasanya didasarkan pada metode numerik guna mempelajari pergerakan tanah dan tegangan pada lereng.

4.1 FAKTOR AMAN

Terdapat beberapa definisi faktor aman. Dua metode yang sering digunakan untuk mendefinisikan faktor aman adalah keseimbangan gaya dan momen.

Keseimbangan momen (*moment equilibrium*) biasanya digunakan untuk analisis bidang longsor berbentuk lingkaran. Faktor aman terhadap momen dituliskan :

$$FS_m = \frac{M_r}{M_d} \quad (4.1)$$

dengan M_r adalah jumlah momen tahanan dan M_d merupakan jumlah momen yang mendorong. Untuk bidang keruntuhan berbentuk lingkaran, pusat lingkaran diambil sebagai titik tinjauan momen. Sedangkan untuk bidang longsor berbentuk lainnya, sebarang titik dapat diambil sebagai titik tinjauan momen dalam analisis.

Pendekatan keseimbangan gaya (*force equilibrium*) untuk menghitung faktor aman biasanya digunakan dalam analisis stabilitas lereng dengan bidang keruntuhan komposit yaitu berbentuk translasi atau rotasi dan datar atau poligon. Faktor aman didefinisikan :

$$FS_f = \frac{F_r}{F_d} \quad (4.2)$$

dengan F_r adalah jumlah momen tahanan dan F_d merupakan jumlah momen yang mendorong.

Dalam metode keseimbangan batas, tegangan geser yang bekerja di sepanjang bidang keruntuhan (τ_d), sehingga faktor aman menjadi :

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (4.3)$$

dengan,

FS = faktor aman

τ_f = tahanan geser yang dapat digerakan oleh tanah,

τ_d = tegangan geser akibat gaya berat tanah yang longsor.

Tahanan geser tanah adalah kuat geser sebagai fungsi dari komponen kohesi dan gesekan, dinyatakan dengan

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4.4)$$

dimana : c' = kohesi,

ϕ' = sudut gesek internal,

σ' = tegangan normal.

Dengan cara yang sama dapat dituliskan persamaan tegangan geser sebagai berikut :

$$\tau_d = c_d + \sigma_d \tan \phi_d \quad (4.5)$$

dimana c_d dan ϕ_d adalah kohesi dan sudut gesek dalam yang terjadi.

Substitusi Persamaan (4.4) dan (4.5) ke dalam Persamaan (4.3) :

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (4.6)$$

Selanjutnya, faktor aman terhadap masing-masing parameter kuat geser dari Persamaan (4.6), faktor aman dapat dikelompokkan menjadi:

$$FS_c = \frac{c'}{c_d} \quad (4.7)$$

$$FS_\phi = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi_d} \quad (4.8)$$

$$W = \gamma \cdot L \cdot H \quad (4.9)$$

- Gaya berat W dapat diuraikan menjadi :

1. gaya yang bekerja pada bidang vertikal AB

$$N_a = W \cos \beta = \gamma LH \cos \beta$$

2. gaya yang bekerja pada bidang yang sejajar AB

$$T_a = W \sin \beta = \gamma LH \sin \beta$$

Jadi tegangan normal efektif dan gaya geser pada dasar lereng dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{luas bidang runtuh}} = \frac{\gamma \cdot L \cdot H \cos \beta}{L/\cos \beta} = \gamma \cdot L \cdot H \cos^2 \beta \quad (4.10)$$

$$\tau = \frac{T_a}{\text{luas bidang runtuh}} = \frac{\gamma \cdot L \cdot H \sin \beta}{L/\cos \beta} = \gamma \cdot L \cdot H \sin \beta \cos \beta \quad (4.11)$$

Reaksi akibat gaya berat W adalah gaya R yang besarnya sama dengan W dengan arah berlawanan

$$N_r = R \cos \beta = W \cos \beta \quad (4.12)$$

$$T_r = R \sin \beta = W \sin \beta \quad (4.13)$$

Dalam kondisi seimbang, gaya geser yang bekerja pada bidang AB adalah dapat dituliskan seperti persamaan :

$$\frac{T_r}{(L/\cos \beta)(1)} = \gamma \cdot H \sin \beta \cos \beta \quad (4.14)$$

Gaya geser yang terjadi ini dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d$$

Nilai tegangan normal dapat diperoleh dari Persamaan (4.10). Substitusi Persamaan (4.10) ke dalam Persamaan (4.5), diperoleh :

$$\tau_d = c'_d + (\gamma' H \cos^2 \beta) \tan \phi'_d \quad (4.15)$$

Jadi,

$$\gamma H \sin \beta \cos \beta = c'_d + (\gamma H \cos^2 \beta \tan \phi'_d) \quad (4.16)$$

$$\frac{c'_d}{\gamma H} = \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi'_d) \quad (4.17)$$

Faktor aman diberikan pada masing-masing komponen gesekan dan kohesi :

$$\tan \phi'_d = \frac{\tan \phi'}{FS}; \text{ dan } c'_d = \frac{c'}{FS}$$

Substitusi dari persamaan (4.15), diperoleh :

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (4.18)$$

Dengan demikian, terdapat dua keadaan :

- Untuk tanah granuler ($c' = 0$), mengidentifikasi bahwa lereng tak terbatas adalah pasir, pada komponen nilai FS tidak bergantung pada tinggi lereng H dan lereng selalu dalam kondisi stabil bila $\beta < \phi'$
- Untuk tanah dengan kohesi dan sudut gesek, tinggi lereng kritis (H_{cr}) terjadi bila $FS = 1$, yaitu:

$$H_{cr} = \frac{c'}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi')} \quad (4.19)$$

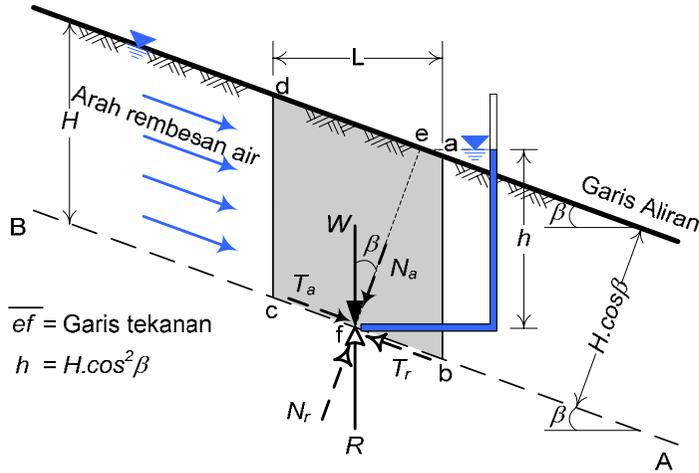
4.2.2 Stabilitas Akibat Rembesan

Suatu lereng tak hingga dengan kemiringan lereng sebesar β , dimana muka air rembesan dianggap terdapat pada permukaan, (Gambar 4.2). Kuat geser tanah karena adanya pengaruh air dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4.20)$$

Untuk menentukan faktor aman terhadap kemungkinan longsor sepanjang bidang **AB**, dengan mempertimbangkan unsur pada bidang **abcd**. Berat tanah pada elemen lereng pada bidang **abcd** :

$$W = \gamma_{sat} \cdot L \cdot H \quad (4.21)$$



Gambar 4.2 Analisis lereng tak-hingga akibat rembesan sejajar kemiringan lereng.

Gaya berat W dapat diuraikan menjadi :

$$N_a = W \cos \beta = \gamma_{sat} \cdot L \cdot H \cos \beta \quad (4.22)$$

$$T_a = W \sin \beta = \gamma_{sat} \cdot L \cdot H \sin \beta \quad (4.23)$$

Reaksi akibat gaya berat W adalah persamaan untuk R , yaitu :

$$N_r = R \cos \beta = W \cos \beta = \gamma_{sat} \cdot L \cdot H \cos \beta \quad (4.24)$$

$$T_r = R \sin \beta = W \sin \beta = \gamma_{sat} \cdot L \cdot H \sin \beta \quad (4.25)$$

Tegangan normal total σ dan gaya geser τ pada bidang **AB** yaitu;

$$\sigma = \frac{N_r}{(L/\cos \beta)(1)} = \gamma_{sat} H \cos^2 \beta \quad (4.26)$$

$$\tau = \frac{T_r}{(L/\cos \beta)(1)} = \gamma_{sat} \cdot H \sin \beta \cos \beta \quad (4.27)$$

Gaya geser yang dibutuhkan untuk mencapai keseimbangan pada bidang **AB** adalah sebagai berikut :

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d = c'_d + (\sigma - u) \tan \phi'_d \quad (4.28)$$

dengan, u = tekanan air pori (lihat Gambar 4.2)

Substitusi persamaan 4.24 ke dalam persamaan 4.26, maka diperoleh :

$$\begin{aligned}\tau_d &= c'_d + (\gamma_{sat} H \cos^2 \beta - \gamma_w H \cos^2 \beta) \tan \phi'_d \\ &= c'_d + \gamma' H \cos^2 \beta \tan \phi'_d\end{aligned}\quad (4.29)$$

Substitusi Persamaan (4.27) ke dalam Persamaan (4.29), akan diperoleh :

$$\gamma_{sat} H \sin \beta \cos \beta = c'_d + \gamma' H \cos^2 \beta \tan \phi'_d \quad (4.30)$$

$$\frac{c'_d}{\gamma_{sat} H} = \cos^2 \beta \left(\tan \beta - \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \tan \phi'_d \right) \quad (4.31)$$

dengan, $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w =$ berat volume efektif tanah.

Faktor aman dapat dicari dengan substitusi $\tan \phi'_d = \tan \phi' / FS$ dan $c'_d = c' / FS$, ke dalam Persamaan (4.31).

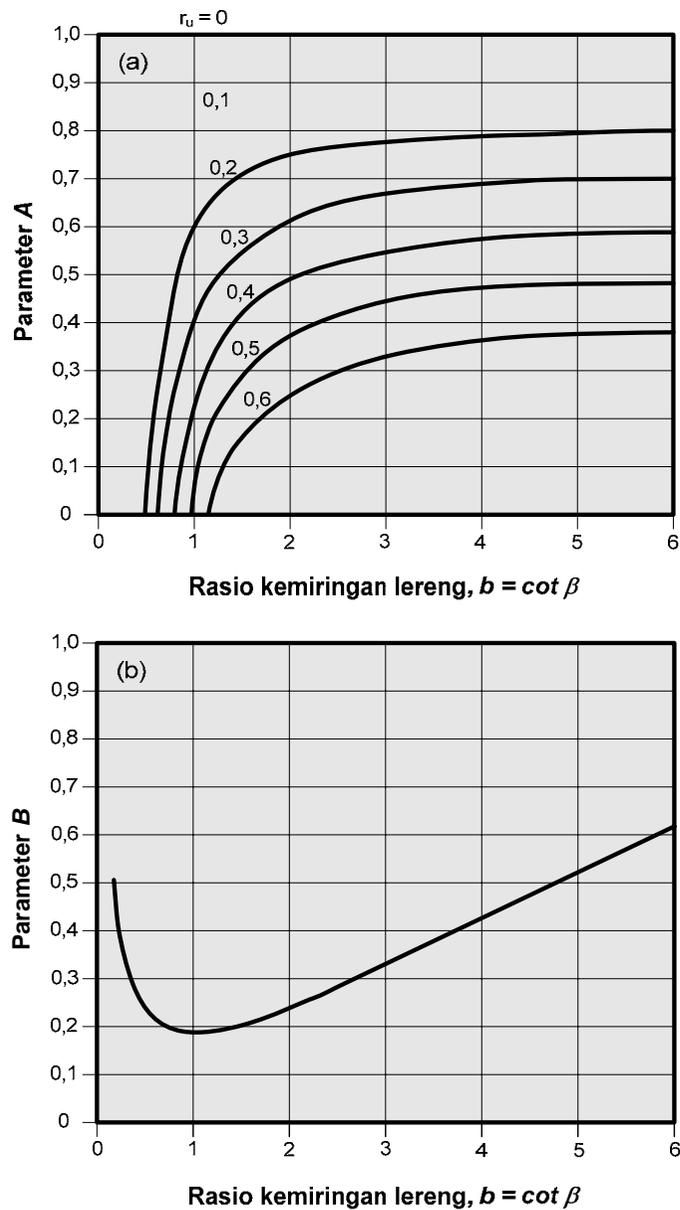
$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (4.32)$$

Untuk tanah granuler dengan $c = 0$, maka besarnya faktor aman menjadi :

$$FS = \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \beta} \quad (4.33)$$

Duncan dkk. (1987) memberikan suatu grafik untuk menganalisis stabilitas lereng tak hingga (Gambar 4.3). Bentuk keruntuhan diasumsikan seperti pada Gambar 4.4a, dengan berat volume tanah yang digunakan dalam analisis adalah berat volume total tanah (γ). Pengaruh rembesan dibedakan menjadi dua asumsi arah aliran yaitu sejajar kemiringan lereng (Gambar 4.4b) dan ke arah lereng dengan sudut θ (Gambar 4.4b). Untuk penghitungan stabilitas, tekanan air pori dinyatakan dengan rasio tekanan air pori yaitu $r_u = \frac{u}{\gamma H}$.

Untuk rembesan sejajar dengan kemiringan lereng, rasio tekanan air pori dinyatakan :

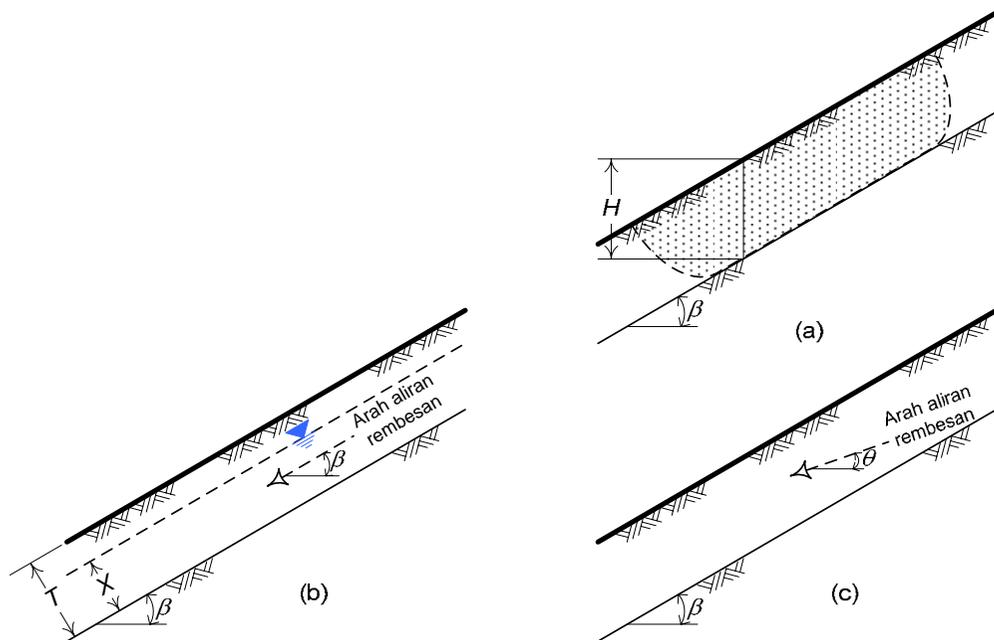


Gambar 4.3 Grafik stabilitas lereng tak-hingga (dimodifikasi dari Duncan dkk., 1987)

$$r_u = \frac{X}{T} \frac{\gamma_w}{\gamma} \cos^2 \beta \quad (4.34)$$

Rasio tekanan air pori untuk kondisi rembesan yang mengalir membentuk sudut θ adalah

$$r_u = \frac{\gamma_w}{\gamma} \frac{1}{1 + \tan \beta \tan \theta} \quad (4.35)$$



Gambar 4. 4 Kondisi lereng tak hingga untuk grafik stabilitas.

Selanjutnya, stabilitas lereng dapat dihitung dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Hitung rasio tekanan air pori (Persamaan (4.34) atau Persamaan (4.35)) sesuai dengan arah rembesan,
2. Tentukan nilai parameter A dan B dari grafik stabilitas (Gambar 4.3),
3. Hitung faktor aman :

$$FS = A \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + B \frac{c'}{\gamma H} \quad (4.36)$$

dengan,

γ = berat volume total tanah,

γ_w = berat volume wair,

c' = kohesi efektif tanah,

ϕ' = sudut gesek efektif tanah,

H = kedalaman bidang runtuh dari permukaan (Gambar 4.4a)

Contoh Soal 4.1.

Lereng tak terhingga dengan rembesan seperti Gambar 4.2, $H = 6$ m, $\beta = 15^\circ$, $c' = 10$ kPa, $\phi' = 20^\circ$, $\gamma = 16$ kN/m³, dan $\gamma_{sat} = 17,8$ kN/m³.

Tentukan faktor keamanan lereng: (1) bila tidak terjadi rembesan, (2) dengan rembesan !

Penyelesaian:

Berat volume tanah efektif, $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 17,8 - 9,81 = 7,99 \text{ kN/m}^3$

1. Kondisi tanpa rembesan

Faktor keamanan dihitung dengan persamaan 4.16 :

$$FS = \frac{c'}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

$$= \frac{10}{(16)(6) \cos^2(15) \tan(15)} + \frac{\tan(20)}{\tan(15)} = 1,78$$

Nilai $FS > 1$, maka lereng dalam kondisi stabil.

2. Kondisi dengan rembesan

Faktor keamanan dihitung dengan persamaan 4.30 :

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{\text{sat}} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{\text{sat}} \tan \beta}$$

$$= \frac{10}{(17,8)(6) \cos^2(15) \tan(15)} + \frac{7,99 \tan(20)}{17,8 \tan(15)} = 0,985$$

Karena $FS < 1$, maka lereng dalam keadaan tidak stabil.

Contoh Soal 4.2.

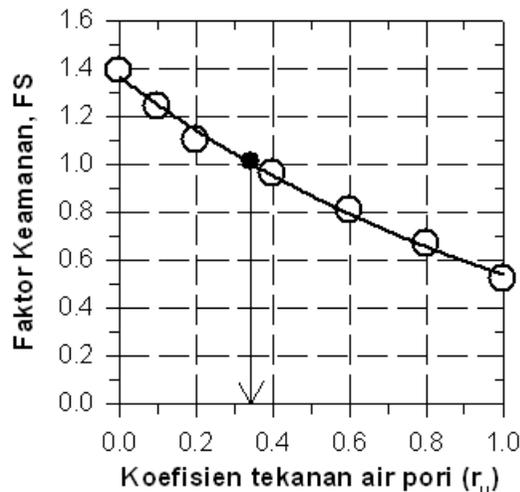
Lereng tak terhingga dengan rembesan seperti Gambar 4.2, $H = 6 \text{ m}$, $\beta = 15^\circ$, $c' = 10 \text{ kPa}$, $\phi' = 20^\circ$, dan $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$. Tentukan faktor keamanan untuk koefisien tekanan air pori $r_u = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; \text{ dan } 0,6$! Gunakan grafik Duncan pada Gambar 4.3, berapakah tekanan air pori kritis (yaitu pada saat $FS = 1$) ?

Penyelesaian:

Nilai banding kemiringan lereng, $b = \cot \beta = \cot 15^\circ = 3,732$. Dari kurva pada Gambar 4.3b diperoleh parameter $B = 0,4$. Dengan cara yang sama parameter A (Gambar 4.3a) untuk masing-masing nilai r_u diberikan sebagai berikut :

Koefisien Tekanan Air Pori, r_u	Parameter A	Faktor Aman, FS
0	1	1,39
0,1	0,887	1,24
0,2	0,786	1,10
0,3	0,685	0,96
0,4	0,569	0,81
0,5	0,469	0,67
0,6	0,357	0,52

Dengan menggunakan parameter A dan B tersebut, faktor keamanan dihitung menggunakan persamaan 4.34 yang hasilnya disajikan pada kolom paling kanan.



Gambar 4.5 Hubungan antara faktor keamanan dan koefisien tekanan air pori untuk Contoh Soal 4.2.

Untuk menentukan tekanan air pori kritis dibuatkan suatu hubungan antara faktor keamanan dan koefisien tekanan air pori seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5. Dari hubungan ini diperoleh, nilai koefisien tekanan air pori untuk $FS = 1$ adalah $r_u = 0,345$. Selanjutnya tekanan air pori dihitung dari :

$$u = r_u \cdot \gamma \cdot H = 0,345 \times 20 \times 6 = 41,44 \text{ kN/m}^2$$

Cara lain untuk menghitung tekanan air pori menggunakan persamaan 4.34 dan kurva Gambar 4.3a dengan menentukan parameter A terlebih dahulu.

$$FS = A \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} + B \frac{c'}{\gamma H}$$

$$1 = A \frac{\tan(20^\circ)}{\tan(15^\circ)} + 0,4 \frac{10}{20 \times 6} \rightarrow A = 0,712$$

Dari kurva pada Gambar 4.3a, dengan nilai $A = 0,712$ dan $B = 3,732$ diperoleh nilai r_u dari hasil interpolasi sebesar 0,345. Maka :

$$u = r_u \cdot \gamma \cdot H = 0,345 \times 20 \times 6 = 41,44 \text{ kN/m}^2$$

4.3 STABILITAS LERENG DENGAN TINGGI TERBATAS

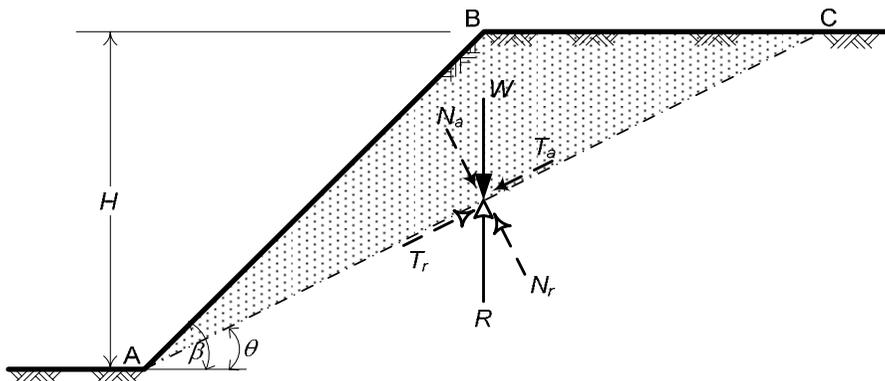
Analisa stabilitas lereng dengan tinggi terbatas (*finite slope*) oleh Culmann (1875) menggunakan pendekatan bahwa permukaan potensial longsor sebagai bidang datar. Faktor aman dihitung dengan pendekatan Culmann menghasilkan hasil yang kurang bagus, untuk mencari lereng vertikal saja. Sesudah dilakukan penelitian secara intensif tentang kelongsoran lereng pada tahun 1920, komisi geoteknik Swedia merekomendasikan bahwa permukaan longsor sebenarnya dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan lingkaran. Sejak saat itu banyak analisis stabilitas konvensional lereng dibuat dengan menggunakan asumsi kurva potensial longsor yaitu sebuah busur lingkaran. Analisa stabilitas menggunakan kelongsoran bidang datar lebih mendekati dan lebih baik hasilnya.

4.3.1 Analisis Lereng dengan Metode *Culmann*

Analisis didasarkan pada anggapan bahwa kelongsoran suatu lereng terjadi sepanjang bidang datar, bila tegangan geser rata-rata yang dapat menyebabkan kelongsoran lebih besar dari kekuatan geser tanah. Disamping itu bidang yang paling kritis adalah bidang di mana rasio antara tegangan geser rata-rata yang menyebabkan kelongsoran dengan kekuatan geser tanah adalah minimum (Das,1985). Pada Gambar 4.6 suatu lereng dengan tinggi H . Berdasarkan teori *Culmann* nilai kemiringan talud terhadap bidang horizontal adalah β . Sedangkan AC adalah suatu bidang longsor yang diuji.

Gambar 4.6 menunjukkan suatu lereng dengan tinggi H . kemiringan lereng terhadap bidang horizontal adalah β . AC

adalah suatu bidang longsor yang dicoba. Dengan memperlihatkan satu kesatuan tebal dari lereng, berat bagian $ABC = W$, (Das,1985). Dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.37) sebagai berikut :



Gambar 4. 6 Analisis lereng dengan metode *Culmann* (Das, 1985).

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{2} (H)(\overline{BC})(1)(\gamma) = \frac{1}{2} H(H \cot \theta - H \cot \beta) \gamma \\
 &= \frac{1}{2} \gamma \times H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \cdot \sin \theta} \right]
 \end{aligned}
 \tag{4.37}$$

Komponen-komponen W yang tegak lurus dan sejajar terhadap bidang \overline{AC} dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.38) dan (4.39) berikut ini :

$$N_a = W \cos \theta = \frac{1}{2} \gamma \times H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times \sin \theta} \right] \cos \theta
 \tag{4.38}$$

dan

$$T_a = W \sin \theta = \frac{1}{2} \gamma \times H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times \sin \theta} \right] \sin \theta
 \tag{4.39}$$

Tegangan normal (σ) adalah tegangan yang tegak lurus pada bidang, rata-rata bidang \overline{AC} juga dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.40) dan (4.41) sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{N_a}{(\overline{AC}) \times (1)} = \frac{N_a}{\left(\frac{H}{\sin \theta}\right)}$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \times \gamma \times H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times (\sin \theta)} \right] \cos \theta \times \sin \theta \quad (4.40)$$

dan

$$\tau = \frac{T_a}{(\overline{AC}) \times (1)} = \frac{T_a}{\left(\frac{H}{\sin \theta}\right)}$$

$$\tau = \frac{1}{2} \times \gamma \times H^2 \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times (\sin \theta)} \right] \sin^2 \theta \quad (4.41)$$

Tegangan geser (τ) adalah perlawanan rata-rata yang terbentuk sepanjang bidang \overline{AC} , dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.42) berikut ini :

$$\tau = c_d + \sigma \tan \phi_d$$

$$= c_d + \frac{1}{2} \gamma \times H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times \sin \theta} \right] \times \cos \theta \sin \theta \times \tan \phi_d \quad (4.42)$$

dari Persamaan (4.41) dan (4.42) maka didapat Persamaan 4.41 atau 4.42 berikut ini :

$$\frac{1}{2} \gamma \times H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times \sin \theta} \right] \times \sin^2 \theta =$$

$$= c_d + \frac{1}{2} \gamma \times H \left[\frac{\sin(\beta - \theta)}{\sin \beta \times \sin \theta} \right] \times \cos \theta \sin \theta \times \tan \phi_d \quad (4.43)$$

atau

$$c_d = \frac{1}{2} \gamma \times H \left[\frac{\sin(\beta - \theta) \times (\sin \theta - \cos \theta) \times \tan \phi_d}{\sin \beta} \right] \quad (4.44)$$

Persamaan 4.42 ini diturunkan dari bidang longsor \overline{AC} . Selanjutnya, agar dapat menentukan bidang longsor yang kritis, kita menerapkan prinsip maksimal dan minimal (untuk harga ϕ_d

tertentu) untuk mendapatkan sudut θ di mana kohesi (c_d) akan maksimum. Jadi penurunan pertama dari c_d terhadap θ dibuat sama dengan 0. Dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.45) sebagai berikut :

$$\frac{\partial c_d}{\partial \theta} = 0 \quad (4.45)$$

Mengingat γ , H , dan β dalam Persamaan (4.45) adalah tetap, maka dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.46) sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \times [\sin(\beta - \theta) \times (\sin \theta - \cos \theta) \times \phi_d] = 0 \quad (4.46)$$

Penyelesaian Persamaan (4.46) memberikan harga kritis dari θ , dapat dinyatakan dalam Persamaan (4.47) berikut ini :

$$\theta_{cr} = \frac{\beta + \phi_d}{2} \quad (4.47)$$

dengan memasukkan harga $\theta = \theta_{cr}$ ke dalam Persamaan (4.44) maka didapat Persamaan (4.48)4.46 berikut ini :

$$c_d = \frac{\gamma H}{4} \left[\frac{1 - \cos(\beta - \phi_d)}{\sin \beta \times \cos \phi_d} \right] \quad (4.48)$$

tinggi maksimum dari lereng pada keseimbangan kritis dapat ditentukan dengan memasukkan $c_d = c$ dan $\phi_d = \phi$ ke dalam Persamaan (4.49) sebagai berikut :

$$H_{cr} = \frac{4c}{\gamma} \left[\frac{\sin \beta \times \cos \phi}{1 - \cos(\beta - \phi)} \right] \quad (4.49)$$

Contoh Soal 4.3.

Suatu lereng yang akan dibentuk dari suatu tanah dengan, $c' = 28$ kPa, $\phi' = 20^\circ$, $\gamma = 16$ kN/m³. Kemiringan lereng akan dibuat dengan sudut $\beta = 45^\circ$ terhadap bidang horisontal. Tentukan tinggi bagian tanah yang dipotong (*cutting slope*) untuk membentuk lereng dengan faktor keamanan FS = 3,5 !

Penyelesaian:

Untuk nilai $FS = 3,5 = F_c = F_\phi$, maka:

$$c'_d = \frac{c'}{F_c} = \frac{28}{3,5} = 8 \text{ kPa}$$

$$\tan \phi'_d = \frac{\tan \phi'}{F_\phi} = \frac{\tan(20)}{3,5}$$

$$\phi'_d = \arctan \left[\frac{(20)}{3,5} \right] = 5,9^\circ$$

Tinggi bagian tanah yang dibentuk untuk lereng,

$$H = \frac{4c'_d}{\gamma} \left[\frac{\sin \beta \cos \phi'_d}{1 - \cos(\beta - \phi'_d)} \right]$$

$$= \frac{4(8)}{(16)} \left[\frac{\sin(45) \cos(5,9)}{1 - \cos(45 - 5,9)} \right] = 6,28 \text{ m}$$

4.3.2 Permukaan Bidang Longsor Berbentuk Lingkaran

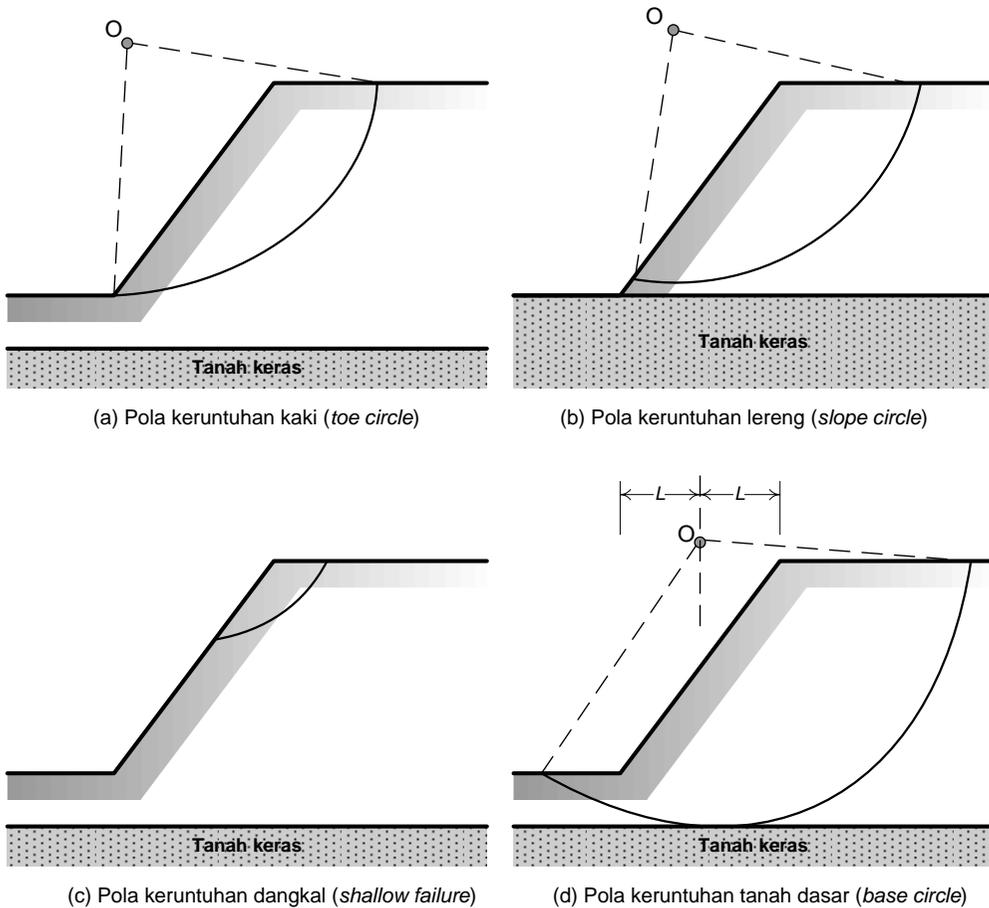
Lereng dengan bidang longsor berbentuk lingkaran ini memiliki beberapa pola keruntuhan. Keruntuhan dapat terjadi pada bagian lereng (Gambar 4.7a dan 4.7b), di bagian puncak lereng atau dikenal sebagai *shallow slope* (Gambar 4.7c), atau dapat terjadi hingga bagian bawah lereng (Gambar 4.7d).

Cara untuk melakukan analisis stabilitas lereng dapat berupa :

- (1) Metode prosedur massa yaitu massa (berat) tanah di atas permukaan longsor dianggap sebagai satu unit. Prosedur ini digunakan pada tanah homogen, meskipun kasus ini di alam tidak banyak.
- (2) Metode irisan yaitu tanah di atas permukaan longsor dibagi ke dalam beberapa irisan vertikal paralel. Stabilitas masing-masing irisan dihitung secara terpisah. Metode ini dapat memperhitungkan tekanan air pori dan dapat diterapkan untuk tanah tidak homogen. Selain itu, metode irisan ini dapat menghitung variasi tegangan normal sepanjang permukaan yang berpotensi longsor.

4.4 METODE PROSEDUR MASSA

Analisis stabilitas lereng dapat dihitung berdasarkan pendekatan tegangan total dan tegangan efektif. Pendekatan tegangan total digunakan pada lereng dari tanah lempung atau pasir jenuh air (dalam kondisi beban sementara (*short-term*) sehingga tekanan air pori tidak keluar. Pendekatan yang kedua digunakan untuk analisis stabilitas jangka waktu yang panjang (*long-term*)



Gambar 4.7 Pola keruntuhan berbentuk lingkaran pada lereng dengan tinggi terbatas .

4.4.1 Analisis Lereng dengan Pendekatan Tegangan Total

Lereng tanah lempung homogen (yaitu $\phi = 0$), seperti digambarkan pada Gambar 4.8, maka kuat geser tak-terdrainase diasumsikan sama dengan kohesi tanah kondisi tak terdrainase ($\tau_f = c_u$). Untuk melakukan penghitungan stabilitas, dicoba

Digunakan keseimbangan momen, $M_R = M_d$, dan dihasilkan :

$$c_d r^2 \theta = W_1 \ell_1 - W_2 \ell_2$$

$$c_d = \frac{W_1 \ell_1 - W_2 \ell_2}{r^2 \theta} \quad (4.53)$$

Teori keseimbangan batas memberikan persamaan faktor aman terhadap longsoran :

$$FS = \frac{\tau_f}{c_d} = \frac{c_u}{c_d} \quad (4.54)$$

Nilai FS yang paling minimum dihasilkan dengan cara membuat busur bidang longsor (\overline{AED}) secara coba-coba. Dengan demikian, cara ini memerlukan waktu yang cukup lama. Fellenius (1927) dan Taylor (1937) menyelesaikan secara analitis untuk memperoleh bidang runtuh kritis seperti dituliskan pada Persamaan (4.55).

$$m = \frac{c_d}{\gamma H} \quad (4.55)$$

dengan m = angka stabilitas yang tidak memiliki satuan. Hubungan antara angka stabilitas dan sudut kemiringan lereng untuk tanah lempung ($\phi = 0$) diberikan pada Gambar 4.10. Tinggi lereng kritis dapat diperoleh bila $FS = 1$, sehingga, $c_d = c_u$, maka:

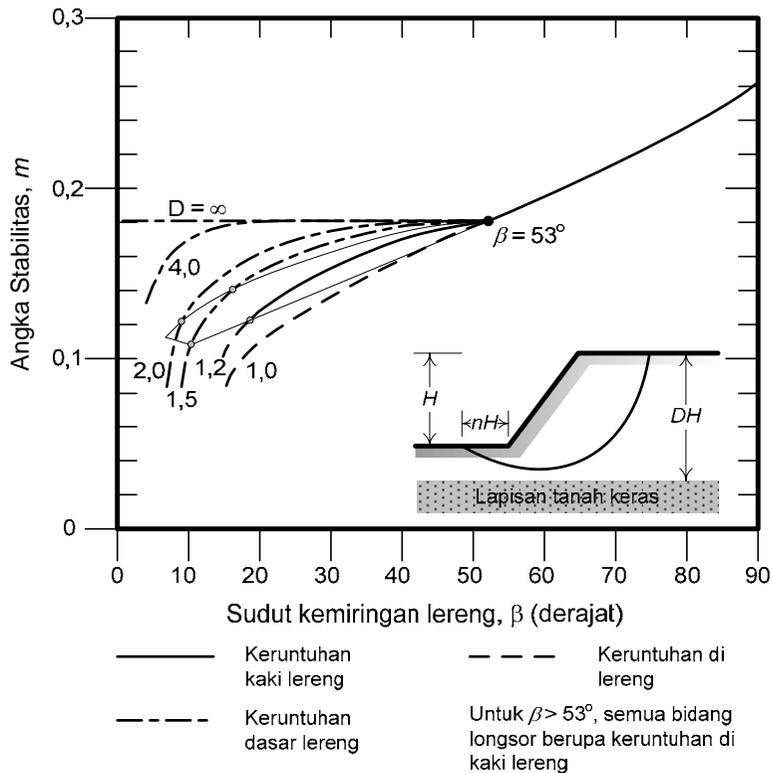
$$H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma m} \quad (4.56)$$

Penyelesaian secara grafik pada Gambar 4.10 hanya sesuai untuk kondisi tanah lempung jenuh air. Penggunaan grafik tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

- (1) Untuk lereng dengan sudut kemiringan $\beta > 53^\circ$, lingkaran bidang longsor kritis selalu berupa keruntuhan di kaki lereng. Letak pusat lingkaran dapat ditentukan dengan bantuan grafik pada Gambar 4.10.
- (2) Untuk $\beta < 53^\circ$, bidang longsor kritis terjadi melalui kaki atau di tengah-tengah lereng yang tergantung pada kedalaman lapisan tanah keras (D).

$$D = \frac{\text{Kedalaman lapisan tanah keras dari puncak lereng}}{\text{Tinggi lereng}} \quad (4.57)$$

(3) Bila lingkaran kritis menyinggung lapisan tanah keras, maka letaknya diketahui dengan bantuan grafik pada Gambar 4.11. Nilai angka stabilitas maksimum adalah 0,181



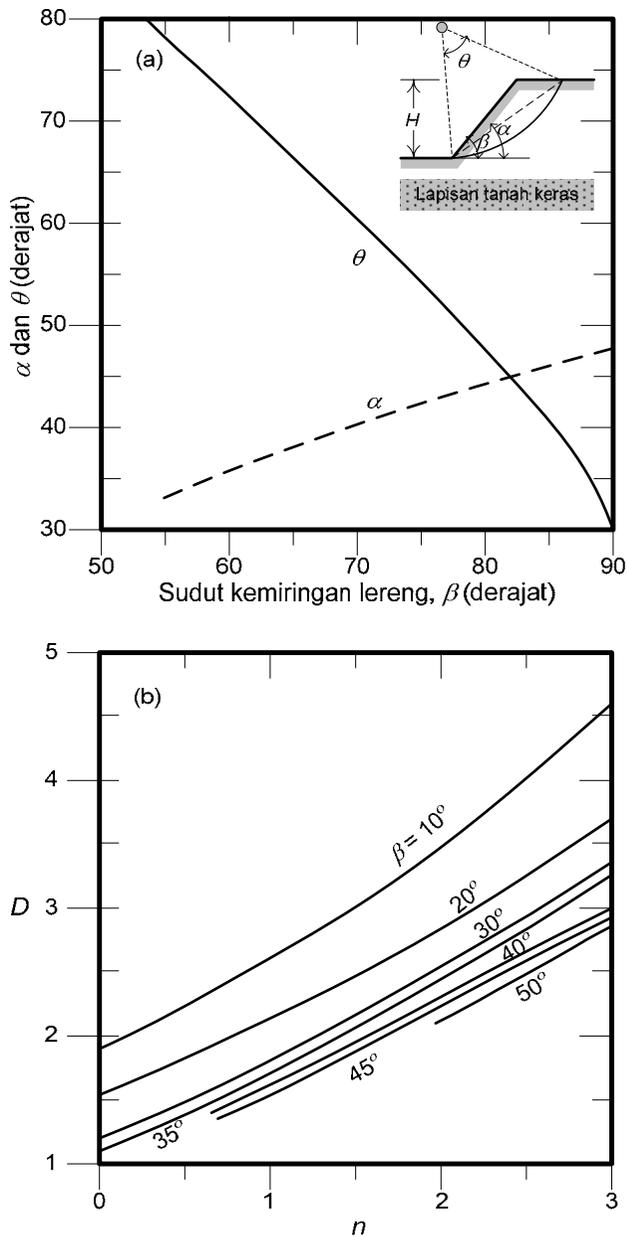
Gambar 4.9 Grafik angka stabilitas lereng lempung homogen (Dimodifikasi dari Terzaghi dan Peck, 1967).

Contoh Soal 4.4.

Suatu lereng (*cut slope*) dari tanah lempung memiliki sudut kemiringan $\beta = 60^\circ$. Tanah dalam kondisi jenuh air, berat volume tanah $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$, kuat geser tak terdrainase $c_u = 25 \text{ kN/m}^2$, $\phi = 0$.

Tentukanlah :

- Tinggi lereng yang dibuat (dianggap bidang keruntuhan berbentuk lingkaran) ! Apakah tipe keruntuhannya (longsor di kaki, tengah, atau badan lereng) ?
- Tentukan jarak perpotongan lingkaran dengan lereng ?
- Berapakah tinggi lereng bila faktor aman $FS = 2$?



Gambar 4.10 Letak pusat lingkaran untuk lereng dengan (a) $\beta > 53^\circ$,
(b) $\beta < 53^\circ$ (Dimodifikasi dari Terzaghi & Peck, 1967)

Penyelesaian

a. Menentukan tinggi lereng.

Sudut kemiringan lereng $\beta = 60^\circ > 53^\circ$, maka tipe keruntuhannya adalah melalui kaki lereng. Digunakan grafik Gambar 4.9 dan

Kemudian digunakan kembali Persamaan (4.56) :

$$H = \frac{c_d}{\gamma m} = \frac{12,5}{16 \times 0,19} = 4,112 \cong 4,0 \text{ m}$$

Contoh Soal 4.5.

Lereng dari tanah lempung memiliki sudut kemiringan $\beta = 30^\circ$. Tinggi lereng adalah 6 m, dan lapisan batuan berada 9 m dari permukaan tanah. Tanah berada dalam kondisi tak terdrainase dan $\gamma_{sat} = 17 \text{ kN/m}^3$. Tentukanlah :

- kohesi tanah lempung tak terdrainase (c_u).
- tipe keruntuhan lereng,
- jarak titik perpotongan antara busur lingkaran di kaki lereng.

Penyelesaian :

- Kohesi tanah lempung, digunakan grafik angka stabilitas (Gambar 4.9), dalam hal ini :

$$D = \frac{DH}{H} = \frac{9}{6} = 1,5$$

dan untuk $\beta = 30^\circ$, diperoleh $m = 0,16$.

Dari, $H_{cr} = \frac{c_u}{\gamma m}$, untuk $\gamma = \gamma_{sat} = 17 \text{ kN/m}^3$, $H_{cr} = H = 6 \text{ m}$, akan

diperoleh :

$$c_u = 17 \times 0,16 \times 6 = 16,32 \text{ kN/m}^2$$

- Tipe keruntuhan lereng sesuai dengan Gambar 4.9 adalah keruntuhan melalui dasar lereng (Gambar 4.7d).
- Jarak perpotongan busur lingkaran di kaki lereng, digunakan grafik pada Gambar 4.10b, untuk $D = 1,5$ diperoleh $n = 0,5$; maka jarak dari kaki lereng

$$x = nH_{cr} = 0,5 \times 6 = 3,0 \text{ m}$$

4.4.2 Analisis Lereng dengan Pendekatan Tegangan Efektif

Lereng yang tersusun dari tanah homogen dan memiliki nilai $c' > 0$ dan $\phi' > 0$, maka kuat geser tanah dinyatakan sebagai berikut :

$$a = \frac{c'_d (\overline{AC})r}{C_d} = \frac{\overline{AC}}{AC} \times r \quad (4.59)$$

Dalam keseimbangan gaya, dan dianggap gesekan diberikan oleh sudut gesek internal tanah (ϕ'), maka $\phi'_d = \phi'$ dan $FS_\phi = 1$. Sehingga arah gaya F membentuk sudut ϕ' terhadap bidang normal \overline{AC} yang merupakan tangen dari lingkaran yang berpusat di titik O dengan jari-jari $r \sin \phi'$. Lingkaran ini disebut lingkaran gesek (*friction circle*). Dengan demikian arah gaya-gaya W , C_d dan F dapat diketahui seperti Gambar 4.12c. Besarnya gaya kohesi C_d dapat diperoleh dari polygon gaya tersebut gaya tersebut, dan kohesi yang bekerja pada bidang runtuh dihitung dengan :

$$c'_d = \frac{C_d}{AC} \quad (4.60)$$

Penentuan lingkaran bidang runtuh dilakukan dengan cara coba-coba hingga menghasilkan c'_d yang maksimum. Dengan demikian, nilai c'_d maksimum yang bekerja pada lingkaran kritis berdasarkan keseimbangan batas, dimana $FS_c \stackrel{z}{=} FS_{\phi'} = FS_s = 1$, dan $H = H_{cr}$, $c'_d = c'$, dapat dinyatakan sebagai

$$c' = \gamma H_{cr} [f(\alpha, \beta, \phi', \theta)] \quad (4.61)$$

atau dituliskan menjadi

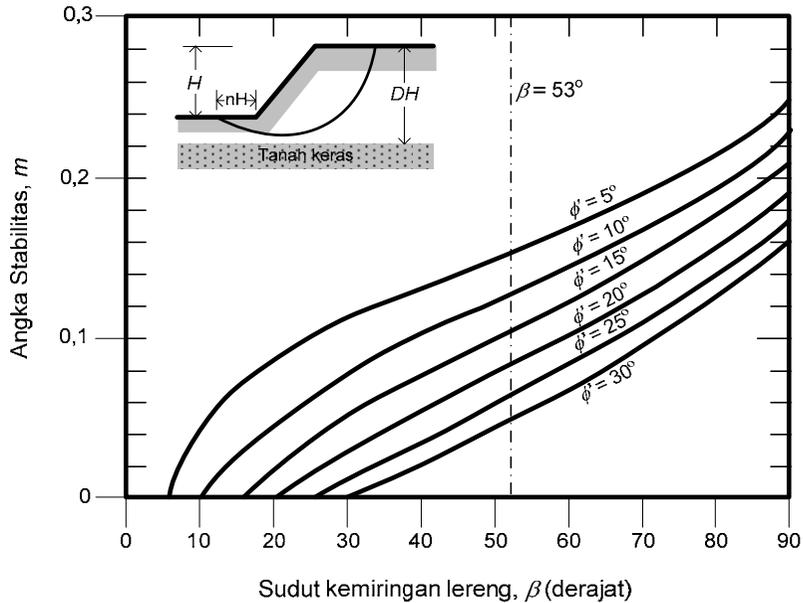
$$\frac{c'}{\gamma H_{cr}} = f(\alpha, \beta, \phi', \theta) = m \quad (4.62)$$

dengan m = angka stabilitas yang dapat diperoleh hubungannya dengan β dan ϕ' dari grafik angka stabilitas pada Gambar 4.13.

Michalowski (2002) membuat grafik yang tidak memerlukan proses coba-coba untuk menentukan kondisi kritis lereng. Grafik tersebut dirumuskan sebagai berikut :

$$N^* = \frac{c_d}{\gamma H \tan \phi_d} = \frac{c_u / FS}{\gamma H (\tan \phi' / FS)} = \frac{c_u}{\gamma H \tan \phi'} \quad (4.63)$$

Grafik stabilitas yang dibuat dari N^* tidak dapat digunakan untuk lereng yang memiliki $\phi' = 0$, karena Persamaan (4.63) menjadi tidak dapat diselesaikan (*singularity*). Kelebihan dari persamaan tersebut bahwa parameter N^* tidak tergantung dengan faktor aman (FS).



Gambar 4.13 Grafik angka stabilitas untuk $\phi' > 0$ (dimodifikasi dari Terzaghi dan Peck, 1967).

Pengaruh air pori terhadap stabilitas lereng diperhitungkan sebagai koefisien tekanan air pori (r_u) seperti yang didefinisikan oleh Bishop dan Morgenstern (1960) sebagai

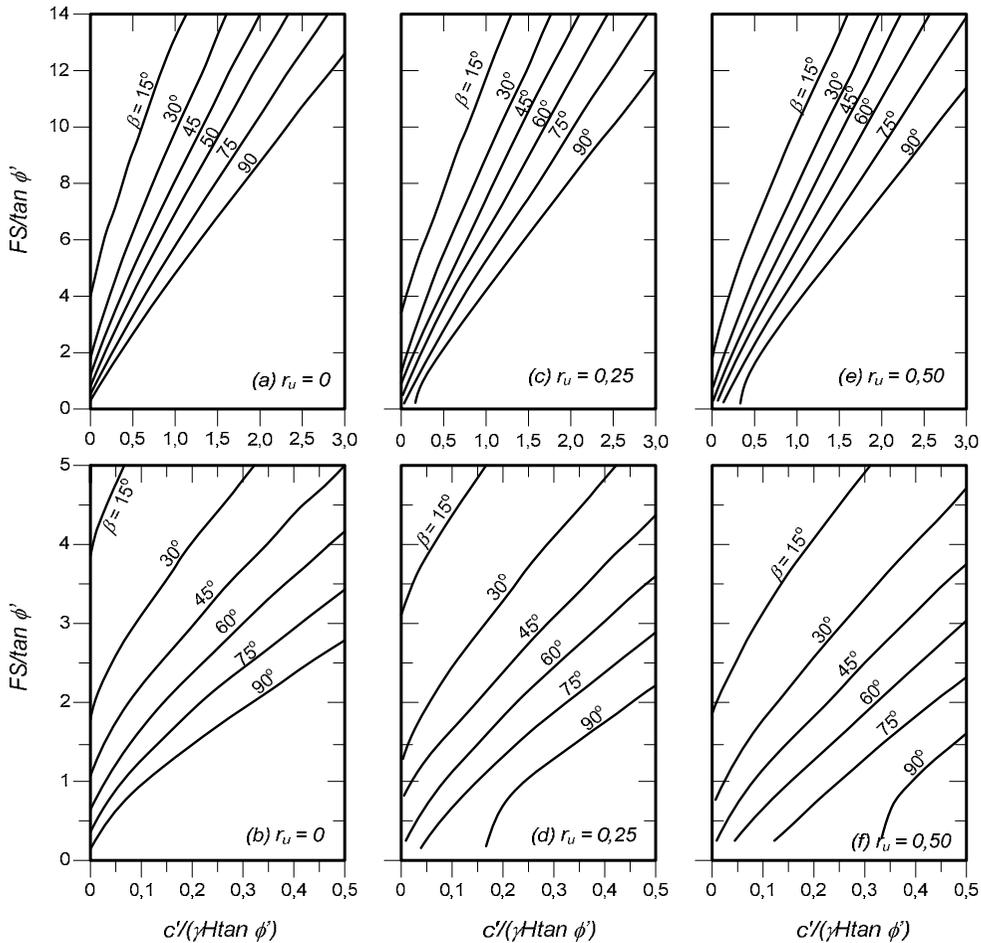
$$r_u = \frac{u}{\gamma h} \tag{4.64}$$

dengan u = tekanan air pori, γ = berat volume tanah, dan h = kedalaman titik pada bidang keruntuhan di bawah permukaan lereng.

Contoh Soal 4.6.

Suatu jalan dibangun dengan cara memotong lereng $\beta = 45^\circ$. Karakteristik tanah pada lereng $\phi' = 20^\circ$, $c' = 24 \text{ kN/m}^2$, dan $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$. Tentukanlah :

- tinggi kritis lereng (H_{cr}).
- faktor aman bila tinggi lereng dibuat 10 m.



Gambar 4. 14 Grafik stabilitas untuk lereng homogen (Dimodifikasi dari Michalowski, 2002)

Penyelesaian :

a. Tinggi kritis lereng dihitung dengan Persamaan (4.56). Dari grafik stabilitas pada Gambar 4.13, untuk $\beta = 45^\circ$, $\phi' = 20^\circ$ diperoleh $m = 0,06$. Maka :

$$H_{cr} = \frac{24}{19 \times 0,06} = 21,06 \cong 21 \text{ m}$$

b. Faktor Aman untuk $H = 10$ m.

Grafik stabilitas pada Gambar 4.13 and Persamaan (4.56), kohesi yang bekerja pada bidang keruntuhan, c_d adalah :

$$m = \frac{c_d}{\gamma H} \rightarrow c_d = 0,06 \times 19 \times 10 = 11,4 \text{ kN/m}^2$$

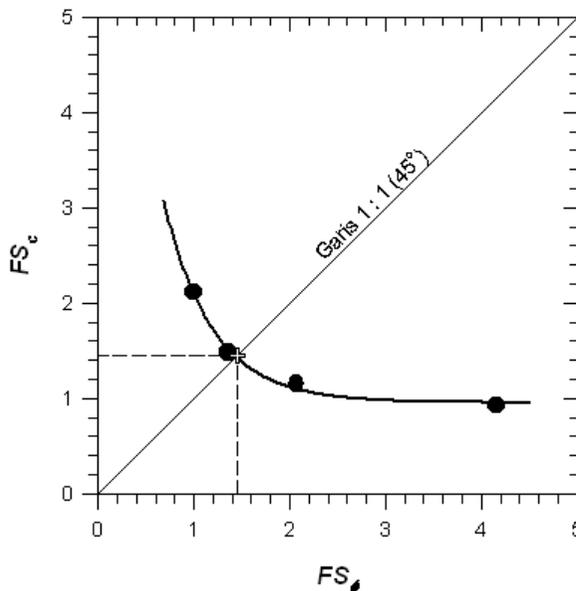
Gambar 4.13 berlaku untuk $FS_c \cong FS_{\phi'}$, dengan dianggap bahwa $\phi_d = \phi'$ (*full friction*), dimana :

$$FS_{\phi} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi_d} = \frac{\tan 20^\circ}{\tan 20^\circ} = 1, \quad \text{dan,} \quad FS_c = \frac{c'}{c_d} = \frac{24}{11,4} = 2,11$$

Karena $FS_c \neq FS_{\phi'}$, dengan demikian anggapan $\phi_d = \phi'$ tidak benar. Sehingga perlu dilakukan coba-coba terhadap parameter ϕ_d . hingga diperoleh $FS_c \cong FS_{\phi'}$ sebagai berikut :

ϕ_d (°)	$\tan \phi_d$	FS_{ϕ}	m	c_d (kN/m ²)	FS_c
20	0,364	1	0,06	11,4	2,11
15	0,268	1,36	0,085	16,2	1,48
10	0,176	2,07	0,11	20,9	1,15
5	0,0875	4,16	0,136	25,84	0,93

Hubungan antara FS_{ϕ} dan FS_c dibuat menjadi suatu grafik hubungan seperti Gambar 4.15. Perpotongan kurva dan garis kemiringan 45° menghasilkan $FS_s = 1,45$.



Gambar 4.15 Hubungan antara FS_ϕ dan FS_c untuk Contoh Soal 4.6.

Untuk $FS_c = FS_\phi = FS_s = 1,45$, diperoleh nilai ϕ_d yaitu

$$\phi_d = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 20^\circ}{1,45} \right) = 14,1^\circ$$

Contoh Soal 4.7.

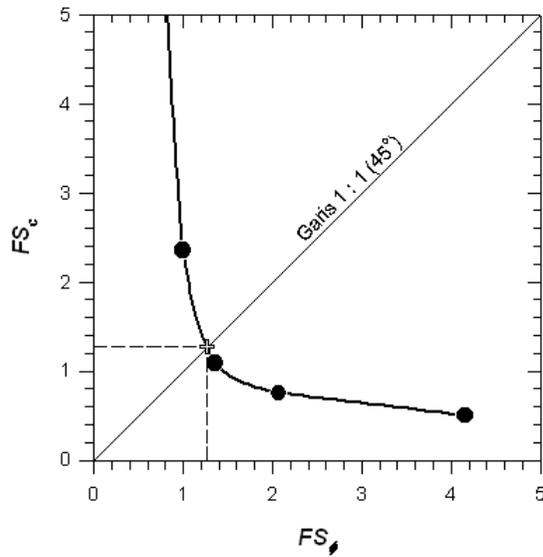
Suatu lereng dengan tinggi 10 m dan kemiringan 30° memiliki sifat-sifat tanah berikut: $\phi = 20^\circ$, $c = 10 \text{ kN/m}^2$, dan $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$. Tentukan faktor aman lereng tersebut ! Gunakan grafik stabilitas pada Gambar 4.13 dan bandingkan dengan Gambar 4.14.

Penyelesaian :

Gambar 4.13 berlaku untuk $FS_c \approx FS_\phi'$, sehingga perlu dilakukan coba-coba terhadap parameter ϕ_d . hingga diperoleh $FS_c \approx FS_\phi'$ sebagai berikut :

$\phi_d (^\circ)$	$\tan \phi_d$	FS_ϕ	m	$c_d (\text{kN/m}^2)$	FS_c
25	0,466	0,78	0,01	1,7	5,88
20	0,364	1	0,025	4,25	2,35
15	0,268	1,36	0,054	9,18	1,09
10	0,176	2,07	0,078	13,26	0,75
5	0,0875	4,16	0,117	19,89	0,50

Hubungan antara FS_ϕ dan FS_c dibuat menjadi suatu grafik hubungan seperti Gambar 4.16. Perpotongan kurva dan garis kemiringan 45° menghasilkan $FS_s = 1,27$.



Gambar 4. 16 Hubungan antara FS_ϕ dan FS_c untuk Contoh Soal 4.7.

Dibandingkan dengan menggunakan grafik pada Gambar 4.14, dengan :

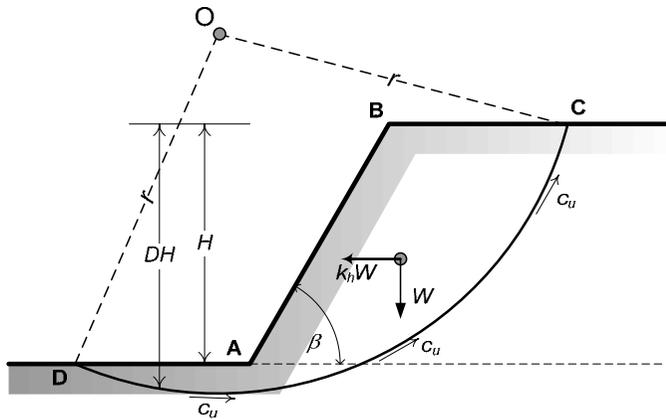
$$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'} = \frac{10}{(17 \times 10 \times \tan 20^\circ)} = 0,16$$

Kemudian dengan grafik pada Gambar 4.14b, untuk $c' / (\gamma H \tan \phi') = 0,16$ dan $\beta = 30^\circ$, diperoleh: $FS' / \tan \phi' = 3,6$. Maka, faktor aman lereng adalah:

$$FS = 3,6 \tan 20^\circ = 1,31$$

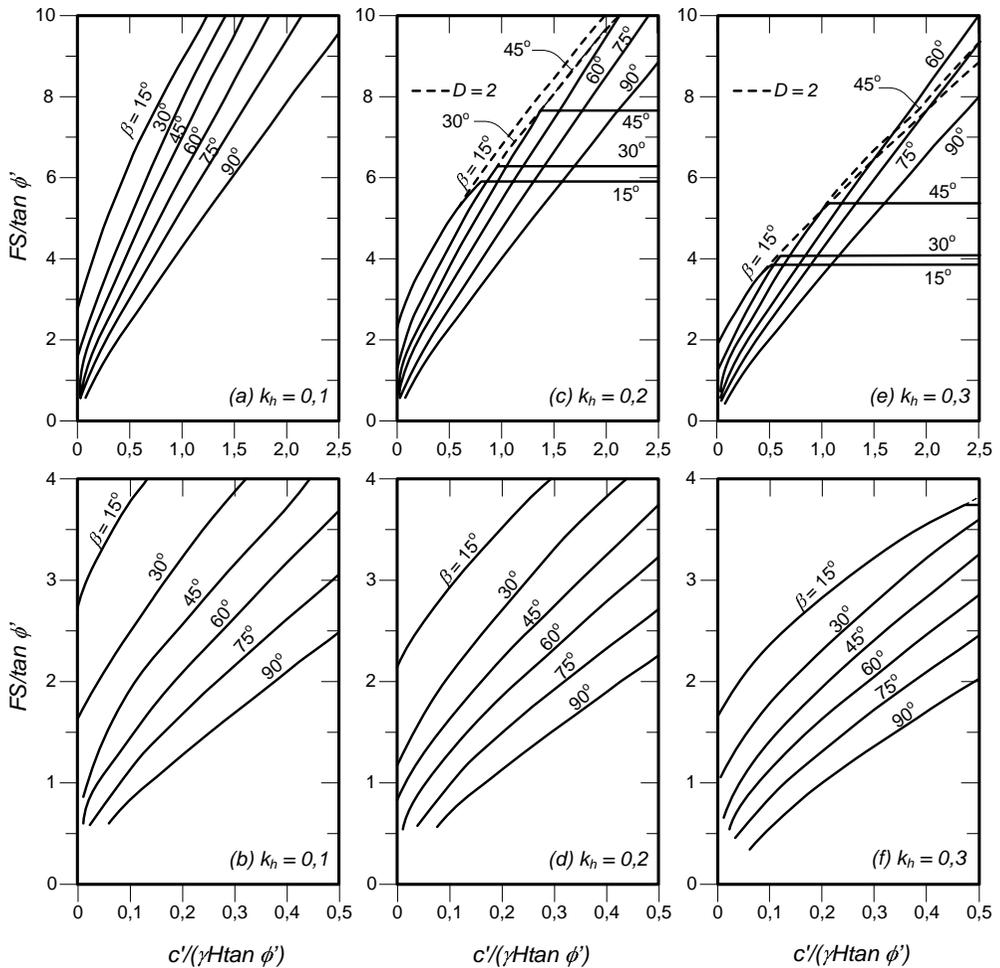
4.4.3 Pengaruh Gaya Gempa Bumi

Beban gempa pada lereng sering diperhitungkan untuk perancangan dengan pendekatan gaya semi-statis (*quasi-static*) terhadap percepatan gempa. Dalam hal ini analisis mengabaikan proses gempa (riwayat percepatan gempa). Sehingga, analisis ini tidak memberikan gambaran tentang perilaku struktur atau lereng. Gaya gempa horisontal merupakan fungsi dari berat tanah ($k_h W$) di atas bidang longsor (Gambar 4.17). Koefisien gempa (k_h) adalah intensitas percepatan horisontal terhadap percepatan gravitasi (g).



Gambar 4. 17 Analisis stabilitas pada tanah lempung basah homogen terhadap gempa bumi

Michalowski (2002) membuat grafik stabilitas lereng akibat pengaruh gaya gempa horisontal. Grafik tersebut (Gambar 4.18) didasarkan pada pendekatan analisis batas kinematik. Dalam analisis tersebut, tekanan air pori diabaikan ($r_u = 0$). Dengan demikian, pendekatan semi-statis ini adalah pendekatan kasar terhadap pengaruh gaya gempa horisontal. Oleh karena itu, faktor aman hasil analisis belum dapat dikatakan sebagai faktor aman yang sebenarnya. Faktor aman yang disajikan dalam grafik sebagai $F/\tan \phi$ bertambah terhadap N^* atau $c/\gamma H \tan \phi$ hingga batas tertentu, kemudian setelah itu, faktor aman tidak bergantung pada fungsi N^* lagi.



Gambar 4. 18 Grafik stabilitas lereng akibat pengaruh gaya gempa horizontal (Dimodifikasi dari Michalowski, 2002)

Contoh Soal 4.8.

Lereng dengan kondisi seperti contoh soal 4.7. Tentukan faktor aman lereng bila koefisien gaya gempa horisontal $k_h = 0,1$ dan tekanan air pori $r_u = 0,25$!

Penyelesaian :

Digunakan grafik pada Gambar 4.18, dengan :

$$\frac{c'}{\gamma H \tan \phi'} = \frac{10}{(17 \times 10 \times \tan 20^\circ)} = 0,16$$

Kemudian dengan grafik pada Gambar 4.18b, untuk $c'(\gamma H \tan \phi) = 0,16$; $k_h = 0,1$ dan $\beta = 30^\circ$, diperoleh: $FS/\tan \phi' = 2,95$. Maka, faktor aman lereng adalah:

$$FS = 2,95 \times \tan 20^\circ = 1,1$$

Untuk $r_u = 0,25$, digunakan Gambar 4.14d, dan diperoleh $FS/\tan \phi' = 2,95$. Faktor aman, $FS = 1,1$.

Dengan demikian, akibat pengaruh gaya gempa dengan $k_h = 0,1$ atau pengaruh tekanan air pori dengan $r_u = 0,25$, maka lereng memiliki faktor aman yang sama.

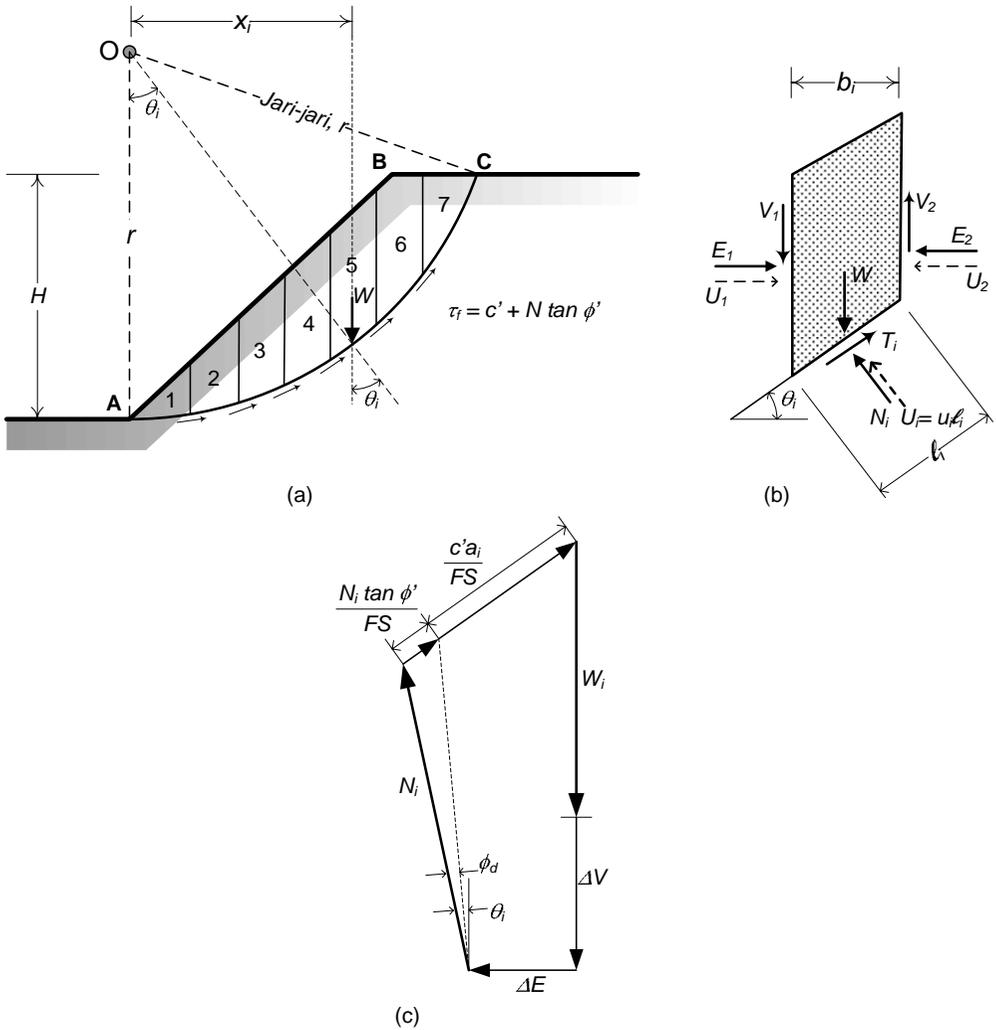
4.5 METODE IRISAN

Analisis lereng dengan metode irisan menganggap bahwa tanah di atas bidang keruntuhan terdiri atas beberapa bagian blok-blok tanah kecil atau irisan tanah (Gambar 4.19a). Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran bidang longsor, terutama dipengaruhi oleh berat tanah di atas titik itu. Analisis keseimbangan gaya kemudian dilakukan pada setiap irisan tersebut. Gambar 4.19b menunjukkan satu irisan dengan gaya-gaya yang bekerja padanya. Gaya ini terdiri atas gaya geser (V_1 dan V_2) dan gaya normal efektif (E_1 dan E_2) di sepanjang sisi irisannya, dan juga resultan gaya geser efektif (T_i) dan resultan gaya normal efektif (N_i) yang bekerja di sepanjang dasar irisannya. Gaya akibat tekanan air pori U_1 dan U_2 bekerja di kedua sisinya, dan gaya tekan air pori U_i bekerja pada dasarnya. Dianggap tekanan air pori u_i sudah diketahui sebelumnya.

Untuk menyelesaikan analisis stabilitas lereng dengan metode irisan terdapat beberapa metode pendekatan seperti metode Swedia, Bishop, dan Morgenstern.

4.5.1 Metode Fellenius

Metode Fellenius ini dikenal pula sebagai Metode Swedia (*Swedish method*). Analisis stabilitas lereng oleh Fellenius (1927), menganggap gaya-gaya yang bekerja pada bagian kanan - kiri irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus bidang longsohnya, $E_1 = E_2$ dan $V_1 = V_2$.



Gambar 4. 19 Gaya-gaya yang bekerja pada irisan

Dengan anggapan ini, keseimbangan arah vertikal dari gaya-gaya yang bekerja dengan memperhatikan tekanan air pori adalah :

$$N_i + U_i = W_i \cos \theta_i \quad (4.65)$$

atau

$$N_i = W_i \cos \theta_i - U_i = W_i \cos \theta_i - u_i l_i \quad (4.66)$$

Faktor aman didefinisikan sebagai.

$$FS = \frac{\sum M_r}{\sum M_d} \quad (4.67)$$

Lengan momen dari berat massa tanah tiap irisan adalah $r \sin \theta_i$, maka

$$\sum M_d = r \sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i \quad (4.68)$$

dengan, r = jari-jari lingkaran bidang longsor

n = jumlah irisan

W_i = berat massa tanah irisan ke- i

θ_i = sudut

Dengan cara yang sama, momen yang menahan tanah yang akan longsor, adalah

$$\sum M_r = r \sum_{i=1}^{i=1} (c' \ell_i + N_i \tan \phi') \quad (4.69)$$

maka persamaan faktor aman menjadi :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{i=1} (c' \ell_i + N_i \tan \phi')}{\sum_{i=1}^{i=1} W_i \sin \theta_i} \quad (4.70)$$

Metode Fellinius memberikan faktor aman yang relatif 20% lebih rendah dari cara hitungan yang lebih teliti. Batas-batas nilai kesalahan dapat mencapai kira-kira 5-40% tergantung dari faktor aman, sudut pusat lingkaran yang dipilih, dan besarnya tekanan air pori. Untuk menentukan faktor aman yang kritis, terlebih dahulu ditentukan letak pusat lingkaran dan jari-jarinya guna membuat bidang keruntuhan. Dengan demikian, diperlukan beberapa percobaan bidang keruntuhan untuk menghasilkan nilai FS yang paling minimum.

4.5.2 Metode Bishop - Disederhanakan

Metode Bishop-disederhanakan (*simplified-Bishop*) ini menganggap bahwa gaya-gaya geser di samping irisan adalah sama dan saling berlawanan arah, $V_1 = V_2$. Tetapi gaya-gaya normal pada irisan tidak sama besarnya, $E_1 \neq E_2$. Keseimbangan gaya-gaya pada arah vertikal memberikan:

$$N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta = W_i + V_i \quad (4.71)$$

$$T_i = N_i \tan \phi'_d + c'_d \ell_i = \frac{N_i \tan \phi' + c' \ell_i}{FS} \quad (4.72)$$

Keseimbangan gaya dari Gambar 4.19.c untuk irisan ke- i pada arah vertikal, dimana $E_2 - E_1 = \Delta E$ dan $V_2 - V_1 = \Delta V$:

$$W_i + \Delta V = N_i \cos \theta_i + \left(\frac{N_i \tan \phi' + c' \ell_i}{FS} \right) \sin \theta_i$$

$$\text{atau } N_i = \frac{W_i + \Delta V - \frac{c' \ell_i}{FS} \sin \theta_i}{\cos \theta_i + \frac{\tan \phi' \sin \theta_i}{FS}} \quad (4.73)$$

Tinjauan keseluruhan bidang runtuh terhadap keseimbangan momen di titik O (lihat Gambar 4.19a) diperoleh :

$$\sum_{i=1}^n W_i r \sin \theta_i = \sum_{i=1}^n T_i r \quad (4.74)$$

dimana

$$T_i = \frac{(c' + \sigma' \tan \phi') \ell_i}{FS} = \frac{(c' \ell_i + N_i \tan \phi')}{FS} \quad (4.75)$$

Substitusi persamaan (4.73) dan (4.75) ke dalam persamaan (4.74) diperoleh :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c' b_i + W_i \tan \phi' + \Delta V \tan \phi') \frac{1}{\left(\cos \theta_i + \frac{\tan \phi' \sin \theta_i}{FS} \right)}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (4.76)$$

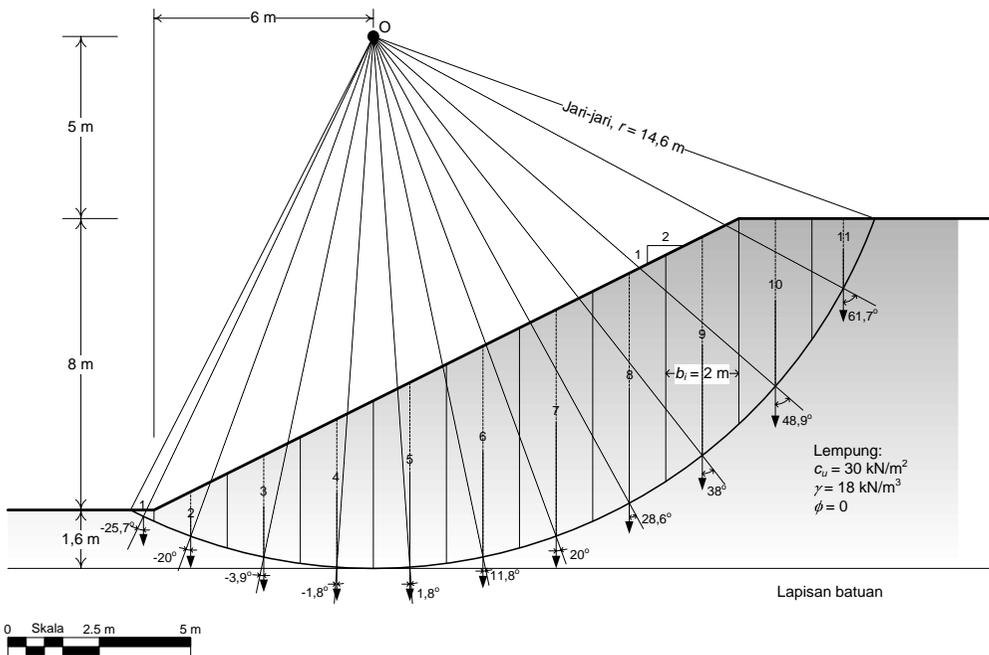
Bila $\Delta V = 0$, maka persamaan (4.76) dapat disederhanakan menjadi:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c' b_i + W_i \tan \phi') \frac{1}{\left(\cos \theta_i + \frac{\tan \phi' \sin \theta_i}{FS} \right)}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (4.77)$$

Persamaan (4.76) atau (4.77) memuat variabel FS pada bagian kiri dan kanan persamaan. Untuk itu, nilai FS hanya dapat diperoleh dengan cara iterasi atau coba-coba (*trial - and - error*). Dewasa ini, iterasi dapat dilakukan dengan menggunakan komputer. Dalam buku ini akan diberikan contoh hasil analisis dengan menggunakan aplikasi PCSTABL5M.

Contoh Soal 4.9.

Lereng dengan kondisi seperti pada Gambar 4.20. Kemiringan lereng adalah 2 : 1. Bidang runtuh terjadi di atas lapisan batuan. Parameter tanah di atas lapisan batuan yaitu $c_u = 30 \text{ kN/m}^2$, $\phi = 0$, dan $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$. Tentukan faktor aman FS menurut metode Fellenius !



Gambar 4. 20 Konidisi lereng untuk contoh soal 4.9.

Penyelesaian :

Pusat lingkaran di titik O berjarak 6 m dari kaki lereng dan 5 meter di atas puncak lereng.

Faktor aman dihitung dengan persamaan (4.70), dimana komponen $(N_i \tan \phi) = 0$. Gaya-gaya yang bekerja di masing-masing irisan dihitung sebagai berikut :

No. Irisan	Lebar b (m)	Tinggi h (m)	Berat $W = \gamma bh$ (kN)	θ (deg)	$\ell = b \cos \theta$ (m)	$W \sin \theta$ (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	0,65	0,15	1,760	-25,7	0,721	-0,761
2	2	1,243	44,748	-20	2,128	-15,305
3	2	2,809	101,124	-3,9	2,005	-6,878
4	2	4,054	145,944	-1,8	2,001	-4,584
5	2	5,061	182,196	3,9	2,005	12,392
6	2	5,797	208,692	11,8	2,043	42,677
7	2	6,213	223,668	20	2,128	76,499
8	2	6,312	227,232	28,6	2,278	108,774
9	2	5,998	215,928	38	2,538	132,939
10	2	4,6	165,600	48,9	3,042	124,790
11	1,7	1,915	58,599	61,7	3,586	51,595
Σ					24,476	522,138
FS						1,41

$$\text{Faktor aman, } FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left(c' \ell_i + \overbrace{N_i \tan \phi'}^{=0} \right)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} = \frac{30 \times 24,476}{522,138} = 1,41$$

Contoh Soal 4.10.

Lereng dengan kemiringan 2 : 1 seperti pada Gambar 4.21. Bidang runtuh berbentuk lingkaran dengan jari-jari $r = 19,6$ m. Parameter tanah di atas lapisan batuan yaitu $c' = 5$ kN/m², $\phi' = 30^\circ$, dan $\gamma = 20$ kN/m³. Tentukan faktor aman FS menurut metode Bishop-disederhanakan !

Penyelesaian :

Pusat lingkaran di titik O berjarak 4 m dari kaki lereng dan 8,55 meter di atas puncak lereng. Faktor aman dihitung dengan persamaan (4.77) dan gaya-gaya yang bekerja di masing-masing irisan dihitung sebagai berikut :

No. Irisan	Lebar b (m)	Tinggi h (m)	Berat W (kN)	θ (deg)	N_r (kN)	$FS_a =$		
						1.65 N_d (kN)	1.73 N_d (kN)	1.75 N_d (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	2,5	0,4	20	-15,4	-5,311	27,603	27,460	27,443

2	2	1,384	55,36	-8,8	-8,469	44,894	44,769	44,753
3	2	2,594	103,76	-2,9	-5,250	71,259	71,196	71,188
4	2	3,593	143,72	2,9	7,271	91,475	91,552	91,562
5	2	4,372	174,88	8,8	26,754	106,519	106,786	106,820
6	2	4,598	183,92	14,8	46,982	110,003	110,459	110,516
7	2	5,314	212,56	20,9	75,828	125,324	126,047	126,139
8	2	5,421	216,84	27,3	99,454	128,865	129,832	129,955
9	2	5,231	209,24	34,1	117,308	127,710	128,912	129,065
10	2	4,691	187,64	41,5	124,334	120,649	122,054	122,233
11	2	3,636	145,44	49,9	111,250	103,062	104,557	104,748
12	1,67	1,695	56,613	58,7	48,373	50,135	51,043	51,159
Σ					638,525	1107,497	1114,668	1115,580
					FS _c =	1,73	1,75	1,75

Keterangan:

$N_r = W_i \sin \theta_i$; dan $N_d = (c' b_i + W_i \tan \phi') / [\cos \theta_i + (\tan \phi' \sin \theta_i / FS)]$

FS_a = faktor aman yang diasumsikan; FS_c = faktor aman yang dihitung dengan persamaan (4.77) = N_d / N_r

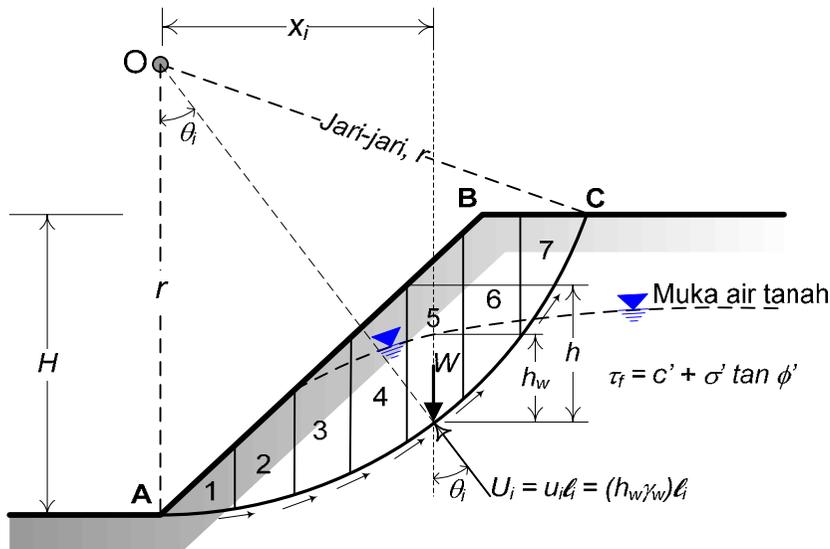
Penghitungan faktor aman dengan persamaan (4.77) perlu dilakukan beberapa kali secara *trial - and - error*. Mula-mula diambil nilai FS_a = 1,65, kemudian diperoleh FS_c = 1,73. Karena FS_a ≠ FS_c, maka dilanjutkan penghitungannya seperti pada tabel hingga FS_a = FS_c, dan diperoleh FS = 1,75.

Bila dibandingkan dengan metode Fellenius :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c' l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi')}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} = \frac{(5 \times 25,297) + (1470,534 \times \tan 30^\circ)}{590,151} = 1,65$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode Fellenius memberikan nilai yang lebih rendah 6% dari metode Bishop-disederhanakan.

dengan, u_i = tekanan air pori pada irisan ke- i ,
 $h_{w,i}$ = tinggi tekanan air pada irisan ke- i , dan
 g_w = berat volume air = 9,81 kN/m².



Gambar 4. 22 Analisis stabilitas lereng akibat pengaruh muka air tanah atau rembesan.

Memperhatikan tekanan air pori yang bekerja pada setiap irisan, persamaan (4.70) ditulis kembali menjadi :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^{i=1} [c' \ell_i + (W_i \cos \theta_i - u_i \ell_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^{i=1} W_i \sin \theta_i} \quad (4.79)$$

Dan persamaan (4.77) menjadi :

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \left(\frac{1}{\cos \theta_i + \frac{\tan \phi' \sin \theta_i}{FS}} \right) \quad (4.80)$$

Perlu diperhatikan disini bahwa W_i adalah berat total irisan ke- i , $W_i = \gamma b_i h_i$.

No. Irisan	h_w (m)	$u = \gamma_w h_w$ (kN/m ²)	FS _a =		
			1,3	1,35	1,36
(1)	(7)	(8)	N _d (kN)	N _d (kN)	N _d (kN)
(1)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
3	1,889	18,531	49,688	49,647	49,640
4	2,423	23,770	64,170	64,221	64,229
5	2,753	27,007	75,539	75,714	75,743
6	2,875	28,204	77,406	77,699	77,747
7	2,772	27,193	92,731	93,217	93,297
8	2,417	23,711	98,703	99,368	99,478
9	1,745	17,118	103,095	103,958	104,101
10	0,747	7,328	105,319	106,397	106,575
11	0	0	95,514	96,713	96,912
12	0	0	45,646	46,349	46,466
Σ			861,014	866,296	867,170
FS _c = [N _d]/[6]			1,35	1,36	1,36

Keterangan:

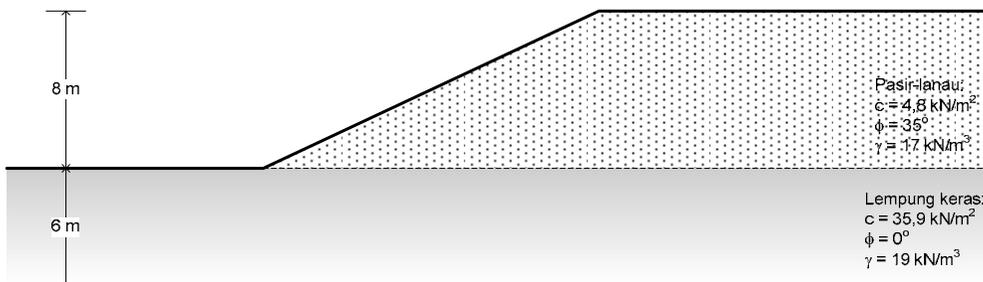
$N_r = W_i \sin \theta_i$; dan $N_d = [c \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \tan \phi'] / [\cos \theta_i + (\tan \phi' \sin \theta_i / FS)]$

FS_a = faktor aman yang diasumsikan; FS_c = faktor aman yang dihitung dengan persamaan (4.80) = N_d / N_r

Penghitungan menghasilkan faktor aman, FS = 1,36.

Contoh Soal 4.11.

Lereng dengan kemiringan 2 : 1 seperti pada Gambar 4.24. Tentukan faktor aman *FS* menurut metode Bishop-disederhanakan !

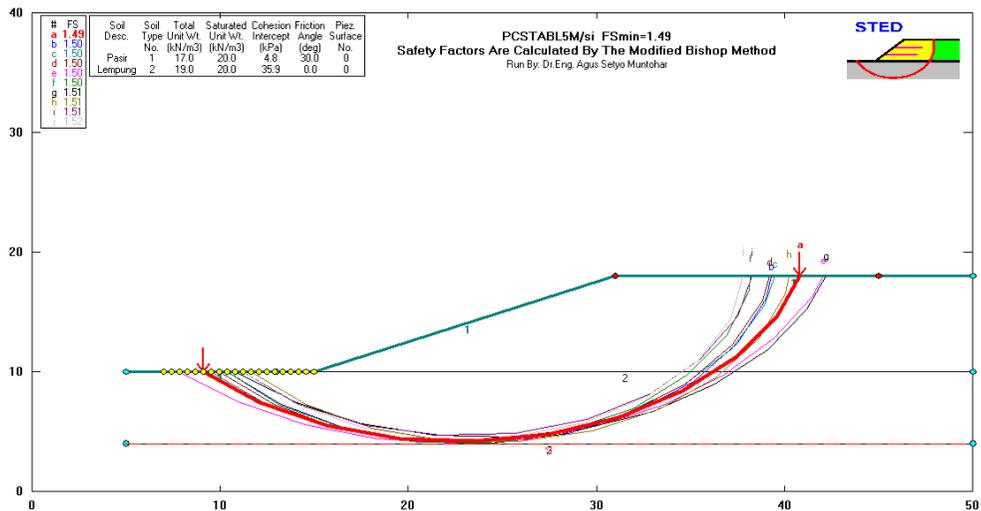


Gambar 4. 24 Kondisi lereng untuk contoh soal 4.11.

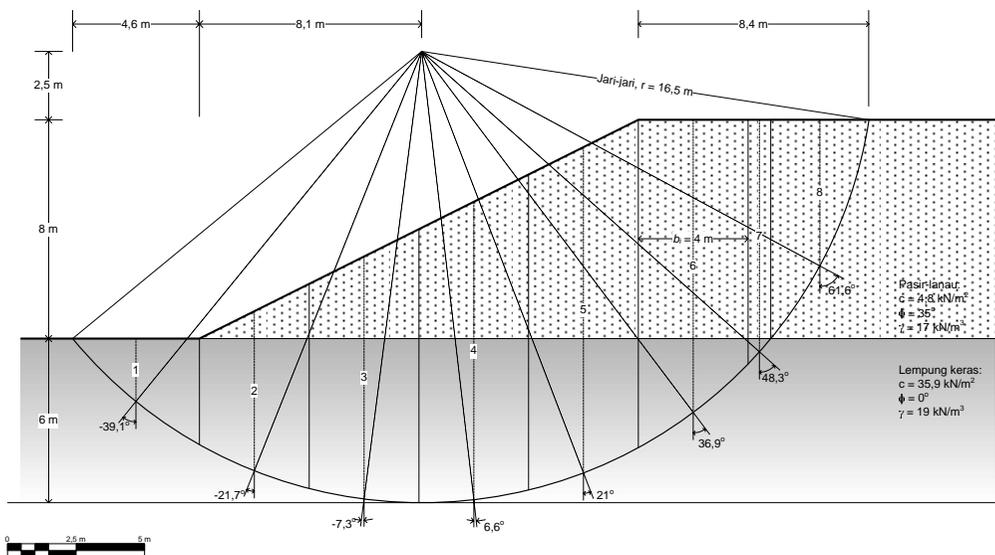
Penyelesaian :

Digunakan program komputer PCSTABL5M untuk analisis stabilitas lereng. Diperoleh faktor aman minimum, FS = 1,48; dengan pusat lingkaran berada pada jarak 8,1 m dari kaki lereng dan 2,5 m di atas

puncak lereng. Jari-jari lingkaran, $r = 16,5$ m. Hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 4.25.



Gambar 4. 25 Hasil analisis stabilitas lereng dengan program komputer PCSTABL5M.



Gambar 4. 26 Analisis lereng dengan metode Bishop-disederhanakan untuk contoh soal 4.11.

Bila faktor aman dihitung dengan persamaan (4.77), maka gaya-gaya yang bekerja di masing-masing irisan dihitung sebagai berikut (lihat juga Gambar 4.26) :

No. Irisan	b (m)	Tinggi		W (kN)	θ (deg)	N_r (kN)	$FS_a =$		
		h_1 (m)	h_2 (m)				1,4 N_d (kN)	1,53 N_d (kN)	1,55 N_d (kN)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(9)	(10)	(11)
1	4,6	0	2,3	201,02	-39,1	-126,78	212,79	212,79	212,79
2	4	0,99	4,83	434,4	-21,7	-160,62	154,55	154,55	154,55
3	4	3	5,87	650,12	-7,3	-82,61	144,77	144,77	144,77
4	4	4,99	5,89	786,96	6,6	90,45	144,59	144,59	144,59
5	4	7	4,89	847,64	21	303,77	153,82	153,82	153,82
6	4	8	2,7	749,2	36,9	449,84	179,57	179,57	179,57
7	0,83	8	0,48	120,45	48,3	89,93	44,79	44,79	44,79
8	3,582	5,34	0	325,17	61,6	286,04	267,46	279,02	280,15
Σ						850,02	1302,32	1313,88	1315,01
$FS_c =$							1,53	1,55	1,55

Faktor aman hasil penghitungan adalah $FS = 1,55$ yang mana lebih besar daripada hasil analisis dengan program PCSTABL5M.

4.6 FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KETETAPAN HITUNGAN ANALISIS STABILITAS LERENG

Sejumlah anggapan yang telah dibuat dalam analisis stabilitas lereng sering memberikan hasil analisis tidak sepeerti yang diperkirakan. Beberapa masalah yang menjadikan ketidaktentuan hasil analisis stabilitas lereng, antara lain:

1. Kelongsoran lereng umumnya adalah masalah bidang 3 dimensi.
2. Kondisi pembebanan pada waktu pengujian di laboratorium (biasanya pengujian triaksial kompresi) mungkin tidak cocok dengan kondisi kedudukan tegangan-tegangan di lapangan. Kerusakan contoh benda uji juga sangat mempengaruhi hasil pengujiannya.
3. Sifat kuat geser tanah di lapangan yang anisotropis menyebabkan nilai parameternya bervariasi di sepanjang permukaan bidang longsor

4.7 SOAL-SOAL LATIHAN

1. Uraikan secara singkat tentang faktor aman ?
- 2.
3. Lereng tak terhingga seperti Gambar 4.2, $H = 5$ m, $\beta = 20^\circ$, $c' = 20$ kPa, $\phi' = 15^\circ$, $\gamma = 17$ kN/m³, dan $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³. Tentukan faktor

- keamanan lereng: (1) bila tidak terjadi rembesan, (2) dengan rembesan !
4. Lereng tak terhingga dengan rembesan seperti Gambar 4.2, $H = 4$ m, $\beta = 15^\circ$, $c' = 30$ kPa, $\phi' = 20^\circ$, dan $\gamma = 20$ kN/m³. Tentukan faktor keamanan untuk koefisien tekanan air pori $r_u = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; \text{ dan } 0,6$! Berapakah tekanan air pori kritis (yaitu pada saat FS = 1) ?
 5. Suatu lereng yang akan dibentuk dari suatu tanah dengan, $c' = 3,4$ kPa, $\phi' = 15^\circ$, $\gamma = 18$ kN/m³. Kemiringan lereng akan dibuat dengan sudut $\beta = 40^\circ$ terhadap bidang horisontal. Tentukan tinggi bagian tanah yang dipotong (*cutting slope*) untuk membentuk lereng dengan faktor keamanan FS = 2,5 !
 6. Suatu lereng dengan tinggi 6 m memiliki sifat-sifat tanah : $c' = 12$ kPa, $\phi' = 30^\circ$, $\gamma = 21$ kN/m³. Berapakah kemiringan kritis lereng tersebut ? (yaitu pada FS = 1)
 7. Suatu lereng (*cut slope*) dari tanah lempung memiliki sudut kemiringan $\beta = 40^\circ$. Tanah dalam kondisi jenuh air, berat volume tanah $\gamma = 17$ kN/m³, kuat geser tak terdrainase $c_u = 5$ kN/m², $\phi = 20$. Tentukanlah :
 - a. Tinggi lereng yang dibuat (dianggap bidang keruntuhan berbentuk lingkaran) ! Apakah tipe keruntuhannya (longsor di kaki, tengah, atau badan lereng) ?
 - b. Tentukan jarak perpotongan lingkaran dengan lereng ?
 - c. Berapakah tinggi lereng bila faktor aman FS = 1,5 ?
 8. Lereng dari tanah lempung memiliki sudut kemiringan $\beta = 60^\circ$. Tinggi lereng adalah 8 m, dan lapisan batuan berada 10 m dari permukaan tanah. Tanah berada dalam kondisi tak terdrainase dan $\gamma_{sat} = 22$ kN/m³. Tentukanlah :
 - a. kohesi tanah lempung tak terdrainase (c_u).
 - b. tipe keruntuhan lereng,
 - c. jarak titik perpotongan antara busur lingkaran di kaki lereng.
 9. Lereng di tepi jalan memiliki kemiringan $\beta = 60^\circ$. Karakteristik tanah pada lereng $\phi' = 30^\circ$, $c' = 21$ kN/m², dan $\gamma = 19,6$ kN/m³. Tentukanlah :
 - a. tinggi kritis lereng (H_{cr}).
 - b. faktor aman bila tinggi lereng dibuat 12 m.

Duncan, J.M., Buchignani, A.L., and De Wet, M., 1987, An Engineering Manual for Slope Stability Studies, Virginia University of Technology, Blacksburg, Virginia.

Fellenius, W., 1927, Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen, Ernst & Sohn, Berlin.

Michalowski, R.L., 1995, Slope Stability Analysis: A Kinematical Approach, Géotechnique, Vol. 45, No. 2, pp. 283-293

Michalowski, R.L., 2002, Stability Charts for Uniform Slopes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 4, pp. 351-355

Taylor, D.W., 1937, 'Stability of earth slopes. Journal of Boston Society of Civil Engineer, 24(3). Reprinted in: Contributions to Soil Mechanics 1925 to 1940, Boston Society of Civil Engineers, 337-386.

Riwayat Penulis

Lahir di Purworejo pada 14 Agustus 1975. Menamatkan SD, SMP, dan SMA di Maliana (ex Timor-Timur). Setelah menamatkan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Maliana, pada 1993, melanjutkan studi di Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada (UGM) dan meraih gelar Sarjana Teknik pada Februari 1998. Tahun 2001-2002 menyelesaikan program Master of Engineering Science dalam bidang Geotechnical Engineering di Department of Civil Engineering, University of Malaya (UM), Malaysia. Mulai September 2005 menempuh program *doctoral* bidang Geotechnical Engineering di Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology (Taiwan Tech), Taiwan. Pada pertengahan tahun 2006 menjadi Research Ph.D student di Department of Ocean Civil Engineering, Kagoshima University, Japan. Gelar Doctor of Engineering diraih dalam waktu 2 tahun 4 bulan. Program Post-Doctoral diikuti di Taiwan Tech dalam bidang pemodelan probabilitas tanah longsor.



Akhir 1998-1999 terlibat dalam Studi Kelayakan Bendungan Banyuripan, Yogyakarta Bendungan Pesanggrahan, Bogor, perencanaan Kawasan KIE di Kalimantan Timur, dan studi lahan gambut di Kalimantan Tengah. Sewaktu mahasiswa aktif di organisasi mahasiswa dan Asisten Dosen di Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada hingga tahun 1998. Pada tahun 1996-1997 sebagai Ketua Korps Asisten Teknik Sipil (KATS). Sejak April 1999 sebagai Dosen di Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Tahun 2002-2003 sebagai Research Assistant di University of Malaya program *Intensified Research on Priority Area (IRPA)* dalam bidang *ground improvement techniques on soft soils*. Pada tahun yang sama juga mendapatkan hibah penelitian Vot-F tentang pemanfaatan limbah untuk perbaikan tanah dari universitas yang sama.

Selain mengajar Mekanika Tanah, juga menangani pekerjaan-pekerjaan penyelidikan tanah. Hingga kini aktif melakukan penelitian dan mempublikasikan naskah ilmiah bidang geoteknik pada tingkat nasional dan internasional. Pada tahun 2000 mendapatkan penghargaan "makalah terbaik" untuk bidang Teknik Sipil, tahun 2006 mendapatkan penghargaan "Gold Medal" kategori "*invention and innovation*" dari University of Malaya dalam bidang penelitian perbaikan tanah untuk industri konstruksi. Buku lainnya yang telah ditulis berjudul Jembatan, Analisis Struktur Statis Tak Tentu, dan Geoteknik - Mekanika Tanah.

