



Disertasi RC-186601

**PENGEMBANGAN PROGRAM BANTU ANALISA STABILITAS
LERENG BERDASARKAN “*THE CONCEPT OF CRACKED SOIL*”**

**DEWI AMALIA
03111560010002**

Dosen Pembimbing :

**Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D.
Prof. Ir. Noor Endah Mochtar, M.Sc., Ph.D.**

**Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Doktor (Dr.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :

Dewi Amalia

NRP. 03111560010002

Tanggal Ujian : 12 Maret 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh :

Pembimbing :

1. Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19530408 197603 1 002

Indrasurya B. Mochtar

2. Prof. Ir. Noor Endah Mochtar, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19510708 197603 2 001

(*Noor Endah Mochtar*)

Penguji :

1. Dr. Yudhi Lastiasih, S.T., M.T.
NIP. 197701222005012002

(*Yudhi Lastiasih*)

2. Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si
NIP. 19660414 199102 2 001

(*Erna Apriliani*)

3. Prof. Ir. Wayan Redana, M.A.Sc., Ph.D.
NIP. 19591025 198603 1 003

(*Wayan Redana*)



Halaman ini sengaja dikosongka

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmaanirrahiim

Segala ucapan puja dan puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang telah melimpahkan rahmat, taufik serta hidayah-Nya sehingga penulis diberi kemudahan dalam menjalani dan menyelesaikan penelitian Disertasi ini. Tidak lupa Shalawat beserta salam semoga terlimpahkan pada Nabi Besar Muhammad Saw, Kepada Keluarganya, para Sahabatnya, Pengikutnya, dan kepada pengikutnya sampai hari kiamat kelak.

Penulis menyadari bahwa Disertasi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak yang telah Allah kirimkan untuk membantu dan mempermudah proses penelitian ini. Penulis menyampaikan terimakasih kepada :

1. Rektor Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas kesempatan belajar yang diberikan untuk mengikuti pendidikan Program Doktor Jurusan Teknik Sipil di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
2. Direktur Politeknik Negeri Bandung atas tugas yang diberikan untuk mengikuti pendidikan Program Doktor Jurusan Teknik Sipil di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Pembantu Direktur 1 Politeknik Negeri Bandung atas kesempatan, dukungan, dan fasilitas yang diberikan dalam penyelesaian pendidikan Program Doktor di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Dekan Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan dukungan luar biasa dalam pelaksanaan terlaksananya tugas belajar.
5. Ketua Program Studi Pasca Sarjana Departemen Teknik Sipil yang telah memberikan banyak fasilitasi dan dorongan semangat untuk menyelesaikan tugas yang diberikan hingga selesainya penulisan disertasi.
6. Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D., selaku Promotor 1, pembimbing akademik yang telah banyak memberikan dukungan yang luar biasa, wawasan, motivasi, saran, waktu, dan segala keikhlasan membimbing penulis. Beliau bagaikan padi, semakin berisi semakin merunduk. Dari beliau

penulis banyak belajar tentang kerendahan hati seorang ilmuwan. Semoga Allah membalas beliau dengan ketinggian derajat di dunia dan di akherat.

7. Prof. Ir. Noor Endah Mochtar, M.Sc., Ph.D., selaku Ko-Promotor, atas ilmu pengetahuan, saran, dan masukan yang sangat kritis terutama dalam hal penulisan juga kesabaran, pengertian, dan kerelaan membagi ilmu serta nasehat kepada penulis. Dari beliau penulis belajar akan rasa tanggungjawab dan amanah seorang ibu sekaligus dosen terhadap keluarga, institusi, dan anak didiknya. Semoga Allah membalasnya dengan keberkahan dunia dan akherat.
8. Dr. Yudhi Lastiasih, S.T., M.T. selaku penguji internal disertasi, atas koreksi yang sangat teliti, atas inspirasi, saran dan masukan yang sangat berharga kepada penulis.
9. Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku penguji internal ITS dari Departemen Matematika ITS atas kesediaan beliau meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan saran yang sangat berharga untuk penyempurnaan disertasi ini.
10. Prof. Ir. Wayan Redana, M.A.Sc., Ph.D. selaku penguji eksternal ITS dari Jurusan Teknik Sipil Universitas Udayana atas kesediaan beliau meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan saran yang sangat berharga untuk penyempurnaan disertasi ini.
11. Kolega dan Staf Laboratorium Mekanika Tanah Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Terimakasih kepada Prof. Dr. Ir. Herman Wahyudi, Putu Tantri Kumala Sari, ST., MT. (sahabat terbaik penulis sejak S1), Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, ST., MT., dan Musta'in Arif, ST, MT. yang memberikan dukungan support yang luar biasa bagi disertasi ini.
12. Dr. Faisal Estu Y., ST, MT selaku Wakil Rektor 1 Universitas Madura di Pamekasan Madura, Dr. Alexsander Stephanus, S.T., M.T. dari PT. Cemara Geo Engineering - Palangkaraya dan Dr. Yusti Yudiawati S.T. M.T. dari PT. Tiyasa Total Rekayasa yang telah berkenan dengan sabar berdiskusi, memberi masukan, dan bantuan teknis maupun non teknis kepada penulis.
13. Rekan-rekan angkatan 2015 Program Studi Teknik Sipil di Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas bantuan, kerjasama, dan motivasinya. Dari mereka penulis belajar tentang perhatian, keuletan, kegigihan, rendah hati, dan

pengorbanan. Semoga Allah memudahkan mereka dalam dalam melaksanakan amanah yang mereka emban.

14. Seluruh tenaga cleaning service dan seluruh staf administrasi di lingkungan Departemen Teknik Sipil di Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah membantu kelancaran proses administrasi selama menjalani pendidikan. Semoga Allah membalas mereka dengan kebaikan.
15. Papa Penulis Suhadi, S.T., S.Si.T., M.M.T. dan Mama Hayati, semoga Allah selalu memberi kesehatan, keberkahan rezeki, melindungi beliau, memberikan pahala yang melimpah atas segala curahan kasih sayang dan didikan yang beliau berikan kepada penulis sewaktu kecil, dan menjadikan anak-anaknya cucu keturunannya penyejuk mata dan mahkota kebanggaan bagi beliau di dunia dan akherat (Aamiin Yaa Rabbal Alaamiin).
16. Bapak dari suami penulis Eman Sulaeman atas segala doa tulus yang tak pernah putus. Semoga Allah SWT selalu memberi beliau kesehatan, keberkahan rezeki, perlindungan, pahala yang melimpah atas segala curahan kasih sayang dan didikan yang beliau berikan kepada suami penulis sewaktu kecil.
17. Ibu dari suami penulis Suhartati atas segala doa, kasih sayang, dukungan, dan semangat yang diberikan, sampai Allah mengistirahatkan beliau dari kesempitan dan kesusahan duniawi. Semoga Allah menerangi kubur beliau, memuliakannya, menempatkannya di surga yang tertinggi dan menjadikan anaknya dan cucu keturunannya sumber kebahagiaan di alam kuburnya dan kegembiraan di negeri akherat.
18. Keluarga besar penulis, kakak penulis yang penulis hormati Sri Hikmawati, S.T., suami beliau Husin Soleh, beserta keluarga, adik penulis yang penulis sayangi Hendra Himawan Putra, S.Kom, istri beliau Laily Qodriany, A.Md., beserta keluarga, dsn adik penulis yang penulis banggakan Bintang Hadi Putra dan Cahaya Surya Hadi Putra atas segala doa, perhatian, pertolongan, dan kasih sayang yang diberikan kepada penulis. Semoga Allah menambah eratnya dan rukunnya tali silaturahmi sampai ke anak cucu, serta keberkahan, rahmat serta ampunan untuk mereka dunia dan akherat,

19. Keluarga besar penulis di Bandung, Bekasi, Kab. Bandung Barat, dan Tasikmalaya. Kakak penulis yang penulis hormati Drs. Asep Rohman, A.P., M.M.Pd, istri beliau Sri Indriyani, S.Pd. beserta keluarga; kakak penulis yang penulis hormati Ir. Nandang Surachman, istri beliau Hera, beserta keluarga; kakak penulis yang penulis hormati Iis Siti Napisah, suami beliau Moh. Ilyas, beserta keluarga; kakak penulis yang penulis hormati Soleh Ma'mun S.T., istri beliau Wina Afriani, A.Md., beserta keluarga; adik penulis yang penulis sayangi Ade, istri beliau, beserta keluarga; adik penulis yang penulis sayangi Sri Lestari, suami beliau Jaja Darja, beserta keluarga atas segala doa restu, dukungan, semangat, motivasi dan kasih sayang yang diberikan kepada penulis.
20. dan untuk keluarga kecilku, Suami penulis yang Penulis cintai Apip Pudir, ST., MT. atas segala cinta dan pengorbanan selama ini. Semoga Allah membalas beliau dan orang tua yang melahirkan beliau dengan rahmat dan ampunan. Dan terimakasih juga untuk anak-anakku tersayang Hamzah Alfatih, Fatimah Kanzia, dan Bilal Alfarizi. Segala Puji bagi Allah yang menciptakan mereka untuk mengajari penulis menjadi orang tua yang baik, semoga Allah menjadikan mereka penyejuk mata bagi orang tua dan buah tutur yang baik di kehidupan dunia dan mahkota kebanggaan di negeri akhirat.

Akhir kata, semoga dengan selesainya Disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan bermanfaat sebagai upaya untuk meminimalisir kelongsoran yang dapat menyebabkan korban jiwa dan harta bagi masyarakat Indonesia pada khususnya dan umat manusia pada umumnya.

Subhanakallahuumma rabbana wabihamdika, astaghfiruka wa atuubu ilaika. Wasshollatu wassalam ala nabiyyina muhammadin wa ala alihi wa ashhabihijmain. Walhamdulillahilahi rabbil alamin.

Surabaya, 30 April 2020

Dewi Amalia

**PENGEMBANGAN PROGRAM BANTU ANALISA
STABILITAS LERENG BERDASARKAN
“*THE CONCEPT OF CRACKED SOIL*”**

Nama Mahasiswa : Dewi Amalia
NRP : 3114301009
Promotor : Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D
Co-Promotor : Prof. Ir. Noor Endah Mochtar, M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan bagian dari upaya riset untuk mengembangkan dan menetapkan konsep tanah retak (*the concept of cracked soil*) yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Dalam penelitian ini, *the concept of cracked soil* dikaji dalam lingkup mengenai stabilitas lereng setelah keretakan terjadi di dalam tanah dan ketika lereng tergujur hujan. Dalam hal kekuatan geser tanah, telah ditetapkan pada penelitian sebelumnya bahwa kondisi *drained* selalu terjadi pada keretakan yang mengalami geser, sehingga kekuatan geser tanah sepanjang retakan tampak berperilaku seperti kondisi pasir (*behaving like sands*). Retakan timbul secara random pada lereng dan meyebar secara bertahap disebabkan alasan yang belum dipahami sepenuhnya.

Semua program bantu yang tersedia untuk menghitung stabilitas lereng belum mencakup adanya retakan di dalam lereng sehingga lereng dianggap satu kesatuan yang utuh tanpa retakan. Asumsi ini telah menyebabkan kesalahan signifikan dalam banyak perhitungan stabilitas lereng. Banyak lereng yang telah diperbaiki mengalami longsor kembali setelah hujan lebat, dan kegagalan lereng menunjukkan kekuatan geser yang lebih kecil daripada yang telah diperkirakan sebelumnya. Lereng yang telah jelas stabil selama bertahun-tahun, tiba-tiba gagal saat kondisi hujan lebat. Untuk itu, perlu dikembangkan program bantu yang dapat digunakan untuk mendapatkan kondisi stabilitas lereng yang sesungguhnya di lapangan sehingga tidak akan lagi terulang tebing tanah yang sudah diperkuat mengalami kelongsoran pada saat hujan sangat lebat terjadi.

Pengembangan program bantu ini diselesaikan melalui tiga tahapan, yaitu tahap persiapan, tahap pemodelan, dan tahap terakhir yang meliputi validasi terhadap program yang telah ada, simulasi, serta analisis model. Teknologi gambar digital diterapkan melalui program bantu yang didasarkan pada antarmuka pengguna grafis (GUI) yang ada di dalam MATLAB dan memanfaatkan opsi format warna RGB (Merah, Hijau, Biru). Dengan teknik ini, retakan tanah yang telah didapat dari data geolistrik dapat diambil secara otomatis sehingga dapat digunakan sebagai input untuk program analisis stabilitas lereng guna menentukan nilai faktor keamanan lereng. Teknik pemrosesan gambar dalam penelitian ini didasarkan pada penggunaan persamaan garis lurus untuk mendeteksi geometri lereng, stratigrafi tanah, dan posisi retakan pada lereng berdasarkan data geolistrik.

Penelitian ini menghasilkan pemodelan numerik untuk stabilitas lereng, yang berbentuk program bantu bernama NSSAP 1.0 (New Slope Stability Analysis Program Versi 1.0). Program bantu yang dikembangkan ini sudah dicoba untuk menganalisis ulang stabilitas lereng yang sebelumnya dianalisa sebagai lereng yang aman ($SF > 1.0$) Namun, setelah dianalisis dengan NSSAP 1.0 dengan menggunakan konsep tanah retak (*cracked soil concept*), hasilnya menunjukkan bahwa lereng tersebut ternyata dalam kondisi yang tidak stabil; hasil ini sesuai dengan kondisi lapangan dimana tebing longsor setelah hujan lebat. Jadi, hujan deras hingga sangat deras dan pola retak adalah faktor penentu stabilitas lereng. Apabila program bantu NSSAP 1.0 yang mengadopsi konsep tanah retak ini digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng maka fenomena kontradiksi antara analisis geoteknis dan kondisi lapangan tidak akan terjadi. Dalam program NSSAP 1.0 ini, teknik pemrosesan gambar dari data geolistrik untuk mendeteksi geometri lereng, stratigrafi tanah, dan posisi retakan pada lereng, memberikan nilai yang akurat yaitu mencapai 5,78 cm / piksel.

Kata kunci : Kekuatan geser "*drained*", New Slope Stability Analysis Program (NSSAP), pengolahan citra digital, *the concept of cracked soil*, pengaruh hujan terhadap stabilitas lereng

**THE DEVELOPMENT OF SLOPE STABILITY
ANALYSIS PROGRAM BASED ON
"THE CONCEPT OF CRACKED SOIL"**

Student Name : Dewi Amalia
NRP : 3114301009
Promoter : Prof. Ir. Indrasurya B. Mochtar, M.Sc., Ph.D
Co-Promoter : Prof. Ir. Noor Endah Mochtar, M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

This study is part of research attempts to develop and establish the concept of cracked soil that had been conducted by other previous researchers. In this study, the concept of cracked soil is explored in area concerning the stability of earth slope after cracks occur in the soil and when the slope is subjected to rainfall. In term of the soil shear strength, it has been established by previous studies that the drained condition always prevails in any crack that is subjected to shear, so that the soil shear strength along the shearing crack seems to behave like those of sands. Cracks seems to appear on any slope randomly and gradually propagating, for some reasons that have not been understood entirely.

All existing programs available to calculate slope stability have not taken the existence of cracks and influence of rain into consideration, so that slope is considered as single unit of soil without cracks. This assumption had led to significant error in many calculations of slope stabilities. Many repaired slopes had slid again after heavy rain, and the failed slopes showed apparent shear strengths much lower than those initially assumed. Slopes that had been obviously stable for many years, suddenly failed under heavy rain condition. For this reason, it is necessary to develop a program which can be used to obtain the actual slope stability in the field so that landslide in reinforced slopes will not happen again when heavy rains occur.

The development of this program was completed in three stages, namely: preparation, modeling, and the final stage which includes validation of existing

program, simulations, and model analysis. This digital image technology (image processing) is applied through program based on graphical user interfaces (GUI) in MATLAB and utilizes the RGB (Red, Green, Blue) color format option. With this technique, soil cracks that have been obtained from the geoelectric data can be retrieved automatically so that it can be used as input for the slope stability analysis program to determine the safety factor of the slope. Image processing technique in this research is based on the use of linear equation to detect slope geometry, soil stratigraphy, and crack positions on slopes based on geoelectric data.

This research produced numerical modeling for slope stability in the form of a program named NSSAP 1.0 (New Slope Stability Analysis Program 1.0). This program has been tested to re-analyze the stability of certain slopes that had been analyzed previously as stable slopes ($SF > 1.0$) using existing program. However, after being analyzed with NSSAP 1.0 by using cracked soil concept, the results show that the slopes are not in stable condition ($SF < 1$); which matches the field condition where the landslide did occur after subjected to heavy rains. It is also found that heavy to very heavy rains and crack patterns are the determining factors for slope stability. If the NSSAP 1.0 that adopts the concept of cracked soil is used to analyze slope stability, the contradiction between geotechnical analysis and field conditions will no longer occur. In this NSSAP 1.0 program, the image processing technique that are based on geoelectric data to detect slope geometry, soil stratigraphy, and crack positions on slopes, has provided rather highly accurate value of 5.78 cm/pixel.

Key Word : Drained shear strength, new slope stability analysis program, image processing, the concept of cracked soil, effect of rain on slope.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	15
1.3 Tujuan Penelitian.....	16
1.4 Batasan Penelitian.....	16
1.5 Manfaat Penelitian.....	17
1.6 Keaslian Penelitian (State of The Art).....	17
BAB 2, TINJAUAN PUSTAKA	21
2.1 Analisa Stabilitas Lereng.....	21
2.1.1 Limit equilibrium method (LEM)	21
2.1.2 Finite element method (FEM).....	28
2.2 Perbandingan antara Analisa Stabilitas Lereng Metode LEM dan FEM ...	30
2.3 Pengujian Laboratorium untuk Mencari Parameter Geser Tanah Retak	31
2.4 Cara Mendapatkan Bidang Retak pada Lereng	35
2.5 Kerangka Kerja Konseptual.....	39
BAB 3. METODE PENELITIAN	41
3.1 Rancangan Penelitian	41
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian	46
3.3 Perumusan Detail Model	46
3.4 Ikhtisar Program Simulasi	48
3.5 Jadwal penelitian	49
BAB 4. PROGRAM BARU SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM (NSSAP 1.0).....	51
4.1 Dasar Penyusunan Program.....	51

4.2	Penggunaan Program Simulasi Analisa Stabilitas Lereng.....	51
4.2.1	Cara pengoperasian NSSAP 1.0 dengan metode input data manual	53
4.2.2	Cara pengoperasian NSSAP 1.0 dengan metode input data mengguna-kan teknologi citra digital	61
4.3	Sistem Kerja Program NSSAP 1.0.....	66
4.3.1	Penentuan angka keamanan (<i>safety factor</i>)	66
4.3.2	Sistem kerja pengolahan citra digital pada program NSSAP 1.0..	71
4.3.3	Penentuan geometri lereng	74
4.3.4	Penentuan statigrafi tanah.....	80
4.3.5	Penentuan posisi <i>cracks</i>	81
4.3.6	Penerapan konsep baru <i>cracked soil</i>	87
BAB5. HASIL PENELITIAN		91
5.1	Validasi NSSAP 1.0 (New Slope Stability Analysis Programe) dengan Input Data Mannual	91
5.1.1	Gambaran umum lokasi studi untuk validasi	91
5.1.2	Hasil analisis stabilitas lereng kondisi inisial menggunakan XSTABL.....	94
5.2	Pengaruh Perubahan Parameter Geser Tanah Dari Lereng yang Seluruhnya Mengalami Keretakan dan Terkena Hujan Lebat Terhadap Stabilitas Lereng	95
5.3	Pengaruh Posisi Retakan Lereng Ketika Terkena Hujan Lebat Terhadap Stabilitas Lereng	99
5.4	Pengaruh Intensitas Hujan Terhadap Stabilitas Lereng yang Mengalami Retak	102
5.5	Contoh Penanganan Kelongsoran pada Kasus Pembangunan Gedung Serbaguna di Area Lokasi Politeknik Negeri Balikpapan	107
BAB 6. ESIMPULAN DAN SARAN.....		111
6.1	Kesimpulan	111
6.2	Saran.....	112
DAFTAR PUSTAKA.....		113
BIOGRAFI PENULIS		119

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Kelongsoran tebing yang tanahnya tidak mengalami kondisi saturated sebelumnya.....	6
Gambar 1.2	Kelongsoran hanya terjadi di tempat tertentu di perbukitan sepanjang trase jalan raya atau jalan kereta api.....	7
Gambar 1.3.	(a) dan (b) Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan kecil (gerimis) (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016)	9
Gambar 1.4.	(a) dan (b) Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan lebat (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).....	10
Gambar 1.5.	Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan sangat lebat, retakan searah dengan kemiringan lereng (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).....	10
Gambar 1.6.	Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan sangat lebat, retakan berbeda arah dengan kemiringan lereng (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).....	11
Gambar 1.7	Peta jalan penelitian <i>the concept of cracked soil</i>	19
Gambar 2.1.	Asumsi bidang kelongsoran lereng berbentuk circular	22
Gambar 2.2.	Asumsi bidang kelongsoran lereng berbentuk planar/non circular	22
Gambar 2.3.	Gaya-gaya yang bekerja pada irisan ke-n.....	22
Gambar 2.4	Pembagian massa geser potensial menjadi irisan (Sharma, S., 2008)	24
Gambar 2.5.	Gaya-gaya yang bekerja pada tiap pias (Sharma, S., 2008).....	25
Gambar 2.6.	Proses perhitungan faktor keamanan dalam FEM (Gouw dkk., 2012).....	30
Gambar 2.7.	Skema lengkap alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamissufardal, dkk, 2018).....	32
Gambar 2.8.	Foto lengkap alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamissufardal, dkk, 2018).....	33
Gambar 2.9.	Foto kotak geser (shear box) pada alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamissufardal, dkk, 2018).....	33

Gambar 2.10. Foto tabung tekanan air pada alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamisufardal, dkk, 2018).....	33
Gambar 2.11. Besarnya nilai sudut geser dalam tanah kondisi drain pada kondisi cracked soil (%) untuk contoh tanah lempung dan lanau (Mochtar dan Hutagamisufardal, 2016)	34
Gambar 2.12. Alat Geolistrik DUK-2A dan DZ-6A (Alexsander, S., dkk., 2018)	37
Gambar 2.13. Hasil resistivitas dan induced polarization di daerah longsoran Lokasi Bandara Sanggu	38
Gambar 2.14. Hubungan antar variabel dalam penelitian (conseptual frame work)	40
Gambar 3.1. Bagan Alir Penelitian	43
Gambar 3.2. Titik uji dan daerah atau bidang longsor lereng.....	47
Gambar 4.1. Tampilan Interface NSSAP 1.0.....	52
Gambar 4.2. Tampilan Awal NSSAP 1.0	54
Gambar 4.3. Visualisasi posisi Initation dan Termination NSSAP 1.0	55
Gambar 4.4. Tampilan Analisis Kelongsoran Lereng NSSAP 1.0.....	57
Gambar 4.5. Tampilan Hasil Analisis Kelongsoran Lereng NSSAP 1.0	58
Gambar 4.6. Tampilan Hasil Analisis Kelongsoran Lereng NSSAP 1.0 pada Tabel RESULT	59
Gambar 4.7. Visualisasi Hasil Analisis Kelongsoran Lereng NSSAP 1.0 pada Tombol “WORST”	60
Gambar 4.8. Visualisasi Hasil Analisis Kelongsoran Lereng NSSAP 1.0 pada Tombol “WORST”	60
Gambar 4.9. Tampilan <i>Image processing</i> setelah Import gambar	62
Gambar 4.10. Tampilan <i>Image processing</i> Setelah <i>Image process</i>	63
Gambar 4.11. Tampilan Import gambar dari <i>image processing</i> ke simulasi analisis utama.....	63
Gambar 4.12. Tampilan Hasil <i>Image processing</i> untuk deteksi lapisan tanah atau air	64
Gambar 4.13. Fasilitas Tambahan NSSAP 1.0.....	65

Gambar 4.14. Tampilan Hasil <i>Image processing</i> untuk crack	65
Gambar 4.15. Fasilitas Tambahan NSSAP 1.0	66
Gambar 4.16. Diagram Alir Analisis Stabilitas Lereng menggunakan NSSAP 1.0	67
Gambar 4.17. Contoh data geometri lereng	68
Gambar 4.18. Beberapa data inialisasi sebelum melakukan perhitungan SF	68
Gambar 4.19. Gambar pemodelan lereng dalam menentukan titik pusat bidang longsor ($x_{c.o}$, $y_{c.o}$) dan jari-jari bidang longsor (R)	70
Gambar 4.20. Gambar pemodelan lereng dalam menentukan titik pusat kelongsoran ($x_{c.o}$, $y_{c.o}$).....	71
Gambar 4.21 Contoh ilustrasi sebuah gambar yang memiliki ukuran pixel 64....	72
Gambar 4.22. Hasil Survey Geolistrik 2 dimensi Tomografi Resistivity (TR) (Alexsander dkk., 2017)	74
Gambar 4.23. Hasil Survey Geolistrik 2 dimensi Induced Polarization (IP) (Alexsander dkk., 2017)	74
Gambar 4.24. Model hasil data uji geolistrik dan input data teknik pengolahan citra	75
Gambar 4.25. Diagram alir untuk memperoleh data geomteri lereng dari sebuah hasil uji geolistrik	76
Gambar 4.26. Perbandingan gambar RGB dan GREY	77
Gambar 4.27. Perbandingan gambar grey dan binary	77
Gambar 4.28. Plotting kurva dari persamaan ($X_{\text{terpilih baru}}$, $Y_{\text{terpilih baru}}$)	79
Gambar 4.29. Model data yang diperlukan untuk pemodelan lapisan tanah pada lereng berdasarkan hasil data TR	80
Gambar 4.30. Hasil penentuan statigrafi tanah	81
Gambar 4.31. Proses intersection pada area yang berwarna biru pada (TR) dan (IP).....	82
Gambar 4.32. Diagram alir deteksi cracks data (TR) dan (IP) dari hasil uji geolistrik.....	83
Gambar 4.33. Hasil data gambar setelah melewati seleksi warna intensitas biru	84
Gambar 4.34 Hasil akhir data gambar deteksi warna biru	84

Gambar 4.35. Hasil data gambar setelah melewati seleksi warna kemerahan	85
Gambar 4.36. Hasil akhir data gambar deteksi warna merah	85
Gambar 4.37. Gambar area cracks yang terdeteksi	86
Gambar 4.38. Visualisasi proses intersection dan hasil dari area cracks yang terdeteksi	86
Gambar 4.39. Hasil luaran program dengan data lapangan	87
Gambar 4.40. Pemodelan lereng yang mengalami retak (berdasarkan hasil geolistrik) dan sebagian retakan terinfiltrasi air hujan	88
Gambar 4.41. Pemodelan lereng yang mengalami retak (berdasarkan hasil geolistrik) dan semua retakan terinfiltrasi air hujan	88
Gambar 4.42. Pemodelan lereng yang mengalami retak dan sebagian retakan terinfiltrasi air hujan	89
Gambar 4.43. Pemodelan lereng yang mengalami retak dan seluruh retakan terinfiltrasi air hujan	89
Gambar 5.1. Peta lokasi studi (Land, et. al, 1986)	92
Gambar 5.2. Retak pada bangunan disebabkan oleh adanya pergerakan tanah yang terjadi pada pasangan batu kali penutup pagar Politeknik Negeri Balikpapan	92
Gambar 5.3. Kerusakan bangunan disekitar akibat terjadinya pergerakan tanah dan kelongsoran	93
Gambar 5.4. Lokasi pembangunan di mana tanah dasarnya telah dilakukan pengupasan	93
Gambar 5.5. Hasil analisa stabilitas lereng menggunakan data tanah inisial	94
Gambar 5.6. Contoh tampilan hasil running NSSAP 1.0 untuk B00RX	94
Gambar 5.7 Hasil analisis stabilitas tanah yang mengalami retak dengan $\phi_c = 15^\circ$	96
Gambar 5.8. Hasil analisis stabilitas tanah yang mengalami retak dengan $\phi_c = 20^\circ$	96
Gambar 5.9. Hasil analisis stabilitas tanah yang mengalami retak dengan $\phi_c = 25^\circ$	97

Gambar 5.10. Arah retakan yang tidak mempengaruhi stabilitas lereng (a) tegak lurus terhadap arah kegagalan lereng (b) Paralel dengan kemiringan bidang penampang melintang.....	97
Gambar 5.11. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan model kedalaman crack $r = 2$ m.....	100
Gambar 5.12. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan model kedalaman crack $r = 3$ m.....	100
Gambar 5.13. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan model kedalaman crack $r = 4$ m.....	101
Gambar 5.14. Hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi hujan dengan intensitas ringan/kondisi tidak hujan	103
Gambar 5.15 Hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi hujan dengan intensitas sedang.....	104
Gambar 5.16. Hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi hujan dengan intensitas lebat	104
Gambar 5.17. Solusi alternatif untuk menjaga stabilitas lereng menggunakan subdrain yang terdiri dari bronjong yang diisi dengan kerikil dan jalan berbatu dan dibungkus dengan geotekstil non-woven. Sub-saluran air dipasang di sepanjang bagian bawah tanah pengisi yang diperkuat. Tanah pengisi awalnya merupakan lereng yang tidak stabil yang sering tergelincir saat hujan lebat.....	109
Gambar 5.18. Ilustrasi pemasangan perkuatan tiang pancang pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan (Amalia dkk., 2018)	110
Gambar 5.19. Ilustrasi pemasangan subdrain pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan	110
Gambar 5.20. Ilustrasi pemasangan subdrain tampak atas pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan.....	110

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Kelemahan Program yang Telah Ada dan Keunggulan Program yang Akan Dikembangkan.....	15
Tabel 1.2. Keunggulan Program NSSAP 1.0 Dibandingkan dengan Program Analisis Stabilitas Lereng Lainnya	20
Tabel 2.1. Perbedaan Berdasarkan Penggunaan Rumusan Statik	23
Tabel 2.2. Perbedaan Karakteristik dan Hubungan Antar Tegangan di Masing-Masing Pias Bidang Longsor	23
Tabel 2.3. Hasil Perbandingan Angka Keamanan dalam Kondisi Unsaturated dan Saturated (Rabie, 2014).....	31
Tabel 2.4. Hasil Perbandingan Angka Keamanan pada Beberapa Lokasi (Gouwdkk., 2012).....	31
Tabel 3.1. Jadwal Rencana Penelitian	50
Tabel 4.1. Data-data yang Diperlukan dalam NSSAP 1.0	67
Tabel 5.1. Soil Properties Kondisi Asli.....	93
Tabel 5.2. Hasil Validasi Program	95
Tabel 5.3. Pengaruh Variasi Parameter Geser Tanah terhadap Stabilitas Lereng Selama Hujan Deras	98
Tabel 5.4. Pengaruh Posisi Retakan terhadap Stabilitas Lereng, dengan $\phi_c = 20^\circ$	102
Tabel 5.5. Pengaruh Intensitas Curah Hujan terhadap Stabilitas Lereng dengan Tanah yang Retak ($c_c = 0 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi_c = 20^\circ$).....	106

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1.

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lereng merupakan kondisi tanah yang tidak datar, miring, atau terdapat beda elevasi. Kondisi tanah seperti itu dapat menyebabkan gerakan tanah ke arah bawah. Jika gaya pendorong ke arah bawah melebihi gaya geser perlawanan tanah, atau bila momen penyebab Bergeraknya masa tanah melebihi momen penahan gerakan tersebut, maka akan terjadi kelongsoran. Analisa kelongsoran pada permukaan tanah ini disebut sebagai analisa stabilitas lereng.

Selama ini perhitungan stabilitas lereng (*slope stability*) dilakukan berdasarkan persamaan keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method/LEM*), dengan asumsi bidang keruntuhan berbentuk lingkaran (*circle*) dan juga yang paling sederhana dalam bentuk trapesium dan segitiga. Persamaan keseimbangan batas yang paling sering digunakan untuk mendapatkan Angka Keamanan (*Safety Factor*) adalah berdasarkan prinsip irisan Bishop (1955) dan Fellenius (1936).

Prinsip utama analisa keseimbangan batas yang selama ini digunakan adalah mengasumsikan bidang longsor mengalami gaya kinematik. Perhitungan dilakukan dengan mengasumsikan tegangan geser menggunakan prinsip statik. Tegangan geser yang menahan dan tegangan geser yang terjadi (sekaligus bersifat sebagai pendorong) dalam suatu lereng digunakan dalam menentukan besarnya *safety factor* (SF). Proses untuk memperoleh nilai SF yang sering digunakan adalah dengan menggunakan proses iterasi pada masing-masing bidang longsor yang dibagi menjadi pias-pias irisan. Beberapa anggapan yang dibuat untuk mendapatkan SF adalah bidang kelongsoran dianggap 2 dimensi, massa tanah yang longsor dianggap sebagai benda massif (utuh, tidak retak), kuat geser tanah dianggap isotropis, dan SF didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan,

$$SF = \tau_r / \tau_d \tag{1.1}$$

dimana τ_r adalah tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah yang lebih dikenal dengan nama kuat geser tanah (*shear strength*), τ_d adalah tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang dapat menyebabkan longsor, dan SF adalah faktor keamanan.

Menurut Teori Coulomb, tahanan geser maksimum (τ_r) di sepanjang bidang longsor adalah

$$\tau_r = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi \quad (1.2)$$

dengan c = kohesi, σ_n = tegangan normal yang bekerja tegak lurus terhadap bidang geser, ϕ = sudut geser dalam tanah. Nilai-nilai c dan ϕ adalah parameter kuat geser tanah di sepanjang bidang longsor. Dengan cara yang sama, dapat dituliskan persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) akibat beban tanah dan beban-beban lain pada bidang longsohnya :

$$\tau_d = F/A_d \quad (1.3)$$

dengan F = gaya yang bekerja, A_d = luasan bidang geser.

Selain cara di atas, Angka Keamanan lereng terhadap keruntuhan juga dapat dihitung berdasarkan Cara Elemen Hingga, misalnya seperti metode Plaxis (Plaxis, 2016), *Shear Strength Reduction Finite Element Method* (SSRFEM) (Chen dkk., 2014). Metode Probabilistik (*Probabilistic Method*) juga sering digunakan untuk perhitungan keamanan lereng (Sweeting dan Finn, 1992; Hamedifar dkk., 2014; Kang dkk., 2015; Reale dkk., 2015; dan Li dkk., 2015). Cara memprediksi kelongsoran yang lain juga dilakukan yaitu menggunakan Fuzzy Logic System (Mohamed dkk., 2012), Swarm-Optimized Fuzzy Instance-based Learning (SOFIL) (Cheng dan Hoang, 2015), Genetic Algorithm (Sengupta dan Upadhyay, 2009), dan Imperialistic Competitive Algorithm (ICA) (Kashani dkk., 2016).

Metode-metode penyelesaian di atas, baik yang menggunakan prinsip dasar kesetimbangan batas maupun elemen hingga telah banyak diaplikasikan untuk mendesain stabilitas lereng di lapangan. Hanya saja tidak semua desain stabilitas lereng menggunakan metode tersebut aman karena banyak ditemui kegagalan di lapangan, meskipun telah didesain dengan SF= 3.5. Beberapa contoh kegagalan lereng yang terjadi di lapangan adalah kelongsoran timbunan pada

pembangunan gedung Squas Balikpapan tahun 2009; kelongsoran talud pada pembangunan gedung Walikota Bongan tahun 2010; kelongsoran timbunan jalan pada Pembangunan jalan di Tanjung Redeb, Berau tahun 2011 dan 2012; kelongsoran talud pada pembangunan RSUD Balikpapan tahun 2013; kelongsoran timbunan jalan tol Porong-Gempol tahun 2014; kelongsoran talud pada pembangunan Reskrimsus Balikpapan tahun 2015; dan kelongsoran timbunan pada pembangunan jalan tol Surabaya-Mojokerto tahun 2016. Tiga fakta lapangan yang terlihat pada kejadian kegagalan stabilitas talud/timbunan di lapangan adalah : a) perhitungan analisa stabilitas timbunan telah dilakukan dengan metode yang telah berkembang selama ini; b) pemodelan stabilitas diambil dalam kondisi terkritis (tanah dalam kondisi jenuh); dan c) kejadian kelongsoran tersebut terjadi setelah hujan yang cukup lebat.

Penelitian lapangan dan laboratorium telah dilakukan untuk mempelajari respon deformasi dan kegagalan lereng dalam kondisi hujan. Dua penelitian (Lim dkk., 1996 dan Trandafir dkk., 2008) menemukan bahwa infiltrasi hujan menyebabkan reduksi *suction* dan gaya geser tanah, dan inilah yang menyebabkan lereng longsor. Hanya saja, asumsi bahwa reduksi dari *suction* di dalam tanah dapat menyebabkan kelongsoran juga dianggap kurang memuaskan. Hampir semua metode stabilitas tanah konvensional yang berlaku diasumsikan tanah-tanahnya dalam kondisi jenuh air (*saturated soils*), tanpa memperhitungkan *suction* di dalam tanah. Permasalahan yang belum dapat dijawab selama ini adalah mengapa tebing-tebing yang dapat dianggap stabil menurut perhitungan (walaupun sudah dengan kondisi tanahnya jenuh-air) ternyata pada kenyataannya longsor pada saat hujan lebat. Permasalahan lainnya yang belum terjawab adalah mengapa hujan lebat menjadi penyebab utama kelongsoran. Pengaruh *suction* akibat perubahan iklim hanya berpengaruh sampai dengan kedalaman tanah sekitar 1.5 s.d 2.0 meter dari permukaan tanahnya (Kassim dkk., 2012). Pada kedalaman 2.5 meter, *suction* praktis sudah tidak berubah sepanjang tahun. Kondisi ini tentunya tidak dapat menjawab kelongsoran tebing yang hampir selalu terjadi pada kedalaman > 2.5 meter dan bahkan dapat mencapai 20 – 30 meter dalamnya dari permukaan tanahnya.

Sebuah pemodelan longsor skala besar juga telah dilakukan untuk mempelajari pengaruh hujan terhadap kelongsoran. Dari hasil penelitian terlihat bahwa peningkatan ekstrim dari tekanan air pori akibat infiltrasi air hujan merupakan awal penyebab kelongsoran (Moriwaki dkk., 2004). Hanya saja dalam penelitian tersebut tidak disebutkan bahwa penelitian dilakukan pada saat hujan lebat atau tidak. Untuk mempelajari fenomena tersebut, metode elemen hingga atau metode numerik telah dikembangkan dengan menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN) dan metode fuzzy clustering (Alimohammadlou dkk., 2014). Selain itu, penelitian menggunakan simulasi numerik juga dilakukan untuk memberikan pemahaman awal mekanisme aktual ketidakstabilan lereng untuk kondisi transient yang menyebabkan kegagalan permukaan dangkal akibat infiltrasi (Kim dkk., 2012). Dari studinya, Kim menyatakan bahwa ketika hujan deras terjadi, laju infiltrasi akan lebih besar dari kapasitas infiltrasi pada suatu lereng sehingga kelongsoran akan terjadi.

Selain hujan, dugaan lainnya terkait penyebab terjadinya kegagalan lereng adalah adanya retakan-retakan pada lereng. Dugaan ini diperkuat oleh beberapa peneliti lain baru-baru ini. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kelongsoran terjadi pada saat musim hujan di lereng yang telah memiliki keretakan (Hu, 2000; Fan, P., dkk., 2005; dan Wang dkk., 2010). Kelongsoran yang terjadi di New Zealand disebabkan oleh tekanan air pori (*pore pressures*) di dalam retakan setelah hujan (Rogers dan Selby, 1980). Dapat disimpulkan bahwa retakan memiliki pengaruh yang signifikan pada stabilitas lereng.

Michalowski (2012) juga meneliti pengaruh retak terhadap stabilitas lereng menggunakan analisa batas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya pengaruh retak dan tekanan air pori pada lereng menyebabkan terjadinya kelongsoran. Amarasiri (2011) telah melakukan penelitian *Tensile Fracture* dengan model I *fracture* yang terjadi pada banyak aplikasi geoteknik, seperti stabilitas lereng. Model retak pada tanah kohesif tersebut diakui sebagai alat yang ampuh dan serbaguna yang digunakan untuk menganalisis secara numerik model I *fracture* telah menguraikan proses terjadinya dan pengembangan retak di lereng melalui sifat dasar tanah ekspansif (Shi dkk., 2104).

Zhang, dkk (2012) juga menyatakan bahwa kelongsoran terjadi disebabkan oleh hujan yang turun pada lereng yang terdapat retakan-retakan. Serangkaian tes model *centrifuge* dilakukan pada lereng dengan berbagai jenis retak dalam kondisi hujan. Hasil tes tersebut menunjukkan bahwa retak memberi dampak yang signifikan terhadap banyaknya air hujan yang masuk ke dalam lereng. Deformasi lereng yang utama disebabkan oleh kejenuhan lereng pada musim hujan akibat masuknya air melalui retakan dan luasan zona retak yang terinfiltrasi air hujan. Air hujan yang masuk pada retakan vertikal lebih signifikan menyebabkan deformasi lereng arah vertikal daripada arah horisontal.

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa hujan dan retakan tanah pada lereng dapat menyebabkan kelongsoran. Pada penelitian-penelitian tersebut retakan dianggap sebagai bidang yang lemah yang merupakan cikal bakal kelongsoran dan difungsikan sebagai jalan masuk bagi air hujan. Dengan adanya retakan pada tanah, air akan lebih mudah masuk dan membuat lereng jenuh sehingga lereng menjadi tidak stabil. Padahal, suatu tanah dapat jenuh jika air hujan dapat meresap ke seluruh tanah. Untuk lapisan tanah tertentu seperti tanah lanau-lempung yang sulit dirembesi air hujan, diperlukan waktu yang cukup lama untuk membuat seluruh lapisan tanahnya jenuh air. Jika benar demikian, maka seharusnya sebagian besar kelongsoran terjadi setelah mendekati akhir musim penghujan. Hal ini dikarenakan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk air masuk ke dalam tanah walaupun ada retakan di tanah tersebut. Belum tentu hujan lebat dengan waktu yang relatif singkat mampu membuat tanah jenuh air. Asumsi lainnya yang digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya adalah retakan-retakan pada lereng masih dianggap statis, tidak dinamis (dapat menjalar dan melebar).

Beberapa tahun terakhir ini beberapa peneliti mencoba menerapkan konsep baru *the concept of cracked soil* pada stabilitas lereng. Konsep ini memandang *crack* berbeda dengan konsep yang ada sebelumnya (*crack* tidak hanya dianggap sebagai bidang lemah) dan penelitian ini merupakan kesatuan dari pengembangan *the concept of cracked soil*. Konsep ini dipelopori oleh Mochtar (2010 dan 2011) yang menemukan banyak kelongsoran di lapangan terjadi pada saat, atau beberapa saat setelah hujan lebat terjadi. Kelongsoran ditemukan pada

tebing baik yang berupa tebing berbatu maupun tebing yang didominasi lanau-lempung yang kaku dan mengandung lapisan yang keras dimana jika dilakukan tes lapangan, conus sondir serta mata bor tdk dapat menembusnya dan jika dianalisa menggunakan metode yang ada $SF > 1$. Selain itu, banyak pula ditemukan lereng-lereng dengan kemiringan cukup landai (jika dianalisa $SF > 1$) longsor pada saat hujan lebat (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016). Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa kelongsoran lereng tidak terpengaruh dengan kejenuhan tanahnya dan muka air di dalam pori tanah. Mochtar dan Hutagamissufardal (2016) juga menemukan bahwa pada daerah yang sering mengalami kelongsoran setelah hujan lebat, ketika disurvei, tanahnya ternyata tidak jenuh air, muka air tanah (MAT) terletak cukup dalam, misalnya seperti yang terlihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Kelongsoran tebing yang tanahnya tidak mengalami kondisi saturated sebelumnya (Iswinarno, C., 2020)

Penemuan selanjutnya di lapangan adalah pada daerah perbukitan yang memanjang mengikuti suatu trase jalan raya dan jalan kereta api dimana kelongsoran umumnya hanya terjadi pada suatu lokasi tertentu saja, tidak sepanjang lereng bukit tersebut (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016). Kelongsoran hanya terjadi pada lokasi lereng tertentu secara lokal walaupun kondisi batuan dan tanah di sepanjang lereng tersebut relatif sama, lereng-lereng sepanjang trase jalan tersebut juga memiliki kemiringan yang sama, dan diguyur

oleh hujan yang intensitasnya sama lebatnya. Kelongsoran lokal yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 1.2. Dari beberapa penelitian di lapangan, hipotesa yang paling memungkinkan atas terjadinya “fenomena” di lapangan tersebut yaitu pada lapisan tanah lereng tersebut sudah terjadi retak-retak sebelumnya, dan air hujan dengan intensitas lebat yang mengisi retak-retak tersebut akan mentukan stabilitas lereng (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).



Gambar 1.2 Kelongsoran hanya terjadi di tempat tertentu di perbukitan sepanjang trase jalan raya atau jalan kereta api (Mahatma, F., 2019)

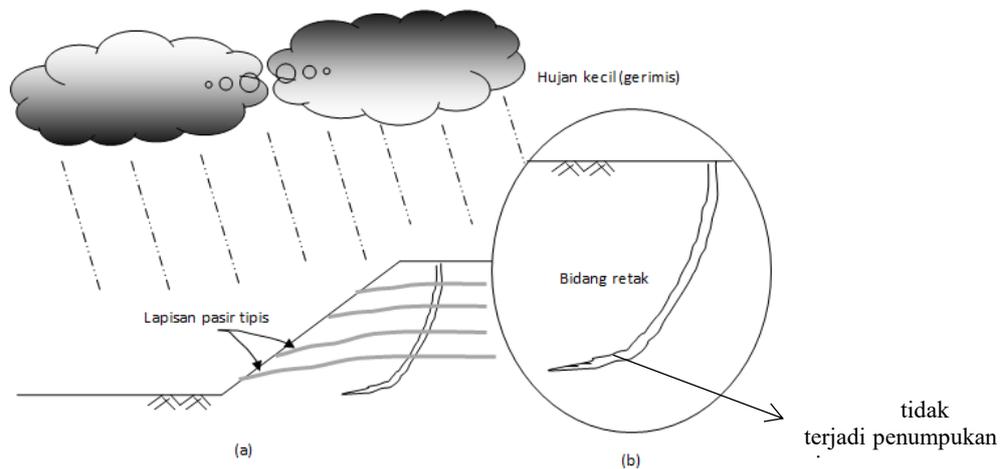
Mochtar dan Hutagamissufardal (2016) berpendapat bahwa cara analisa stabilitas lereng menggunakan metode yang telah berkembang selama ini kurang sesuai dengan kejadian di lapangan. Pemodelan dalam analisa stabilitas lereng yang ada belum memperhatikan distribusi *crack*, walaupun ada hanya berupa *crack* permukaan saja. Parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan juga berasal dari hasil uji tanah asli di laboratorium, dimana benda uji yang digunakan dalam kondisi utuh, tidak retak. Selain itu, analisa selama ini dilakukan dalam kondisi *saturated* maupun *unsaturated*. Pada kondisi tersebut, kekuatan geser tanah sangat tergantung pada tegangan air-pori (*pore-water pressure*) dan tegangan udara-pori (*pore-air pressure*) yang masing-masing terjadi pada tanah *saturated* dan *unsaturated*. Semua tegangan air tersebut umumnya terjadi pada

bidang geser pada saat tanah mengalami keruntuhan. Kekuatan-geser tanah dan tegangan air-pori serta udara-pori ini juga sangat tergantung jenis tanah aslinya (tanah granular/berbutir kasar atau tanah berbutir halus), kecepatan pergeseran (cepat ataupun lambat), dan *stress history* (kondisi perubahan tegangan pada tanah di masa lalu – *consolidated* atau *unconsolidated*) dari tanah yang mengalami keruntuhan.

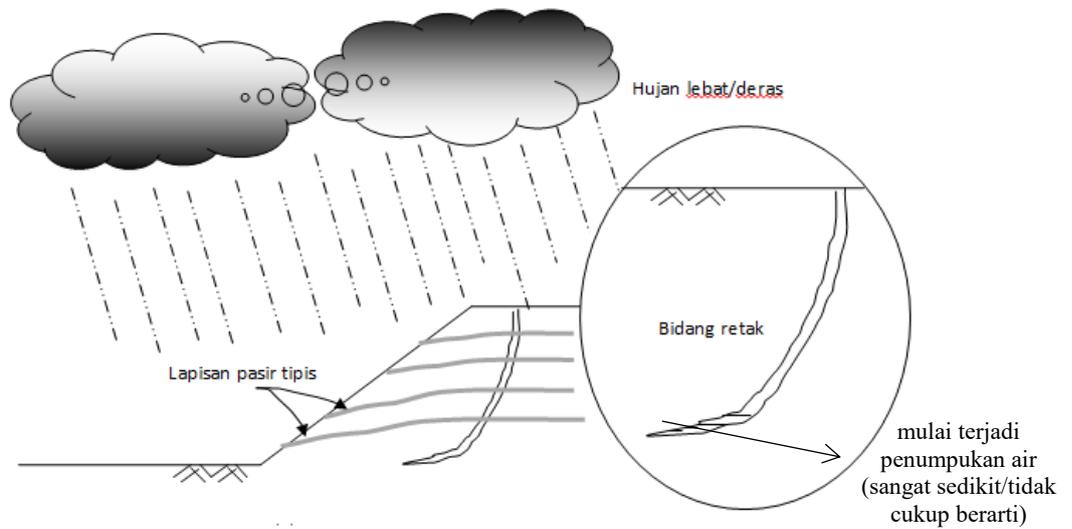
Mochtar dan Hutagamissufardal (2016) juga menemukan fenomena bahwa hampir semua peristiwa kelongsoran di lapangan terjadi hanya ketika hujan lebat atau sangat lebat. Jarang sekali dijumpai kelongsoran terjadi pada saat hujan ringan/gerimis atau pada saat musim kemarau. Kemudian, kelongsoran tebing terjadi bukan didasarkan pada lamanya musim penghujan, tetapi lebih ditentukan oleh intensitas hujan (lebat/ringan) (Kassim dkk., 2012). Jadi kelongsoran bisa terjadi pada awal, tengah, maupun pada akhir musim penghujan tergantung intensitasnya. Hal ini diperkuat dengan fakta bahwa banyak sekali lereng di lapangan yang dalam kondisi stabil selama puluhan tahun, tiba-tiba longsor pada saat kondisi hujan lebat, terutama bila hujan terjadi berhari-hari dengan intensitas yang tinggi.

Fenomena kelongsoran di lapangan dapat dijawab dengan menganggap tanah pada lereng telah mengalami keretakan-keretakan sebelumnya (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016). Keretakan ini dapat diakibatkan susut permukaan tanah, pergerakan-pergerakan massa tanah di masa lalu, dan getaran-getaran yang cukup kuat di masa lalu (misal dari gempa bumi). Bidang-bidang keretakan ini terbentuk secara random tergantung sejarah pergerakan tanahnya. Bidang keretakan ini dengan mudah dimasuki air hujan. Pada saat terjadi hujan ringan, air hujan yang merembes masuk ke dalam retakan dengan mudah mengalir ke luar ke tempat lain atau merembes ke luar dari tebing secara aman (Gambar 1.3). Untuk kondisi ini, pada bidang retakan tidak terjadi penumpukan air dan peningkatan tegangan air yang berarti. Pada saat hujan lebat (Gambar 1.4), debit air hujan yang merembes masuk ke dalam bidang retakan lebih besar dan debit air yang dapat merembes ke luar menjadi besar pula. Pada kondisi ini mulai terjadi penumpukan air pada bidang retak (belum berbahaya). Pada saat hujan sangat deras (Gambar 1.5 dan Gambar 1.6), debit air yang masuk jauh lebih besar daripada debit air

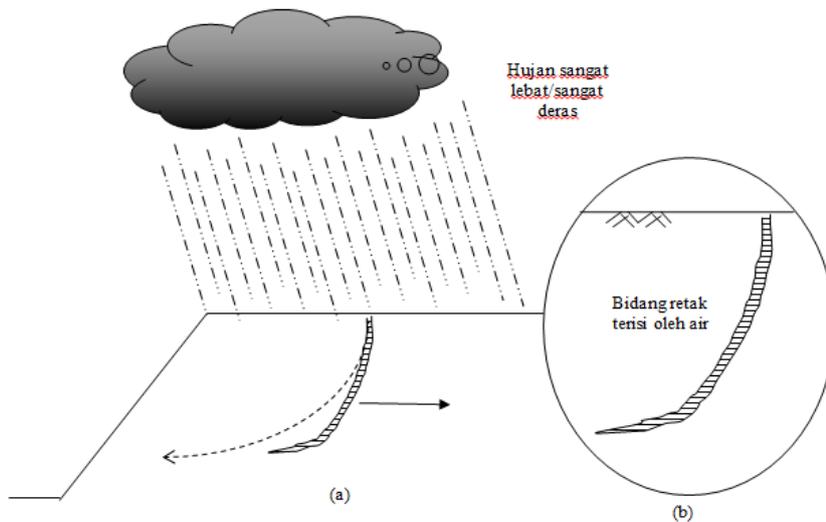
yang keluar sehingga pada bidang retakan terjadi *pore water pressure build-up* (kenaikan tegangan air di dalam rongga bidang retakan). Dorongan tekanan air yang berlebihan ditambah dengan arah bidang retakan yang searah kemiringan lereng inilah yang diperkirakan akan menyebabkan kelongsoran tebing (Gambar 1.5). Pada saat kondisi retakan berlawanan dengan arah kemiringan lereng, meskipun telah terjadi pore water pressure build-up, lereng tetap dalam kondisi aman (Gambar 1.6). Retakan-retakan ini dapat menjadi kunci jawaban mengapa lereng yang stabil (hasil analisa $SF \geq 1$), di lapangan lereng tersebut mengalami kelongsoran. Mochtar dan Hutagamissufardal (2016) mengusulkan suatu hipotesa bahwa keretakan ini bersifat dinamis. Pada saat hujan sangat lebat, air mengisi seluruh bidang retak. Akibat intensitas hujan yang tinggi, air hujan membuat bidang retak menjalar lebih dalam di lereng. Seiring dengan intensitas hujan yang tinggi dan hujan yang lama, bidang retak tersebut lambat laun menjalar lebih dalam lagi dan membentuk bidang longsor pada lereng. Jika arah bidang retak tersebut searah dengan kemiringan lereng maka akan terjadi kelongsoran di tebing. Dari hipotesa ini dapat dijawab mengapa lereng yang sudah bertahun-tahun stabil, kemudian tiba-tiba mengalami kelongsoran.



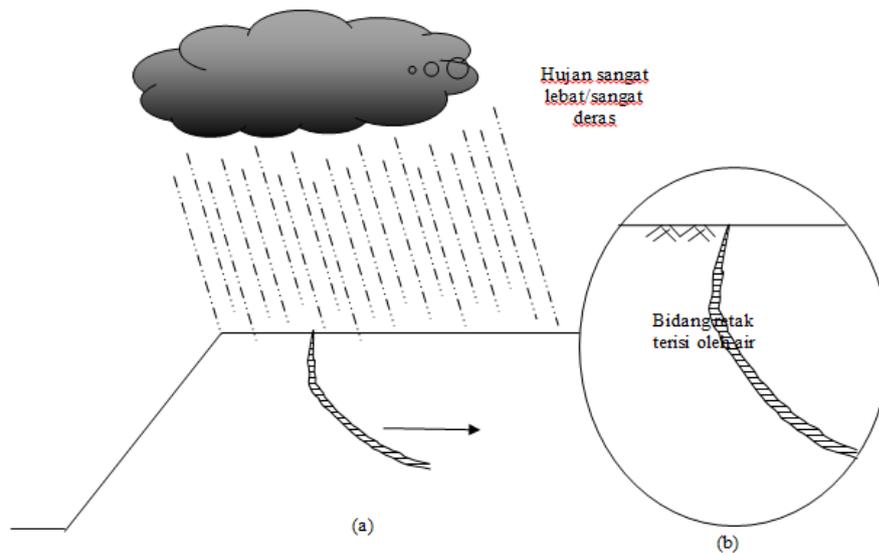
Gambar 1.3. (a) dan (b) Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan kecil (gerimis) (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016)



Gambar 1.4. (a) dan (b) Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan lebat (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016)



Gambar 1.5. Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan sangat lebat, retakan searah dengan kemiringan lereng (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016)



Gambar 1.6. Ilustrasi keretakan yang terjadi pada suatu lereng, pada saat hujan sangat lebat, retakan berbeda arah dengan kemiringan lereng (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016)

Dengan asumsi baru yang diusulkan, sebagian besar permasalahan di lapangan yang tidak sesuai dengan asumsi stabilitas lereng yang ada selama ini akan dapat terjawab. Asumsi baru Mochtar (2010 dan 2011) dan Mochtar Hutagamissufardal (2016) yang diusulkan adalah sebagai berikut:

1. Bidang keretakan akan terisi air sampai penuh hanya pada saat hujan sangat lebat, tidak memperhatikan kapan hujan sangat lebat itu terjadi selama periode musim hujan. Tanpa hujan sangat lebat, keberadaan air pada bidang keretakan tidak akan terlalu membahayakan stabilitas lereng, karena tidak terjadi *pore-water pressure build up* di dalam bidang keruntuhan.
2. Tebing yang sudah bertahun-tahun stabil tiba-tiba longsor akibat bidang keretakan di dalam tebing sudah menjalar sedemikian rupa sampai pada kondisi yang membahayakan kestabilan tebing saat hujan lebat.
3. Rembesan air yang mengendapkan lapisan pasir di dalam bidang keretakan menjadikan tebing bersifat seolah-olah terbentuk dari tanah pasir. Hal ini kemungkinan besar yang menyebabkan mengapa pada tebing yang landai masih terjadi kelongsoran bilamana terjadi rembesan air hujan (hujan lebat).

Kondisi ini menyerupai kondisi tanah granular yang relatif sangat rentan pada saat jenuh air.

4. Retakan-retakan di dalam tanah dengan lebar retak cukup besar (beberapa millimeter s/d sentimeter) menyebabkan sifat tahanan geser tanah pada bidang retak selalu dalam kondisi “*drained*” sehingga sifat keruntuhan akan serupa dengan pola keruntuhan “*drained*”, yaitu $c = 0$ dan $\phi \neq 0$ atau serupa dengan pola keruntuhan pada tanah pasir/berbutir kasar. Hal ini juga yang dapat menyebabkan tanah yang retak tersebut “*behaving like sand*” (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).
5. Curah hujan dan struktur lapisan tanah yang sama belum tentu membuat suatu tebing yang memanjang akan longsor semuanya secara bersamaan. Stabilitas lereng tergantung pada bagaimana kondisi tingkat menjalarnya keretakan pada masing-masing bagian dari tebing tersebut. Bagian yang paling kritis, yaitu bagian di mana tingkat penjalaran keretakan di dalam tanah sudah lebih “*advanced*” dari pada yang lainnya, bagian tersebut akan longsor lebih dahulu.
6. Kondisi muka air tanah asli di dalam lereng tidak berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Penentu stabilitas lereng adalah kondisi muka air di dalam celah retakan dalam tanah yang hanya terjadi saat hujan sangat lebat. Setelah hujan berlalu, air hujan yang berada di dalam retakan-retakan ini segera surut (mengalir ke luar) dan tidak lagi membahayakan lerengnya. Tinggi muka air tanah hanya berpengaruh terhadap stabilitas lereng bila air tanah ini terhubung langsung dengan bidang keretakan yang ada.

Penelitian kedua juga telah dilakukan dan didapatkan parameter geser tanah kondisi retak Mochtar dan Hutagamissufardal (2016), Hutagamissufardal, dkk (2017 dan 2018). Penelitian ini dilakukan karena pengujian parameter kekuatan geser tanah di laboratorium saat ini masih didasarkan pada tanah yang utuh atau belum retak dan tidak ada tekanan air pori yang bekerja secara independen pada benda uji. Penelitian kedua dilakukan dengan membuat pengujian kekuatan geser tanah di laboratorium (mengambil pendekatan bidang retak yang menjalar). Pada bidang retak yang terbentuk akan diisi oleh material lain dan menerima tegangan air pori secara independen. Dari hasil penelitian diperoleh fakta bahwa kohesi tanah akan berkurang seiring dengan bertambahnya

panjang bidang retak. Hasil ini membuktikan bahwa semakin panjang bidang retak maka faktor aman lereng akan semakin kecil. Hasil lain juga menunjukkan bahwa adanya material pasir pada bidang retak akan merubah sifat tanah lempung menjadi *behaving like sand* (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016 dan Hutagamissufardal, dkk, 2017 dan 2018).

Dari hasil penelitian ke dua dengan penerapan *the concept of crack soil*, lapisan tanah dianggap telah retak sebelumnya. Konsep keretakan pada tanah dapat menyebabkan tanah berperilaku seperti pasir atau "*behaving like sand*" (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016), parameter tanah sedalam bidang retak akan berubah menjadi parameter pasir, dimana $c = 0$ dan $\phi \neq 0$. Dengan berubahnya parameter tanah pada bidang retak tersebut, sesuai dengan Teori Coulomb, maka tahanan geser maksimum (τ_r) pada Persamaan 1.1, tereduksi menjadi

$$\tau_r = \sigma_n \operatorname{tg} \phi. \quad (1.4)$$

dimana nilai ϕ diambil dari hasil uji laboratorium dari benda uji tanah yang retak.

Perbedaan pada konsep baru ini selain dari parameter tanah yang digunakan berasal dari benda uji tanah yang retak, juga dari kondisi lereng terkritis. Dimana pada konsep yang berkembang selama ini, kondisi lereng terkritis terjadi ketika lereng dalam kondisi jenuh. Pada konsep baru ini, kondisi terkritis terjadi ketika retakan terisi penuh oleh air hujan dan arah retakan serah dengan kemiringan lereng. Retakan ini berfungsi seperti bejana berhubungan, saling berhubungan dengan retakan lainnya di dalam lereng. Tinggi tekanan (*pressure head*) dari air hujan di dalam retakan yang akan menentukan stabilitas lereng. Semakin tinggi *pressure head* yang terjadi, semakin kritis stabilitas lerengnya. Begitu juga dengan kondisi keretakannya yang searah dengan kemiringan lereng, semakin lebar dan dalam retakan-retakan menjalar, semakin kritis kondisi lereng.

Untuk mengetahui kondisi terkritis di lapangan diperlukan penelitian lanjutan yaitu penelitian ke tiga. Penelitian ini dilakukan untuk membuktikan keberadaan dan pengaruh cracks di dalam lereng. Penelitian ini menggunakan 2 (dua) pendekatan, yaitu pendekatan laboratorium dan pendekatan lapangan. Hasil penelitian ke tiga menunjukkan bahwa cracks dapat terdeteksi dengan mengguna-

kan tomography resistivity, TR dan Induced Polarization, IP. Peningkatan panjang dan luas area yang mengalami cracks dapat merubah nilai IP yang terjadi didalam lereng. Hasil tomography resistivity TR akan mengalami penurunan nilai resistivitas pada daerah yang mengalami peningkatan kadar air.

Penelitian selanjutnya, penelitian ke empat, yaitu penelitian yang akan dibahas pada disertasi ini. Penelitian ini dilakukan karena sampai saat ini analisa stabilitas lereng dengan memperhatikan *the concept of crack soil* belum pernah dimodelkan. Program bantu analisa stabilitas lereng yang banyak digunakan selama ini antara lain adalah stabl, geoslope, dan plaxis. Program-program tersebut masih menggunakan asumsi lama, dimana retakan hanya berfungsi sebagai bidang lemah. Selain itu, parameter tanah yang merupakan input-an program didapat dari tanah yang utuh, tidak retak. Seperti penjelasan sebelumnya (Mochtar, 2010 dan 2011; Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016), banyak sekali lereng yang di lapangan longsor, ternyata aman jika dianalisa menggunakan program-program bantu tersebut. Mochtar (2010 dan 2011) menemukan kondisi lereng di lapangan yang bergerak (longsor) ketika hujan lebat terjadi, padahal angka keamanan stabilitas, $SF = 3.5$. Jika permasalahan ini tidak segera diselesaikan, dikhawatirkan kasus kelongsoran lereng akan terus terulang walaupun telah dilakukan *soil reinforcement*. Persamaan dan perbedaan antara program-program yang telah ada selama ini, program yang belum ada, dan program yang akan dikembangkan dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Penelitian numerik yang akan dilakukan ini merupakan penelitian lanjutan dan penunjang dari penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian ini merupakan aplikasi nyata dari dua hasil penelitian sebelumnya. Penelitian ini menggunakan metode Bishop. Keluaran yang dihasilkan dari penelitian ini berupa aplikasi perhitungan analisa stabilitas lereng yang dapat digunakan untuk mendapatkan kondisi stabilitas lereng yang sesungguhnya di lapangan. Jadi dengan cara ini, diharapkan tidak akan terulang lagi lereng yang dalam perencanaannya aman dengan SF yang cukup besar tetapi menjadi longsor pada saat terjadi hujan yang sangat lebat; atau tebing tanah yang terus menerus mengalami kelongsoran pada saat diguyur hujan sangat lebat meskipun sudah diberi perkuatan atau *slope reinforcement*.

Tabel 1.1. Kelemahan Program yang Telah Ada dan Keunggulan Program yang Akan Dikembangkan

No.	Keterangan	Program yang telah ada (Stabl, Geoslope, dan Plaxis)	Kelemahan program yang telah ada dibandingkan dengan kondisi di lapangan	Program yang akan dikembangkan
1	Asumsi kondisi lereng terkritis	lereng diasumsikan dalam kondisi jenuh (<i>saturated</i>)	Ditemukan banyak lereng longsor ketika hujan deras tetapi setelah di bor letak muka air tanah (<i>mat</i>) cukup dalam (kondisi lereng tidak jenuh) (Mochtar, 2010)	bisa memodelkan kondisi kritis dari suatu lereng yang retak akibat hujan sangat lebat (ketika retakan terisi penuh oleh air hujan (<i>pore water pressure build-up</i>) dan arah retakan serah dengan kemiringan lereng)
2	Inputan yang dimasukkan dalam program			
	Parameter tanah yang digunakan	Parameter tanah kondisi utuh (c , ϕ , dan γ)	Tanah yang mengalami retakan memiliki nilai parameter tanah yang berbeda dengan kondisi utuh (Mochtar & Hutagamissufardal, 2016)	Parameter tanah untuk tanah yang tidak retak menggunakan parameter tanah kondisi utuh (c , ϕ , dan γ), parameter tanah yang retak menggunakan parameter tanah kondisi retak (c -retak, ϕ -retak, dan γ) (Alexsander et. al., 2016)
	posisi muka air tanah (<i>mat</i>) dan muka air hujan yang masuk ke dalam tanah	<i>mat</i> digambarkan, muka air hujan tidak digambarkan (terkadang diasumsikan ketika hujan, lereng dalam kondisi jenuh/ <i>saturated</i>)	<i>mat</i> digambarkan dan digambarkan pula posisi khusus muka air hujan yang masuk ke dalam retakan	<i>mat</i> digambarkan dan digambarkan pula posisi khusus muka air hujan yang masuk ke dalam retakan
	posisi retakan	tidak selalu digambarkan dan bukan merupakan input-an penting karena retakan hanya berfungsi sebagai bagian bidang gelincir	Posisi (letak dan arah) retakan sangat menentukan stabilitas lereng (Alexander, 2017)	digambarkan dan merupakan input-an terpenting dalam menentukan stabilitas lereng

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama yang akan dibahas pada disertasi ini adalah bagaimana merancang suatu program analisa kestabilan lereng dengan memperhatikan kondisi retakan yang ada di lapangan. Rincian permasalahan tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana memodelkan stabilitas lereng setelah ada keretakan, bilamana pada keretakan itu sifat kekuatan geser tanahnya adalah *behaving like sand* dan keretakan tersebut dapat timbul di dalam tanah secara random?
- b. Bagaimana merancang program bantu stabilitas lereng dengan memperhatikan bidang retakan di lapangan?

- c. Bagaimana caranya menggunakan program bantu yang baru ini yang nantinya dapat digunakan untuk membuktikan bahwa stabilitas lereng menggunakan “*the concept of cracked soils*” ini akan sesuai dengan kondisi di lapangan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Membuat model keretakan yang terjadi di lapangan pada program stabilitas lereng dengan pendekatan bidang retak;
- b. Membuat program analisis stabilitas lereng menggunakan pendekatan bidang retak. Program ini akan meng-*cover* perubahan parameter tanah yang retak menggunakan konsep “*behaving like sand*” dan meng-*cover* sifat retak yang dinamis (dapat menjalar dan melebar) sehingga dapat memprediksi kondisi lereng terkritik (akan longsor ketika hujan sangat lebat terjadi);
- c. Membandingkan hasil analisa (SF) dengan kondisi lereng di lapangan (validasi). Validasi ini dilakukan untuk lereng yang telah mengalami kelongsoran.

1.4 Batasan Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini dibatasi pada hal hal berikut ini :

1. Program bantu analisa stabilitas lereng yang digunakan adalah Matlab menggunakan metode Bishop yang dimodifikasi;
2. Asumsi keberadaan retak sudah diketahui dari hasil studi yang dilakukan oleh Alexsander, S., dkk (2018);
3. Parameter tanah yang berupa *soil strength* untuk kondisi tanah yang retak didapatkan dari hasil studi yang dilakukan oleh Hutagamissufardal, dkk (2018) ;
4. Program bisa diaplikasikan pada tanah $c-\phi$ soil;
5. Tidak memasukkan faktor waktu (t);
6. Bidang retak merupakan inputan (letak dan arahnya);

7. Di bagian retakan, tanah dianggap sebagai tanah berbutir $c=0$ dan $\phi=\phi_{\text{retak}}$ dan jenuh air sampai dengan tinggi muka air tanah tertentu/mengikuti batas tinggi air hujan yang terinfiltrasi ke dalam retakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Hasil penelitian dapat digunakan untuk mendapatkan kondisi stabilitas lereng yang sesungguhnya di lapangan, bilamana terjadi hujan lebat nanti. Jadi dengan cara ini, tidak akan lagi terulang tebing tanah yang sudah diperkuat ternyata mengalami kelongsoran kembali pada saat terjadi hujan sangat lebat.
2. Cara/metoda ini dipakai untuk memprediksi kondisi terkritik suatu lereng di lapangan yang dapat longsor pada saat hujan sangat lebat, apabila posisi bidang longsor saat ini sudah diketahui.
3. Persamaan yang dikembangkan ini merupakan sumbangan terbaru bagi ilmu pengetahuan di dalam bidang Geoteknik mengenai cara melakukan perkiraan stabilitas tanah yang berdasarkan “*the concept of cracked soils*”

1.6 Keaslian Penelitian (State of The Art)

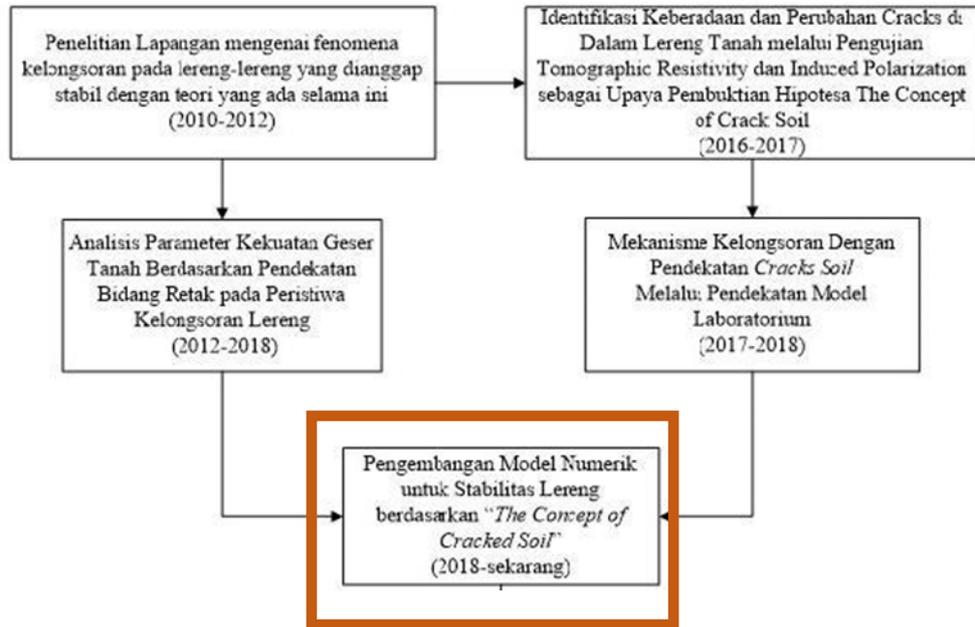
Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dari penelitian *the concept of cracked soil*. Penelitian *the concept of cracked soil* berawal dari kajian lapangan yang dilakukan oleh Muchtar (2011) dimana ditemukan banyak kelongsoran di lapangan terjadi pada saat atau beberapa saat setelah hujan lebat. Kelongsoran ditemukan pada tebing baik yang berupa tebing berbatu maupun tebing yang didominasi lanau-lempung yang kaku dan mengandung lapisan yang keras dimana jika dilakukan tes lapangan, conus sondir serta mata bor tdk dapat menembusnya dan jika dianalisis menggunakan metode yang ada, angka keamanan yang diperoleh $SF > 1$; hal ini diperkuat oleh peneliti lain (Amalia dkk., 2018).

Penelitian kedua terkait perubahan parameter tanah ketika mengalami retak. Hasil penelitian ini digunakan untuk memodelkan distribusi crack dalam analisis stabilitas lereng. Hasil penelitian (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016) mengungkapkan bahwa parameter kekuatan geser tanah retak berbeda dari tanah utuh. Parameter kekuatan geser dari tanah retak jenis lanau dan lempung di laboratorium berturut-turut adalah $c_{\text{silt}} = 0 \text{ kN/m}^2$, $\phi_{\text{silt}} = 21.62^\circ$ dan $c_{\text{clay}} = 0 \text{ kN/m}^2$, $\phi_{\text{clay}} = 17.42^\circ$ (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).

Penelitian ketiga yaitu penelitian lapangan juga telah dilakukan untuk mengetahui keberadaan cracks yang ada di dalam lereng dengan menggunakan tomografi resistivity dan induced polarization akibat adanya hujan (Alexsander, S., dkk., 2017 dan 2018). Hasil penelitian tersebut mampu membuktikan bahwa Pola sebaran cracks yang terjadi di dalam lereng menentukan bentuk bidang kelongsoran; bentuk bidang kelongsoran yang terjadi di tanah tidak hanya rotasional tetapi juga berbentuk translasi atau kombinasi keduanya. Dari penelitian ini juga diketahui bahwa hujan lebat hingga sangat lebat memicu adanya *pore water pressure built up* yang berdampak terhadap perubahan stabilitas talud yang berdampak pada kelongsoran.

Hanya saja, sampai saat ini analisis stabilitas lereng dengan memperhatikan *The concept of cracked soil* belum pernah dimodelkan. Hal ini dikarenakan asumsi analisis stabilitas lereng selama ini masih menggunakan asumsi yang lama. Perbedaan pada konsep baru ini selain dari parameter tanah yang digunakan berasal dari benda uji tanah yang retak, juga dari kondisi lereng terkritis. Dimana pada konsep yang berkembang selama ini, kondisi lereng terkritis terjadi ketika lereng dalam kondisi jenuh. Pada konsep baru ini, kondisi terkritis terjadi ketika retakan terisi penuh oleh air hujan dan arah retakan searah dengan kemiringan lereng. Tinggi tekanan (*pressure head*) dari air hujan di dalam retakan akan menentukan stabilitas lereng; semakin tinggi *pressure head* yang terjadi, semakin kritis stabilitas lerengnya. Begitu juga dengan kondisi keretakannya yang searah dengan kemiringan lereng dimana semakin lebar dan dalam retakan-retakan menjalar, semakin kritis kondisi lereng. Perkembangan

penelitian *the concept of cracked soil* dan kedudukan penelitian yang akan dibahas pada disertasi ini dapat dilihat pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7 Peta jalan penelitian *the concept of cracked soil*

Pemodelan numerik untuk stabilitas lereng berdasarkan *the concept of cracked soil* ini dirancang menggunakan bantuan program Matlab dan diberi nama Slope Stability Analysis Program (NSSAP) versi 1.0. Keunggulan dari program NSSAP 1.0 ini jika dibandingkan dengan program analisis stabilitas lereng lainnya dapat dilihat pada Tabel 1.2. Program ini dikembangkan dalam rangka menyelesaikan permasalahan kelongsoran akibat *cracks* menurut *the concept of cracked soil* yang tidak dapat diselesaikan dengan program-program yang ada selama ini. Program NSSAP ini memerlukan data *cracks* di lapangan dan parameter tanah ketika terjadi *cracks*. Data *cracks* diperoleh melalui pengujian geolistrik seperti yang dilakukan oleh Alexander, S., dkk (2018) dan parameter tanah retak diperoleh melalui uji tanah retak di laboratorium menggunakan direct shear yang dimodifikasi (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).

Tabel 1.2. Keunggulan Program NSSAP 1.0 Dibandingkan dengan Program Analisis Stabilitas Lereng Lainnya

No.	KEUNGGULAN	NSSAP 1.0	XSTABL	GEOSLOPE	PLAXIS
1.	Dapat digunakan untuk kasus lereng biasa (lereng tidak mengalami retak)	Ya	Ya	Ya	Ya
2.	Dapat digunakan untuk kasus lereng yang mengalami retak berdasarkan <i>the concept of cracked soil</i>	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
3.	Disediakan inputan otomatis/manual untuk perubahan parameter tanah akibat cracked (<i>behaving like sand</i>)	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
4.	Mampu memodelkan <i>pore water pressure build-up</i> pada tanah yang mengalami crack	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
5.	Mampu membaca data hasil pengujian geolistrik (mentransfer geometri maupun posisi cracks di lapangan menggunakan teknologi <i>image processing</i>)	Ya	Tidak	Tidak	Tidak

BAB 2.

TINJAUAN PUSTAKA

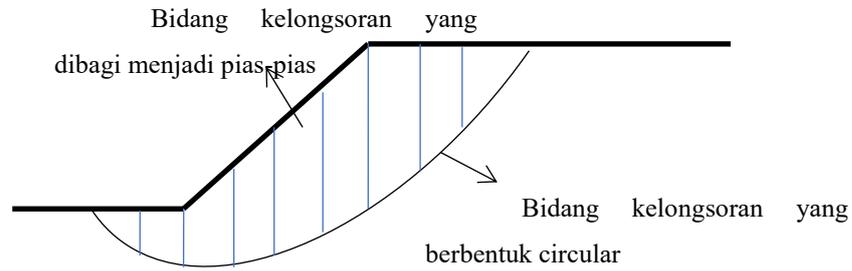
2.1 Analisa Stabilitas Lereng

Suatu lereng dikatakan memiliki potensi kelongsoran yang besar jika gaya dorong (*driving force*) pada lereng akibat komponen berat tanah yang sejajar dengan kemiringan lereng melebihi dari gaya perlawanan (*resisting force*) yang berasal dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor. Untuk mencegah terjadinya kelongsoran, langkah awal yang harus dilakukan sebelum memanfaatkan suatu lereng adalah dengan melakukan analisa stabilitas lereng. Analisa ini berguna untuk mengetahui seberapa besar keamanan suatu lereng. Beberapa metode analisa stabilitas lereng akan dibahas pada subbab berikut.

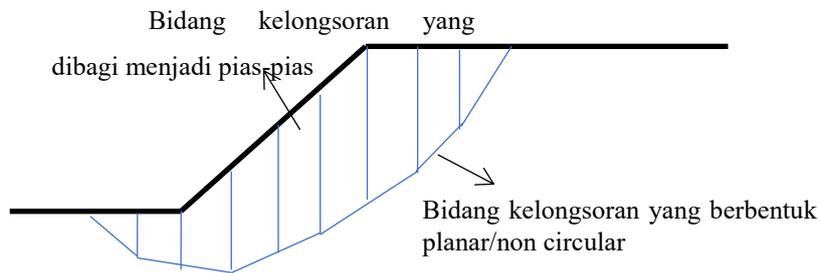
2.1.1 Limit equilibrium method (LEM)

Limit equilibrium method (LEM) adalah salah satu metode untuk menentukan besarnya angka keamanan dari suatu lereng. LEM mulai dikembangkan pada awal Abad 20. Analisa menggunakan metode irisan ini terus dikembangkan oleh beberapa peneliti, contohnya adalah Bishop (1955) dan Fellenius (1936). Pada tahun 1960an analisa stabilitas mulai dilakukan dengan menggunakan program bantu komputer. Perkembangan analisa stabilitas lereng menggunakan program bantu komputer mampu menjadikan perumusan stabilitas lereng secara matematik menjadi semakin baik. Beberapa peneliti yang ikut mengembangkan rumusan matematis dengan program bantuan komputer adalah Spancer (1967).

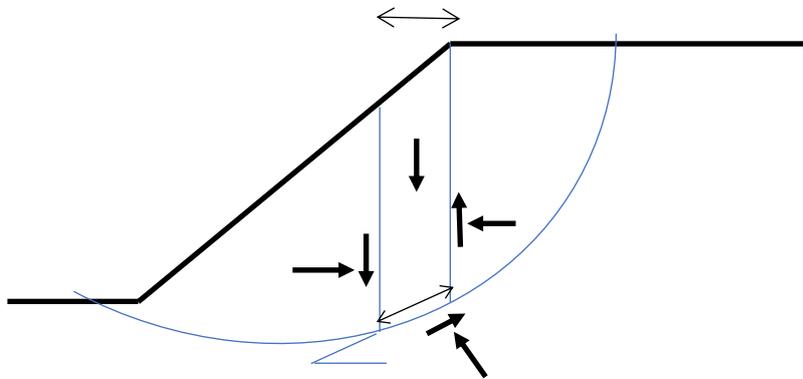
Hingga saat ini, banyak sekali metode perhitungan *slope stability* LEM yang sudah berkembang. Secara umum, konsep seluruh rumusan yang digunakan tersebut adalah sama dan asumsi bidang longsor yang mungkin terjadi seluruhnya dilakukan di awal. Bidang longsor ini dapat berbentuk lingkaran/*circular* (Gambar 2.1) dan dapat juga berbentuk planar/*non circular* (Gambar 2.2). Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.1. Asumsi bidang kelongsoran lereng berbentuk circular



Gambar 2.2. Asumsi bidang kelongsoran lereng berbentuk planar/non circular



Gambar 2.3. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan ke-n

Perbedaan pada metode-metode LEM yang ada adalah terletak dalam menentukan dasar rumusan statis dan asumsi yang digunakan dalam menganalisa stabilitas lereng. Perumusan dasar dan asumsi, masing-masing digunakan untuk menentukan tegangan antar irisan dan untuk mencari hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal pada masing-masing irisan bidang longsor. Perbedaan antara berbagai metode yang telah berkembang dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1. Perbedaan Berdasarkan Penggunaan Rumusan Statik

Metode	Momen Equilibrium	Force Equilibrium
Ordinary or Fellenius	Yes	No
Bishop's Simplified	Yes	No
Janbu's Simplified	No	Yes
Spencer	Yes	Yes
Morgenstern-Price	Yes	Yes
Lowe-Karafiath	No	Yes
Sarma-Vertical Slice	Yes	Yes

Tabel 2.2 Perbedaan Karakteristik dan Hubungan Antar Tegangan di Masing-Masing Pias Bidang Longsor

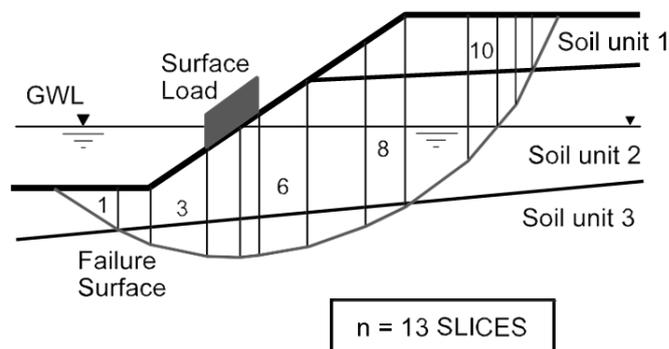
Metode	Interslice Normal	Interslice Shear
Ordinary or Fellenius	No	No
Bishop's Simplified	Yes	No
Janbu's Simplified	Yes	No
Spencer	Yes	Yes
Morgenstern-Price	Yes	Yes
Lowe-Karafiath	Yes	Yes
Sarma-Vertical Slice	Yes	Yes

Beberapa metode LEM yang ada dapat digunakan untuk mendapatkan Angka Keamanan/*Safety Factor* (SF) dari suatu lereng dengan asumsi bidang longsor yang telah ditentukan di awal. Dimana jika $SF > 1$, lereng aman; jika $SF = 1$, lereng kritis; dan jika $SF < 1$, lereng longsor. Setelah nilai SF didapatkan dari asumsi bidang longsor yang diawal telah ditentukan (SF1), engineer harus melakukan analisa ulang dengan asumsi bidang longsor yang lain. Analisa ini terus dilakukan dengan berbagai macam asumsi bidang longsor sampai didapatkan SF yang kritis. Analisa ini jika dilakukan secara manual akan membutuhkan banyak waktu. Untuk itu software analisa stabilitas lereng menggunakan metode LEM sangat dibutuhkan. Software LEM antara lain adalah Xstabl dan Geoslope.

A. Software XSTABL

XSTABL menyediakan lingkungan terpadu untuk melakukan analisis stabilitas lereng pada komputer pribadi IBM, atau kompatibel. Program ini menggabungkan antarmuka pengguna yang intuitif dan filosofi analitis di balik program stabilitas lereng yang populer. Analisis terdiri dari pencarian permukaan kegagalan yang paling kritis atau penentuan faktor keamanan permukaan tunggal dengan salah satu metode *limit equilibrium* yang digabungkan ke dalam XSTABL. Dengan setiap analisis, plot layar grafis dapat disimpan untuk dicetak kemudian atau dimasukkan ke dalam aplikasi perangkat lunak lain seperti pengolah kata. Antarmuka yang berbasis menu terintegrasi menyediakan akses intuitif ke tabel deskriptif untuk entri data, sehingga memungkinkan pengguna untuk memasukkan, mengedit, atau meninjau data kemiringan dengan cepat. Sementara untuk mengumpulkan data, pengguna dapat melihat geometri lereng dan mengakses bantuan konteks-sensitif. Diharapkan pendekatan ini akan meminimalkan potensi kesalahan dan menyediakan metode penyiapan data yang lebih tepat bagi pengguna yang kurang terbiasa.

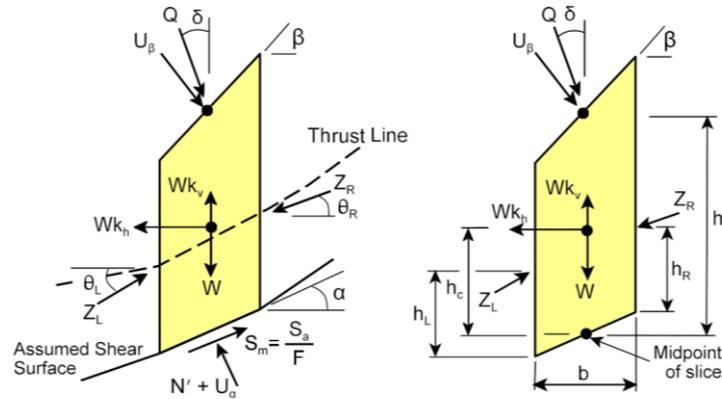
Program XSTABL menggunakan metode irisan bersamaan dengan prosedur keseimbangan batas untuk menghitung faktor keamanan lereng. Pendekatan ini mensyaratkan bahwa massa geser potensial dibagi menjadi n irisan yang lebih kecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Pembagian massa geser potensial menjadi irisan (Sharma, S., 2008)

Setiap irisan dipengaruhi oleh sistem gaya umum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Garis dorong yang ditunjukkan pada gambar

menghubungkan titik-titik penerapan gaya interslice, Z i. Lokasi garis dorong ini dapat diasumsikan. Metode analisis yang disederhanakan populer mengabaikan lokasi gaya interslice.



- | | | | |
|------------|---|------------|--------------------------------|
| F | = factor of safety | Z_L | = left interslice force |
| S_a | = available strength | Z_R | = right interslice force |
| | = $C + N' \tan \phi$ mobilized strength | θ_L | = left interslice force angle |
| S_m | = | θ_R | = right interslice force angle |
| U_α | = pore water force | h_L | = height to force Z_L |
| U_β | = surface water force | h_R | = height to force Z_R |
| W | = weight of slice | α | = inclination of slice base |
| N' | = effective normal force | β | = inclination of slice top |
| Q | = external surcharge | b | = width of slice |
| k_v | = vertical seismic coefficient | h | = average height of slice |
| k_h | = horizontal seismic coefficient | h_{eq} | = height to centroid of slice |

Gambar 2.5. Gaya-gaya yang bekerja pada tiap pias (Sharma, S., 2008)

Metode Bishop (1955) yang disederhanakan sangat populer karena faktor nilai keamanan dapat dengan cepat dihitung untuk sebagian besar permukaan. Namun, metode ini tidak memenuhi keseimbangan gaya dan momen penuh dan dengan demikian nilai-nilai faktor keselamatan yang berbeda akan dihitung dibandingkan dengan metode yang memenuhi kondisi keseimbangan lengkap. Untuk permukaan *failure* sirkular, faktor keamanan yang dihitung dengan metode Bishop biasanya lebih besar daripada nilai dari formulasi Janbu. Nilai FOS Bishop juga umumnya dalam 5 persen dari nilai FOS yang dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan yang lebih ketat seperti metode GLE. Jadi untuk analisis permukaan kegagalan sirkular, metode Bishop yang disederhanakan sangat disarankan untuk analisis.

Metode Bishop yang disederhanakan juga menggunakan metode irisan untuk mendiskritisasi massa tanah untuk menentukan faktor keamanan. Metode ini memenuhi kesetimbangan gaya vertikal untuk setiap irisan dan

kesetimbangan momen keseluruhan tentang pusat permukaan percobaan sirkular. Metode Bishop yang disederhanakan mengasumsikan gaya geser antar-slicenya nol (yaitu gaya interslice semuanya horisontal), atau $\theta_L = \theta_R = 0$.

Metode Bishop memenuhi keseimbangan gaya vertikal untuk setiap irisan, serta keseimbangan gaya horizontal keseluruhan untuk seluruh massa geser. Keseimbangan gaya vertikal untuk setiap irisan, i , diberikan oleh:

$$\begin{aligned} \Sigma [F_v]_i &= (N' + U_\alpha) \cos \alpha + S_m \sin \alpha - W(1 - k_v) \\ &- U_\beta \cos \beta - Q \cos \delta = 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

Persamaan di atas dapat diatur untuk N' sebagai

$$N' = \frac{-U_\alpha \cos \alpha - S_m \sin \alpha + W(1 - k_v) + U_\beta \cos \beta + Q \cos \delta}{\cos \alpha} \quad (2.2)$$

Dengan menggunakan notasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.5, keseimbangan momen keseluruhan dari gaya yang bekerja pada setiap irisan adalah:

$$\begin{aligned} \Sigma M_o &= \sum_{i=1}^n [W(1 - k_v) + U_\beta \cos \beta + Q \cos \delta] R \sin \alpha \\ &- \sum_{i=1}^n [U_\beta \sin \beta + Q \sin \delta] (R \cos \alpha - h) \\ &- \sum_{i=1}^n [S_m] R + \sum_{i=1}^n [k_h W (R \cos \alpha - h_{eq})] = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

dimana R adalah jari-jari permukaan kegagalan melingkar, h adalah tinggi rata-rata irisan dan h_{eq} adalah tinggi vertikal antara pusat irisan dasar dan sentroid irisan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Persamaan ini dapat disederhanakan dengan membagi seluruh jari-jari untuk mendapatkan

$$\begin{aligned} \frac{\Sigma M_o}{R} &= \sum_1^n [W(1 - k_v) + U_\beta \cos \beta + Q \cos \delta] \sin \alpha \\ &- \sum_1^n [S_m] - \sum_1^n [U_\beta \sin \beta + Q \sin \delta] (\cos \alpha - h/R) \\ &+ \sum_1^n [k_h W (\cos \alpha - \frac{h_{eq}}{R})] = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Perlu diperhatikan bahwa gaya air normal dan pori yang efektif, yang bekerja pada dasar irisan, tidak memengaruhi ekspresi kesetimbangan momen karena mereka diarahkan melalui pusat lingkaran. Dengan demikian

XSTABL tidak dapat digunakan untuk menghitung Faktor Keamanan untuk permukaan non-lingkaran menggunakan metode Bishop.

Jika *Safety Factor* (SF) terhadap kegagalan geser didefinisikan sebagai F dan diasumsikan sama untuk semua irisan, Mohr-Coulomb mengerahkan kekuatan geser (S_m) di sepanjang pangkal setiap irisan diberikan oleh

$$S_m = \frac{C + N' \tan \phi}{F} \quad (2.5)$$

Jika FS diasumsikan sama untuk semua irisan, Persamaan 2.5 disubsitusikan ke Persamaan 2.3 didapatkan

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (C + N' \tan \phi)}{\sum_{i=1}^n A_2 - \sum_{i=1}^n A_3 + \sum_{i=1}^n A_4} \quad (2.6)$$

dimana

$$A_2 = (W (1 - k_v) + U_\beta \cos \beta + Q \cos \delta) \sin \alpha \quad (2.7)$$

$$A_3 = (U_\beta \sin \beta + Q \sin \delta) \left(\cos \alpha - \frac{h}{R} \right) \quad (2.8)$$

$$A_4 = k_h W \left(\cos \alpha - \frac{h_c}{R} \right) \quad (2.9)$$

selanjutnya, gaya dijumlahkan dalam arah vertikal untuk setiap irisan untuk menentukan gaya normal efektif

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \left[W(1 - k_v) - \frac{C \sin \alpha}{F} - U_\alpha \cos \alpha + U_\beta \cos \beta + Q \cos \delta \right] \quad (2.10)$$

dimana m_α adalah

$$m_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F} \right] \quad (2.11)$$

Persamaan 2.6- 2.11 adalah pernyataan yang diprogram dalam XSTABL, untuk menghitung faktor keamanan Metode Bishop yang disederhanakan yang akan digunakan pula pada program NSSAP 1.0 ini.

B. Geoslope (SLOPE/W)

SLOPE/W digunakan untuk menghitung faktor keamanan suatu lereng tanah maupun batu. SLOPE/W dapat secara efektif menganalisis masalah sederhana dan kompleks untuk berbagai bentuk permukaan slip, kondisi tekanan air pori, sifat tanah, metode analisis dan kondisi pembebanan. Dengan menggunakan *limit equilibrium method*, SLOPE/W dapat memodelkan tipe tanah heterogen, geometri permukaan stratigrafi dan permukaan yang kompleks, dan kondisi tekanan air pori-variabel dengan banyak pilihan model tanah. Analisis dapat dilakukan dengan menggunakan parameter input deterministik atau probabilistik. Tegangan yang dihitung dengan analisis tegangan elemen hingga dapat digunakan sebagai tambahan terhadap perhitungan batas ekuilibrium untuk analisis stabilitas lereng paling lengkap yang ada. Dengan rangkaian fitur yang lengkap ini, SLOPE/W dapat digunakan untuk menganalisis hampir semua masalah stabilitas lereng yang akan dihadapi dalam proyek teknik geoteknik, sipil, dan pertambangan.

SLOPE/W dapat memodelkan hampir semua masalah stabilitas, termasuk: tanah alami dan lereng batu, penggalian konstruksi, bendungan dan tanggul tanah, open-pit highwalls, struktur tanah yang diperkuat, desain stabilisasi lereng, lereng dengan biaya tambahan atau pemuatan seismik, kestabilan bendungan, lereng tak jenuh mengalami infiltrasi, dan stabilitas bendungan tailing.

2.1.2 Finite element method (FEM)

Metode Finite Elemen adalah metode yang digunakan untuk memperoleh nilai *safety factor* dari suatu lereng dengan mempertimbangkan hubungan tegangan-regangan dalam tanah dan deformasi tanah. Konsep perhitungan dengan metode ini yaitu dengan menggunakan analisa numerik untuk memperoleh hubungan tegangan-regangan maupun deformasi. Berbeda dengan LEM, pada metode elemen hingga atau FEM tidak dilakukan asumsi bidang longsor untuk mendapatkan SF. Faktor keamanan (*safety factor*) didapatkan dengan mereduksi nilai tegangan geser (c) dan sudut geser dalam tanah (ϕ). Kedua parameter

tersebut akan berkurang hingga massa tanah dalam tubuh lereng mengalami kelongsoran.

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (2.12)$$

dimana :

M_{sf} = faktor reduksi dari perhitungan,

$\tan \phi_{input}$ dan c_{input} = parameter tanah sesuai dengan kondisi asli, dan

$\tan \phi_{reduced}$ dan $c_{reduced}$ = parameter nilai ϕ dan c terendah yang didapatkan dari *software* ketika *software* tersebut menyatakan lereng telah runtuh (*soil body collapse*)

Total nilai dari ΣM_{sf} digunakan dalam menentukan nilai parameter tegangan dalam tanah dalam analisa perhitungan yang dilakukan. Dalam seluruh proses perhitungan analisa stabilitas lereng, nilai total *safety factor* yang diperoleh adalah menggunakan rumusan:

$$F = \frac{\text{available strength}}{\text{strenght at failure}} = (\Sigma M_{sf}) \text{ at failure} \quad (2.13)$$

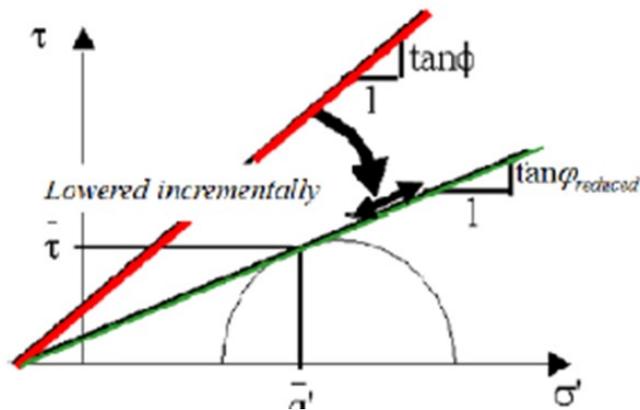
Contoh *software* yang menggunakan konsep ini adalah Plaxis. Metode ini pada Plaxis dikenal sebagai *Phi-c Reduction*. Proses perhitungan pada Plaxis dalam diagram keruntuhan Mohr dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Gouw dkk., 2012). Dalam Plaxis, analisa Undrained untuk tanah berbutir halus memiliki tiga cara masukan, yaitu :

a. Undrained A

Tipe perilaku material undrained dan parameter-parameter masukan yang dipakai adalah parameter kuat geser efektif (c' , ϕ' , dan ψ') dan parameter kekuatan efektif (E'_{50} , ν'). Perhitungan undrained dilakukan dalam analisis tegangan efektif.

b. Undrained B

Tipe perilaku material dipilih undrained dan masukan yang dipakai adalah parameter kuat geser tegangan total ($c=c_u$, $\phi=0$, $\psi=0$) dan parameter kekakuan efektif (E'_{50} , ν'). Perhitungan undrained dilakukan dalam analisis tegangan efektif.



Gambar 2.6. Proses perhitungan faktor keamanan dalam FEM (Gouw dkk., 2012)

c. Undrained C

Tipe perilaku material dipilih drained dan parameter-parameter yang dipakai sebagai masukan adalah parameter kuat geser tegangan total ($c=c_u$, $\phi=0$, $\psi=0$) dan kekakuan total (E_u , $\nu=0.495$). Perhitungan undrained dilakukan dalam analisis tegangan total.

Perhitungan kondisi Undrained, dilakukan dengan menggunakan ketiga cara di atas. Bila diperlukan perhitungan kondisi drained, maka semua parameter masukan dalam parameter efektif dan tipe material dipilih drained. Model tanah yang dipakai adalah Model Mohr Coulomb. Sama halnya dengan program menggunakan konsep LEM sebelumnya, program ini juga belum mampu menganalisis lereng yang telah retak menggunakan *The concept of cracked soil*.

2.2 Perbandingan antara Analisa Stabilitas Lereng Metode LEM dan FEM

Beberapa peneliti seperti Gouw, dkk (2012) dan Rabie (2014) telah membandingkan dua metode analisa stabilitas lereng yaitu LEM dan FEM. Rabie (2014) melakukan studi perbandingan antara metode elemen hingga (FEM) dengan pendekatan reduksi kekuatan geser dan LEM yang paling banyak digunakan yaitu: metode Bishop yang disederhanakan, metode Janbu yang disederhanakan, dan metode Fellenius. Hasil studi tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3. Dari Tabel 2.3 terlihat bahwa metode LEM sangat konservatif dibandingkan dengan pendekatan elemen hingga. Studi yang sama dilakukan pula

oleh Gouw, dkk (2012) dan hasilnya dapat dikatakan bahwa LEM dan FEM (kecuali Plaxis metode undrained A) memiliki kecenderungan nilai angka keamanan yang sama (Tabel 2.4). Berdasarkan hasil studi tersebut, metode yang akan digunakan pada penelitian ini adalah LEM dengan metode Bishop yang disederhanakan.

Tabel 2. 3. Hasil Perbandingan Angka Keamanan dalam Kondisi Unsaturated dan Saturated (Rabie, 2014)

Metode	Angka Keamanan	
	<i>Unsaturated</i>	<i>Saturated</i>
FEM	2.547	1.953
Bishop yang disederhanakan	1.094	0.722
Janbu yang disederhanakan	1.093	0.728
Fellenius	1.065	0.723

Tabel 2. 4. Hasil Perbandingan Angka Keamanan pada Beberapa Lokasi (Gouw dkk., 2012)

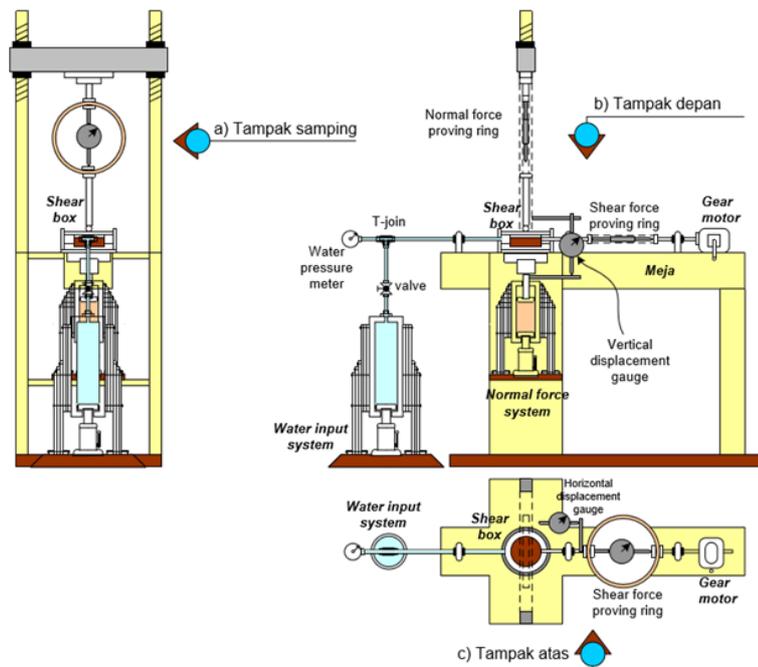
Metode	Faktor Keamanan		
	Proyek Malaysia	Proyek B	Proyek Rio de Janeiro
Plaxis Undrained A	< 1 (runtuh)	-	-
Plaxis Undrained B	< 1 (runtuh)	1.2	1.16
Plaxis Undrained C	< 1 (runtuh)	1.2	1.16
Fellenius	1.05	1.11	1.26
Bishop	1.05	1.22	1.26
Janbu	0.93	1.24	1.09

2.3 Pengujian Laboratorium untuk Mencari Parameter Geser Tanah Retak

Hutagamissufardal, dkk. (2018) telah melakukan penelitian untuk menemukan parameter geser tanah kondisi retak. Peralatan yang digunakan dalam penelitian tersebut yaitu alat uji Geser Langsung Modifikasi. Alat uji geser ini pada prinsipnya sama dengan alat uji geser biasa. Skema lengkap alat uji Geser Langsung Modifikasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7. Komponen utama alat uji Geser Langsung Modifikasi yang dihasilkan dari penelitian ada empat (Gambar 2.8), yaitu rangka beban normal untuk memberikan beban normal pada benda uji, proving ring pembebanan horizontal untuk mengukur besar tekanan

horizontal yang dihubungkan dengan sistem motor penggerak, kotak geser (shear box) adalah tempat benda uji yang mengalami geser, dan alat tabung tekanan air yang berfungsi memberikan tekanan air ke dalam kotak geser.

Modifikasi pada alat uji geser langsung terutama dilakukan pada bagian kotak geser. Kotak geser pada alat uji Geser Langsung Konvensional adalah terbuka tanpa tutup sedangkan kotak geser pada alat uji Geser Langsung Modifikasi dibuat mempunyai tutup (Gambar 2.9). Kalau pada alat uji geser langsung konvensional kotak geser tidak menerima tekanan air, maka pada alat uji geser langsung modifikasi kotak geser menerima tekanan air. Tekanan air yang diberikan pada benda uji di dalam kotak geser didapatkan dari alat tabung tekanan air (Gambar 2.10). Dari hasil penelitian didapatkan bahwa alat uji geser modifikasi yang dihasilkan dari penelitian tersebut dapat digunakan untuk menguji parameter geser tanah yaitu nilai kohesi dan sudut geser internal. Tekanan air dapat diberikan pada benda uji dengan menggunakan alat ini. Panjang bidang retak sangat berpengaruh terhadap nilai kohesi tanah. Semakin panjang bidang retak di dalam tanah akan semakin menurunkan nilai kohesi tanah. Panjang bidang retak tidak berpengaruh terhadap nilai sudut gesek internal.



Gambar 2.7. Skema lengkap alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamisufardal, dkk, 2018)



Gambar 2.8. Foto lengkap alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamissufardal, dkk, 2018)

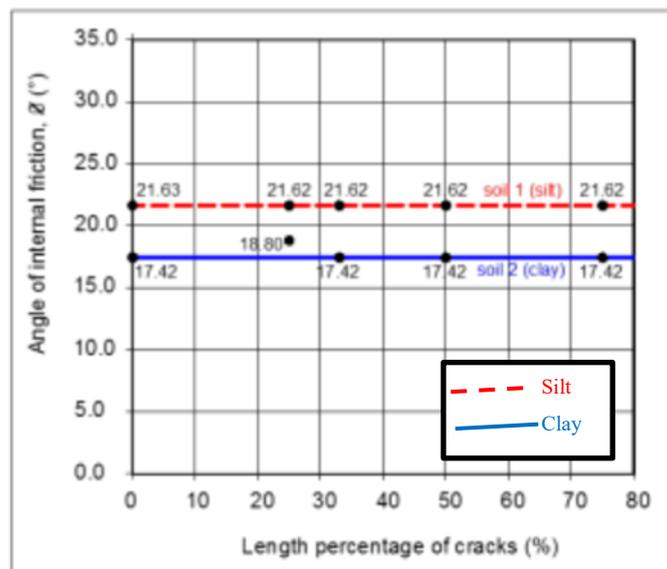


Gambar 2.9. Foto kotak geser (shear box) pada alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamissufardal, dkk, 2018)



Gambar 2.10. Foto tabung tekanan air pada alat uji Geser Langsung Modifikasi (Hutagamissufardal, dkk, 2018)

Perilaku *behaving like sand* juga disebabkan karena adanya pasir pada bidang retak. Tanah lempung yang semula mempunyai kohesi $0,3281 \text{ kg/cm}^2$ dan sudut gesek internal $17,43^\circ$, karena adanya pasir seberat 3 gram pada bidang retak maka kohesinya menjadi $0,0 \text{ kg/cm}^2$ dan sudut geseknya menjadi $24,20^\circ$. Semakin banyak pasir di bidang retak maka akan semakin meningkatkan nilai sudut gesek internal tanah. Untuk berat pasir 3 gram, 6 gram, 12 gram, dan 24 gram, maka sudut gesek internalnya berturut-turut adalah $24,20^\circ$, $27,00^\circ$, $29,47^\circ$, dan $31,27^\circ$. Hal ini juga menunjukkan adanya fenomena *behaving like sand* pada tanah retak yang terisi oleh pasir. Pasir yang ada di bidang retak akan merubah sifat tanah kohesif menjadi tanah nonkohesif. Grafik hubungan antara besarnya sudut geser dalam tanah kondisi drain dengan panjang retakan (%) dapat dilihat pada Gambar 2.11. Dari grafik pada Gambar 2.11 juga bisa dijadikan acuan untuk menentukan nilai perkiraan parameter geser tanah retak, yaitu untuk silt $c_c = 0$ dan $\phi_c = \pm 21.6^\circ$ dan clay $c_c = 0$ dan $\phi_c = \pm 17.4^\circ$. Perlu ditekankan nilai ini hanya nilai perkiraan. Untuk nilai pastinya diperlukan tes khusus untuk mendapatkan parameter geser tanah kondisi cracks di setiap lokasinya sesuai dengan pengujian yang telah dilakukan Mochtar dan Hutagamissufardal (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016).



Gambar 2.11. Besarnya nilai sudut geser dalam tanah kondisi drain pada kondisi cracked soil (%) untuk contoh tanah lempung dan lanau (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016)

2.4 Cara Mendapatkan Bidang Retak pada Lereng

Hasil penelitian lapangan Mochtar (2011 dan 2012) dan Mochtar dan Hutagamissufardal, dkk. (2016) adalah pada sebagian kasus kelongsoran di Indonesia maupun di tempat lain di dunia, kejadian kelongsoran umumnya terjadi pada saat hujan lebat atau sangat lebat ataupun sesaat setelah hujan sangat lebat. Kelongsoran dapat terjadi kapan saja asalkan hujan lebat atau sangat lebat terjadi. Lereng atau tebing yang sebelumnya stabil dapat mengalami kelongsoran bila diguyur hujan dengan intensitas tinggi selama sehari-hari, kelongsoran tebing terjadi tidak hanya pada tebing tanah tetapi dapat terjadi pada tebing tanah bercampur batu ataupun tebing dengan tanah lempung kelanauan yang kaku dengan nilai *safety factor* > 1 walaupun tebing tersebut landai dan curam tetapi pada saat hujan yang sangat lebat tetap saja longsor. Pada daerah yang sering mengalami kelongsoran, setelah disurvei, dari hasil bor di lapangan pada tanah di luar bidang longsor, menunjukkan bahwa lapisan-lapisan tanah di lereng tersebut ternyata tidak jenuh air, dan letak muka air tanah ternyata cukup dalam. Jadi kelongsoran tanah tidak dipengaruhi oleh posisi muka air tanah (kejenuhan tanah) karena lereng yang posisi muka air tanah jauh di dalam, faktanya lereng mengalami kelongsoran pada saat hujan lebat terjadi.

Pergerakan kelongsoran pada tebing-tebing sepanjang sisi suatu jalan raya di daerah pengunungan biasanya terjadi pada tempat-tempat tertentu saja, tidak terjadi pada seluruh tebing jalan, walaupun kondisi batuan dan tanah pada sepanjang jalan relatif sama. Kelongsoran tidak terjadi secara berbarengan sepanjang tebing jalan, tetapi bergantian dari satu tempat ke sisi lainnya, walaupun untuk ruas jalan sepanjang tebing jalan mengalami hujan dengan intensitas yang sama”

Berdasarkan beberapa observasi di lapangan Mochtar (2011 dan 2012) dan Mochtar dan Hutagamissufardal (2016) telah menjumpai bahwa asumsi yang memungkinkan atas terjadinya “fenomena” di lapangan adalah bahwa pada lapisan tanah di dalam tebing sudah terjadi retak-retak/*cracks*. *Cracks* yang sudah ada di dalam lereng. *Cracks* inilah yang menjadi penentuan kestabilan lereng.

Cracks yang terjadi dapat berupa retakan yang terjadi pada permukaan, ataupun akibat adanya pergerakan massa tanah pada masa lampau. *Cracks* juga dapat timbul pada lapisan tanah sedimen yang berlapis lapis, selang seling pada lapisan tanah pasir tipis untuk lapisan tanah lanau lempung yang lebih tebal.

Bidang keretakan/*crack* dapat terjadi secara random, tergantung pada sejarah pembentukan tanahnya. Kemudian bidang *cracks* yang sudah ada mudah dimasuki oleh air hujan, air hujan yang masuk ini akan mudah merembes melalui retak yang ada pada lereng. Rembesan yang masuk ke dalam lereng dan kemudian pada bagian lereng yang lain akan mengalami rembesan air dengan membawa material-material yang terangkut oleh rembesan dan keluar dari lereng.

Apabila air hujan yang masuk ke dalam lereng melalui *cracks* lebih besar dari air yang keluar maka akan mengakibatkan adanya *pore water pressure build-up* yang dapat berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Bila hujan tidak lebat maka *cracks* akan terisi oleh air hujan tetapi air yang ada tidak dapat menyebabkan terjadinya *pore water pressure built – up*. Keberadaan *cracks* yang terisi oleh air dan material bawaan dari air hujan tidak dapat dideteksi dengan menggunakan *bor log* karena *cracks* yang terjadi relatif kecil dengan ukuran mm s.d. cm saja, jadi seolah-olah hasil *bor log* merupakan tanah yang lurus dan homogen saja bila di lihat dengan kasat mata, sehingga keberadaan lensa pasir, baik itu pasir asli dan lensa pasir yang terbentuk di dalam bidang *cracks* akibat deposit dari air hujan yang terinfiltasi di dalam bidang *cracks* tidak terlihat dengan baik.

Penelitian lapangan lain telah dilakukan untuk membuktikan *cracks* terjadi di lapangan dengan menggunakan tomografi *resistivity* dan *induced polarization* (Alexsander, S., dkk., 2016). Penelitian ini merupakan salah satu bagian dari penelitian *The concept of cracked soil*. *Cracks* yang terjadi di lapangan berdasarkan hasil dari *resistivity* dan *induced polarization* dari geolistrik dengan menembakan/ menyemprotkan air garam tersebut kemudian divalidasi dan dikalibrasi.

Penelitian untuk menentukan posisi crack di lapangan menggunakan pendekatan geofisika yaitu dengan menggunakan Resistivitas dan Induced Polarization, metode survey yang digunakan pada penelitian ini adalah metode

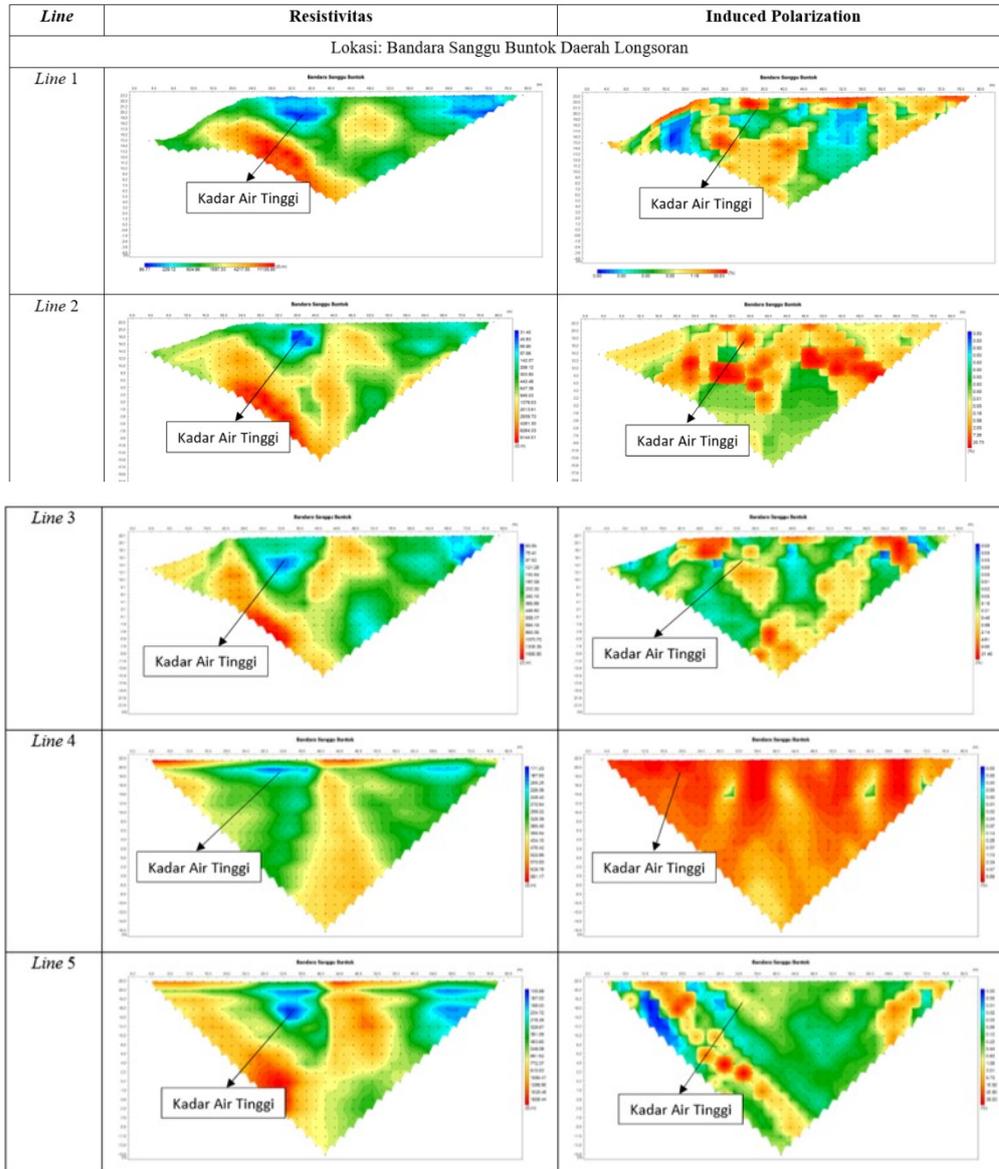
Wenner-Schlumberger. Kelebihan metode Wenner-Schlumberger ini yang yaitu memiliki sensitivitas yang baik. Hasil Resistivitas dan Induced Polarization yang akan diolah menggunakan program baru pada penelitian ini didapatkan dari hasil survey geolistri, dimana alat yang digunakan yaitu Geolistrik DZ-6A dan DUK-2A buatan Chongqing Geological Instrument Factory China seperti pada Gambar 2.12. Pendekatan Time Based digunakan dalam mengoperasikan alat ini sehingga dikatakan pengukuran Induced Polarization berdasarkan Time Based Domain.



Gambar 2.12. Alat Geolistrik DUK-2A dan DZ-6A (Alexsander, S., dkk., 2018)

Hasil penelitian Alexsander, S., dkk. (2016, 2017, dan 2018) menunjukkan bahwa dengan hasil Induced Polarization (IP) dan Tomography Resistivity (TR) dapat menentukan letak cracks di lapangan. “Hasil IP menunjukkan, bahwa pada lereng atau slope ditemukan adanya perbedaan nilai persentase IP sepanjang bentang lereng atau slope tersebut. Untuk mengetahui penyebab utama adanya perbedaan nilai persentase IP ≥ 1 % dan nilai persentase IP ≤ 1 % dilakukan pengambilan sampel 2 sampel tanah pada setiap perbedaan nilai IP. Dua sampel tanah tersebut kemudian dilakukan pengujian CT-Scan. Hasil pengujian CT-Scan menunjukkan bahwa sampel tanah yang diambil pada bagian nilai persentase IP ≥ 1 % didapatkan pada setiap irisan hasil CT-Scan adanya lubang yang terdapat di dalam sampel tanah. Berbeda dengan sampel tanah yang diambil pada nilai persentase IP ≤ 1 %, ditemukan lubang hanya di beberapa irisan hasil CT-Scan, artinya sampel tanah dengan persentase IP ≥ 1 % menunjukkan keterdapatannya lubang yang lebih banyak dibandingkan pada nilai persentase IP ≤ 1 %. Bentuk lubang berupa elips yang berukuran maksimum 6.4 x 11.3 mm. Adanya lubang dalam sampel tanah mengindikasikan adanya cracks di dalam sampel tanah. Maka nilai persentase IP ≥ 1 % di dalam lereng atau slope menunjukkan bahwa lereng

tersebut telah mengalami cracks.” Hasil penelitian lain dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Hasil resistivitas dan induced polarization di daerah longsoran Lokasi Bandara Sanggu (Alexsander, S., dkk., 2018)

Menurut Alexsander, S., dkk (2018), hasil pada Gambar 2.13. “Secara umum untuk daerah yang terjadi di luar zona longsoran memiliki perubahan kadar air terjadi tetapi tidak sebesar pada daerah yang mengalami longsoran perubahan zona kadar air cenderung merata dan kadar air berubah secara tidak merata. Tetapi

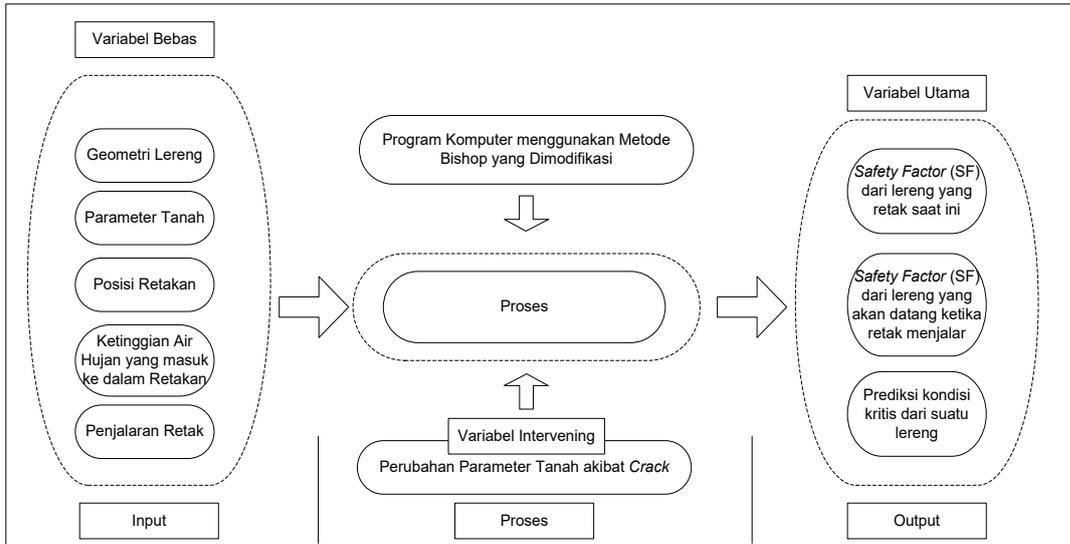
pada line 2, 3 dan 4 yang dekat dengan zona longsoran terjadi perubahan kadar air 6 – 10 meter dengan nilai resistivitas 61.69 – 78.81 ohm meter. Pada line A – D menunjukkan perubahan kadar yang ada di dalam lereng tidak menyebabkan gaya yang besar yang dapat berdampak terhadap kegagalan dinding penahan tanah yang ada. Untuk hasil induced polarization pada daerah luar longsoran perubahan cracks yang terjadi tidak terjadi secara significant. Jumlah cracks yang terjadi cenderung sangat kecil hal ini tidak memberikan dampak yang berarti bagi slope. Jumlah cracks yang sangat kecil ini ditunjukkan dengan nilai IP 0.59 – 7.72 %. Bila dibandingkan dengan daerah yang ada dengan bidang longsor yang memiliki nilai IP 21.46 – 30.3 ohm meter. Nilai IP yang besar menunjukkan adanya banyak lubang yang diinterpretasikan sebagai cracks yang ada di dalam tanah.”

2.5 Kerangka Kerja Konseptual

Kerangka kerja konseptual (*Conceptual Frame Work*) adalah gambaran mengenai hubungan antar variabel penelitian. Variabel penelitian ini terdiri atas :

- a. Variabel utama (*dependent variable*) yaitu variabel yang merupakan tujuan utama dari penelitian ini. Variabel ini dipengaruhi oleh variabel variabel yang lain. Variabel utama dalam penelitian ini adalah *Safety Factor* (SF) dari lereng yang retak (kondisi eksisting), *Safety Factor* (SF) dari lereng yang akan datang ketika retak menjalar, dan Prediksi kondisi kritis dari suatu lereng yang akan longsor ketika terkena hujan sangat deras.
- b. Variabel bebas (*independent variable*) yaitu variabel yang paling berpengaruh terhadap variabel utama dalam penelitian tetapi bersifat bebas (*independent*), tidak bergantung pada variabel yang lain. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah geometri lereng, parameter tanah, posisi retakan, kedalaman air hujan yang masuk ke dalam retakan, dan penjaralan retak.
- c. Variabel intervening (*intervening variable*) yaitu sebagai fungsi dari variabel bebas yang beroperasi. Variabel intervening dalam penelitian ini adalah perubahan parameter tanah yang mengalami *crack*. Variabel ini telah diteliti oleh peneliti lain sebelumnya.

Hubungan antara variabel-variabel tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Hubungan antar variabel dalam penelitian (*conceptual frame work*)

BAB 3.

METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini akan dibagi menjadi beberapa tahapan sesuai dengan bagan alir yang dapat dilihat pada Gambar 3.1. Tahapan-tahapan tersebut antara lain adalah :

1. Tahap Persiapan

a. Identifikasi masalah,

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana memodelkan stabilitas lereng setelah adanya keretakan di lapangan. Keretakan yang terjadi memiliki sifat dimana kekuatan geser tanahnya selalu kondisi “*drained*” dan keretakan dapat timbul di dalam tanah secara random.

b. Kajian pustaka,

Kajian dilakukan untuk mendapatkan teori-teori yang dapat menunjang penelitian ini. Teori-teori didapat dari buku, prosiding, atau jurnal terkait dengan analisa kelongsoran pada lereng yang retak, pengaruh intensitas hujan pada lereng, pemodelan numerik keretakan, dan program analisa stabilitas lereng.

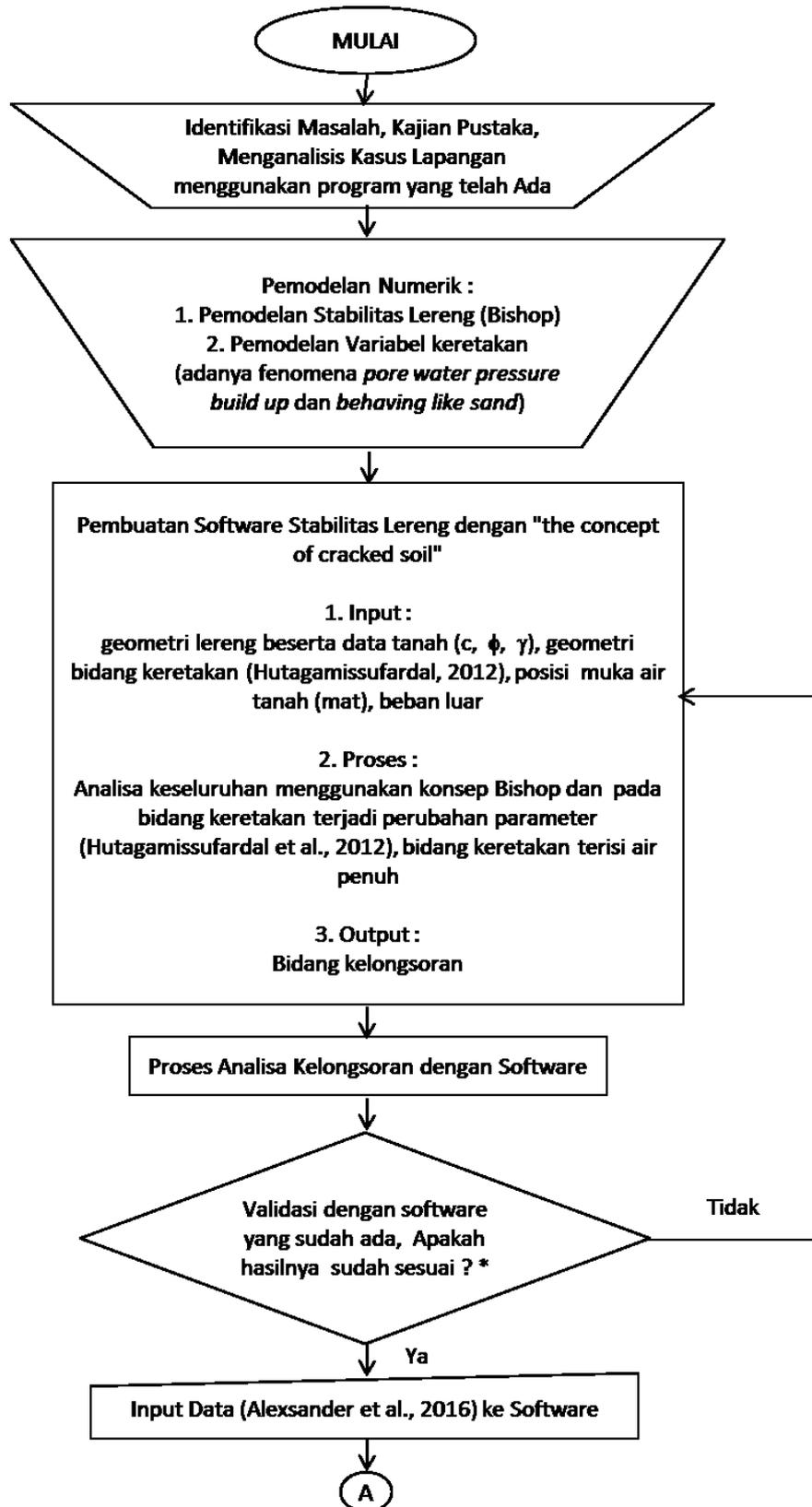
c. Aplikasi terhadap program yang telah tersedia,

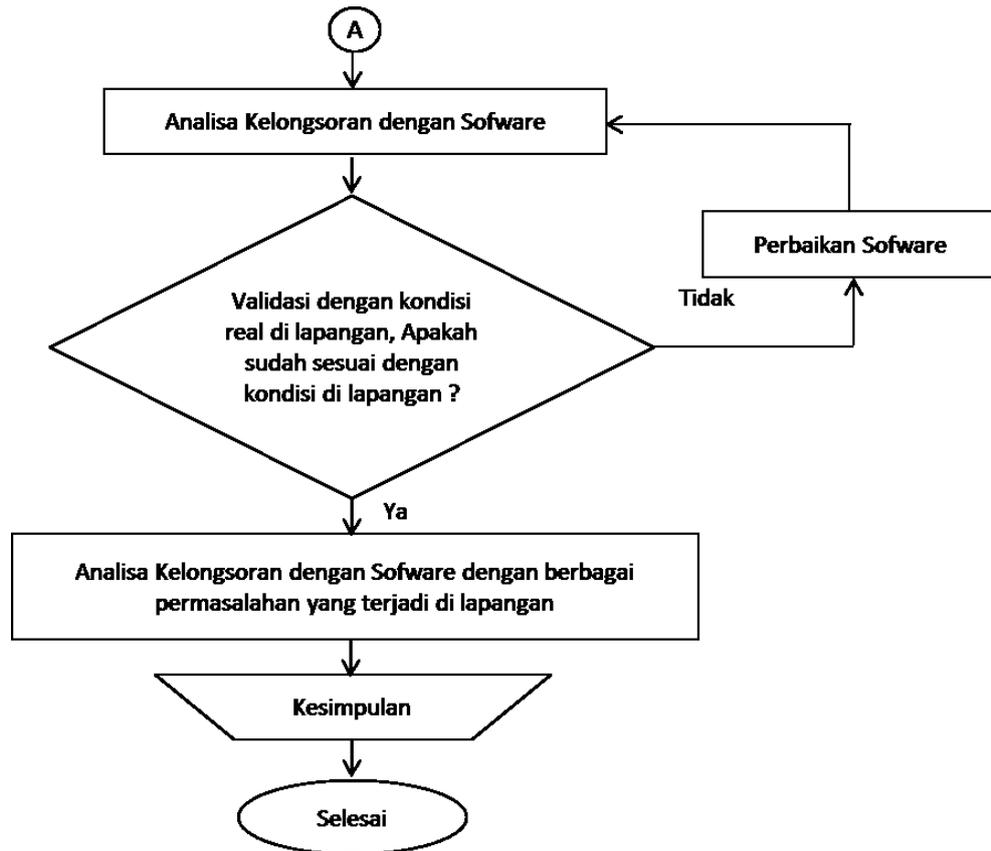
Analisis dilakukan dalam rangka mengetahui kekurangan dari program yang telah tersedia untuk kemudian membuat pemodelan yang dapat diaplikasikan pada lereng yang memiliki keretakan.

2. Tahap Pemodelan

a. Pemodelan numerik,

Pemodelan numerik analisa stabilitas lereng menggunakan konsep LEM (*Limit Equilibrium Method*) berdasarkan prinsip irisan Bishop.





* contoh : xstabl dan geoslope

Gambar 3.1. Bagan alir penelitian

Modifikasi dilakukan pada tanah yang retak, yaitu mengalami fenomena *pore water pressure build up* dan *behaving like sand*, sedangkan tanah yang tidak retak tetap berperilaku seperti aslinya. Pemodelan fenomena *pore water pressure build up* dan *behaving like sand* dilakukan dengan cara memodelkan lereng dalam kondisi jenuh dan sifat kekuatan geser tanah bagian yang terjadi retak selalu dalam kondisi “*drained*”.

b. Penyelesaian model,

Penyelesaian metode numerik yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode irisan Bishop. Penyelesaian model dilakukan dengan membuat suatu program komputer dengan menggunakan MATLAB. Program dimodelkan dengan menyusun kode-kode pemrograman dalam MATLAB berdasarkan algoritma program yang telah dirancang.

3. Tahap Akhir

a. Validasi terhadap program yang telah ada

Simulasi awal dilakukan menggunakan data awal yang diambil pada beberapa lokasi longsor di Indonesia. Simulasi awal dilakukan dengan menganggap bahwa tidak terjadi keretakan pada lereng. Hasil analisis dari program yang telah dibuat tersebut kemudian dibandingkan dengan melakukan simulasi yang sama pada program analisa stabilitas lereng yang telah tersedia (xstabl).

Lokasi studi validasi menggunakan data lereng Pembangunan Gedung Serbaguna Politeknik Negeri Balikpapan (\pm KM 8 Jalan Raya Balikpapan–Samarinda). Dalam kegiatan pembangunan Gedung Serbaguna ini perlu dilakukan pemotongan dan perataan lahan yang cukup luas. Saat pekerjaan pemotongan dan perataan lahan ini, disinyalir telah terjadi pergerakan-pergerakan tanah yang cukup berarti dari bagian-bagian lereng yang tidak terkena pemotongan. Yang paling mencolok adalah bagian tanah lereng yang berada di belakang Gedung Rektorat. Tanah lereng ini telah mengalami pergerakan-pergerakan kelongsoran yang cukup signifikan. Selain itu, pergerakan tersebut juga telah menyebabkan beberapa keretakan pada Gedung Rektorat, dan penurunan yang mencolok pada selasar-selasar di tepi Gedung Rektorat. Pergerakan tanah tersebut masih terus berlangsung sampai dengan saat Gedung Serbaguna dibangun.

Pembangunan Gedung Serbaguna diawali dengan kegiatan pengupasan lahan pada posisi yang direncanakan. Posisi pembangunan kemudian digeser \pm 30 meter dari rencana semula karena pada lokasi tersebut tidak ditemukan tanah keras yang cukup dangkal untuk meletakkan pondasi dari bangunan; padahal dalam RKS disebutkan bahwa pondasi bangunan Gedung Serbaguna ini harus direncanakan untuk langsung menumpu di atas tanah keras. Dengan adanya pergeseran lokasi serta dengan sudah dilakukannya pengupasan tanah dasar dilokasi yang ditentukan sebelumnya, maka topografi tanah dilokasi pembangunan telah berubah dari kondisi awal. Akibat dari pergerakan ini juga sangat terasa pada

sebagian struktur Gedung Rektorat, sehingga menimbulkan banyak keprihatinan bagi penggunanya.

Beberapa upaya penanggulangan pergerakan tanah dan kelongsoran telah dilakukan di lokasi pembangunan yaitu:

- i. Pemasangan minipile sedalam 6 meter untuk menahan kelongsoran;
- ii. Melakukan tambah kurang pekerjaan proyek pembangunan gedung serbaguna untuk memperkuat turap penahan longsor yang semula menggunakan batu kali diganti dengan beton bertulang;
- iii. Menutup rekahan-rekahan tanah dengan pasir dan merenovasi drainase dengan mengarahkan aliran air dari curahan atap bangunan gedung direktorat agar tidak mengalir ke area tanah yang longsor;
- iv. Mengarahkan resapan septic tank agar tidak mengarah pada area tanah yang longsor.

Walaupun setelah dilakukan beberapa upaya penanggulangan kelongsoran yang tersebut di atas, pihak Rektorat Politeknik Negeri Balikpapan belum merasa yakin bahwa tindakan–tindakan tersebut akan berhasil mengatasi masalah pergerakan tanah tersebut bertahan untuk jangka panjang. Perlu dilakukan analisa lebih lanjut untuk jangka panjang sehingga pergerakan tanah dan kelongsoran tidak terjadi lagi serta mengupayakan adanya perkuatan tambahan untuk menanggulangi bahaya kelongsoran apabila diperlukan.

Analisis dilakukan menggunakan data lapangan kondisi inisial menggunakan program yang dibuat. Setelah analisis menggunakan program yang dibuat selesai, dilanjutkan dengan menganalisis ulang lereng tersebut dengan program analisis stabilitas yang umum digunakan selama ini, yaitu XSTABL dan Geotudio.

b. Simulasi dan validasi kedua

Simulasi kedua dilakukan dengan menggunakan data lapangan yang diambil dari peneliti lain. Pada simulasi kedua ini lereng dianggap telah retak. Hasil analisis kemudian dibandingkan dengan kondisi lereng di lapangan.

Simulasi kedua dilakukan dengan mencoba kehandalan teknologi *image processing* yang terinternalisasi pada program yang dibuat ini. Data simulasi *image processing* menggunakan data dari peneliti sebelumnya (Alexsander. S., dkk., 2017). Data sekunder diambil dari penelitian (Alexsander. S., dkk., 2017) di Bandara Sanggu Buntok. Bandara Sanggu Buntok mengalami longsoran pada bulan Desember 2015. Longsoran tersebut terjadi pada timbunan setinggi 9-10 meter yang diperkuat dengan pasangan batu (batuan andesit). Longsoran hanya terjadi sepanjang 50 m dari seluruh pasangan batu sepanjang 1200 meter. Klasifikasi tanah yang ada pada daerah Bandara Sanggu Buntok adalah pasir dan jika diklasifikasikan (USCS) merupakan pasir dengan kategori SP (poor graded sand). Berdasarkan hasil pengujian N-SPT di lapangan didapatkan 3 lapisan tanah dari kekerasan sedang (medium dense), padat (dense) dan sangat padat (very dense). Untuk tanah dengan medium dense didapatkan dari 0– 6 meter, dense 6 – 14 meter dan very dense 14 – 30 meter.

c. Analisis Model,

Hasil-hasil simulasi tersebut kemudian dianalisis sehingga dapat membuktikan hipotesa dalam penelitian ini.

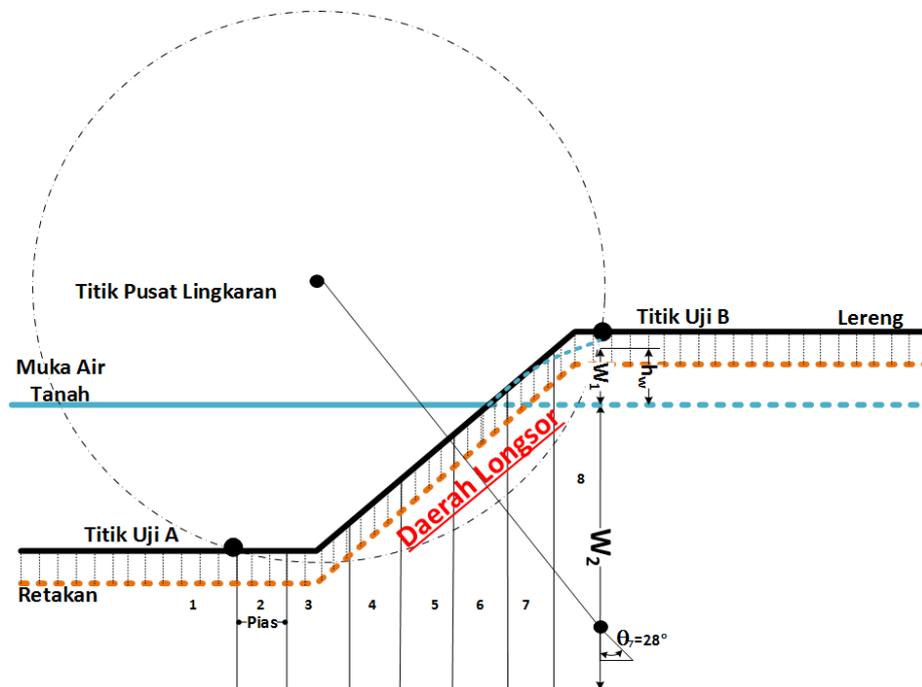
3.2 Bahan dan Peralatan Penelitian

Bahan penelitian ini berupa data tanah pada lereng-lereng yang retak, yang didapat dari laboratorium Mekanika Tanah ITS. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan peranti keras laptop dengan spesifikasi intel core i7, RAM 4GB, HDD 1TB dan peranti lunak yaitu sistem operasi menggunakan Windows 8,2; Tool menggunakan Matlab R2013a, dan database: Microsoft Access 2010.

3.3 Perumusan Detail Model

Stabilitas lereng pada penelitian ini disimulasi menggunakan metode *Bishop*. Skema retakan, level muka air tanah, dan lapisan tanah juga ditambahkan

dalam simulasi ini untuk dijadikan bahan pertimbangan yang mempengaruhi stabilitas lereng sehingga penelitian ini dapat menghasilkan nilai keamanan dari lereng yang mendekati dengan kondisi nyata di lapangan. Penelitian ini menggunakan program MATLAB R2013a untuk mensimulasikan nilai stabilitas lereng. Nilai stabilitas lereng didapat dari angka *Safety Factor (SF)* dari sebuah lereng terhadap titik-titik yang diujikan. Titik uji didapatkan melalui titik perpotongan antara lingkaran dengan lereng sehingga untuk satu lingkaran akan dihasilkan dua buah titik uji. Dua buah titik uji ini digunakan untuk menetapkan batas kiri dan kanan dari daerah longsor lereng atau bidang longsor lereng. Daerah longsor lereng didapat melalui luasan lingkaran di bawah lereng seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Titik uji dan daerah atau bidang longsor lereng

Luasan lingkaran di bawah lereng bisa didapatkan melalui total luasan pias pada Gambar 3.2. Tiap pias memiliki dua komponen berat yaitu berat tanah di atas muka air (W_1) dan berat efektif tanah yang terendam di bawah muka air (W_2). Pias lereng yang memiliki ketinggian kurang dari tinggi muka air maka pias hanya memiliki satu komponen berat yaitu W_2 . Luas tiap pias pada lereng memiliki nilai yang berbeda bergantung pada nilai berat jenis (γ) lapisan tanah dan total berat

tanah (W). Nilai berat jenis yang digunakan bergantung pada kedalaman pias yang melewati beberapa lapisan tanah dalam lereng. Tiap lapisan tanah memiliki nilai berat jenis yang berbeda. Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode *Bishop* yang menganggap bahwa gaya yang bekerja pada sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Persamaan faktor keamanan menggunakan metode Bishop.

3.4 Ikhtisar Program Simulasi

Simulasi stabilitas lereng menggunakan *software* MATLAB R2013a dengan memanfaatkan *syntax* aritmatika, logika, dan modul GUI(*Graphic User Interface*). Perancangan program simulasi ini terbagi atas dua komponen penting yaitu perancangan logika program dengan format *m-files* dan perancangan GUI dengan format *-figure*.

Alur pembuatan program dimulai dengan menggambar lereng beserta lapisan tanah dan muka air tanah. Urutan gambar diawali dengan menggambar lereng terlebih dahulu, kemudian lapisan tanah, muka air tanah, dan terakhir adalah posisi *cracks*. Pendefinisian banyak titik ketika menggambar dilakukan pertama kali sebelum mulai merancang gambar lereng, lapisan tanah, dan muka air tanah. Penggunaan program simulasi ini ditampilkan pada Bab 4. Selanjutnya pengisian posisi perkiraan bidang longsor (titik *initiation* dan *termination*) dan berapa jumlah tampilan *safety factor* yang diinginkan. Pengisian parameter-parameter dimaksudkan untuk menyediakan nilai-nilai yang akan digunakan selama proses jalannya program, seperti letak koordinat maksimal dan minimal dari jari-jari dan pusat lingkaran, nilai berat volume, kohesi, dan sudut geser dalam tanah pada tiap lapisan tanah. Parameter-parameter tersebut perlu diisi agar program dapat melakukan tugas untuk menampilkan nilai keamanan yang sesuai dengan rancangan gambar lereng. Tahap terakhir adalah tahap perhitungan *safety factor*.

3.5 Jadwal penelitian

Penelitian ini dilakukan kurang lebih selama 3 (tiga tahun). Jadwal rencana penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1.

BAB 4.

PROGRAM BARU SLOPE STABILITY ANALYSIS

PROGRAM (NSSAP 1.0)

4.1 Dasar Penyusunan Program

Program yang dihasilkan pada penelitian ini dikembangkan berdasarkan program analisis stabilitas lereng yang telah ada, yaitu XSTABL. Rencana awal, penelitian ini akan mengupgrade program xstabl yang telah ada. Dikarenakan terbatasnya akses untuk merubah, menambah, dan mengupgrade program XSTABL maka program dibuat dari awal dengan menggunakan MATLAB. Prinsip input data geometri lereng, lapisan tanah, dan area longsong (*initiation* dan *termination*) sama dengan xstabl. Hal ini dilakukan untuk memudahkan user dalam penggunaan program baru ini. Perbedaan terletak pada fitur isian data. Pada program baru ini, isian data menggunakan sheet excel yang sangat mudah diisi dan diedit oleh user. Keterbaharuan pada program ini terletak pada adanya penerapan *the concept of cracked soil* dan fitur input otomatis menggunakan teknologi citra digital (*image processing*). Detail program akan dijelaskan lebih detail pada sub bab lainnya di bab ini.

4.2 Penggunaan Program Simulasi Analisa Stabilitas Lereng

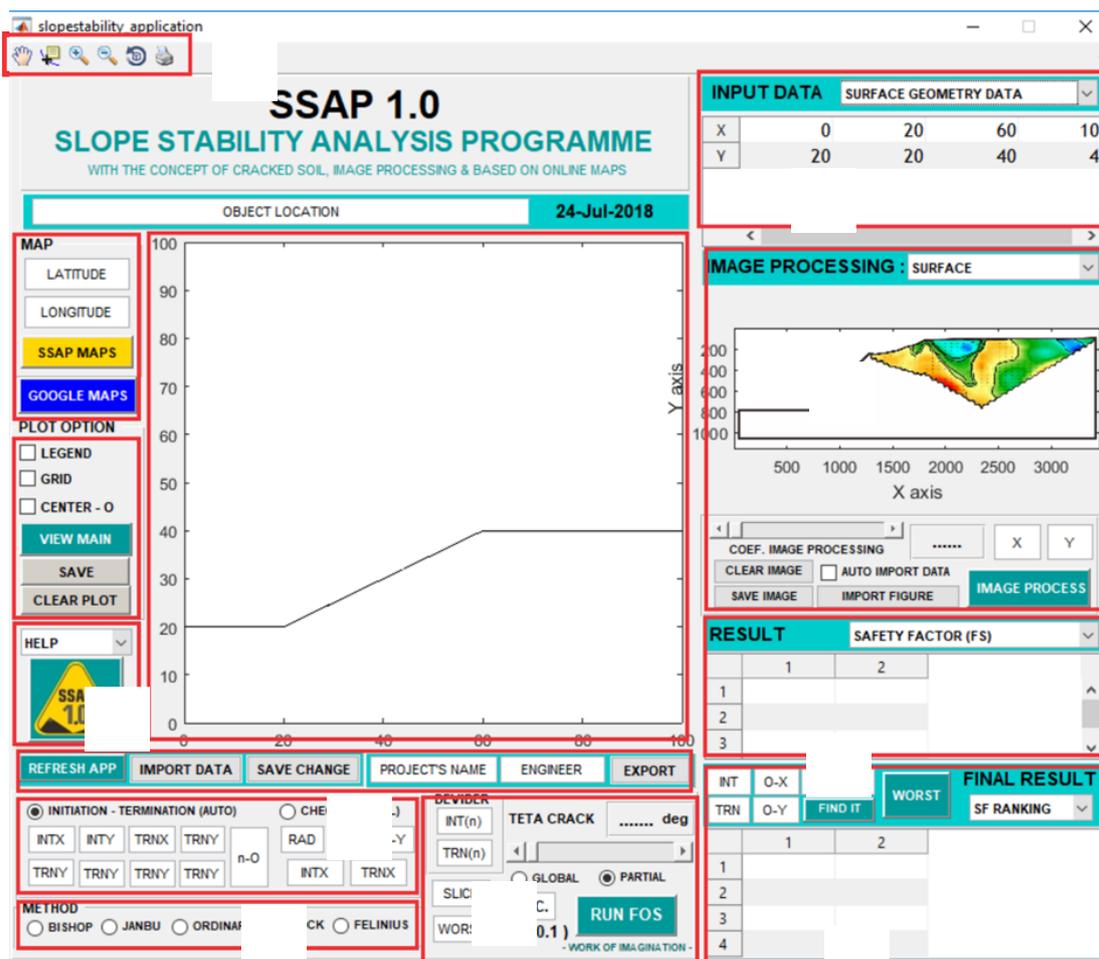
Penelitian ini menghasilkan suatu program analisa stabilitas lereng bernama NSSAP 1.0 (*Slope Stability Analysis Programme 1.0*). Program ini mengadopsi prinsip *Limit Equilibrium Method*. Perbedaan yang sangat menonjol adalah kemudahannya dalam memasukan (*input*) data lapangan (data geolistrik) secara langsung. Perbedaan lainnya adalah program ini telah menerapkan konsep *cracked soil* dalam menganalisa stabilitas lereng. Beberapa fitur unggulan Program NSSAP 1.0 diantaranya adalah :

- a. Analisis data berbasis *the concept of cracked soil*;
- b. Pengambilan data lokasi koordinat lebih detail dengan google maps/earth;
- c. Inputan data lebih *user friendly* dengan Excel;

- d. Pembacaan data lapangan (geolistrik) secara otomatis dengan teknologi “Image processing”;
- e. Tampilan *interface user friendly* dengan desain minimalis;
- f. Analisis stabilitas lereng dengan metode Bishop

Tampilan windows *interface* dari NSSAP 1.0 dapat dilihat pada Gambar 4.1. Penjelasan mengenai fungsi dari setiap fitur yang terdapat pada interface NSSAP (Gambar 4.1) adalah sebagai berikut :

- A : untuk mendukung pengamatan visualisasi lereng yang terdapat pada area kerja D, seperti menyesuaikan (*fitting*), memperbesar, atau mempekecil tampilan gambar di area kerja D;
- B : untuk menampilkan visualisasi peta atau lokasi lereng yang akan dianalisis dengan fasilitas interkoneksi langsung ke google maps/earth;



Gambar 4.1. Tampilan interface NSSAP 1.0

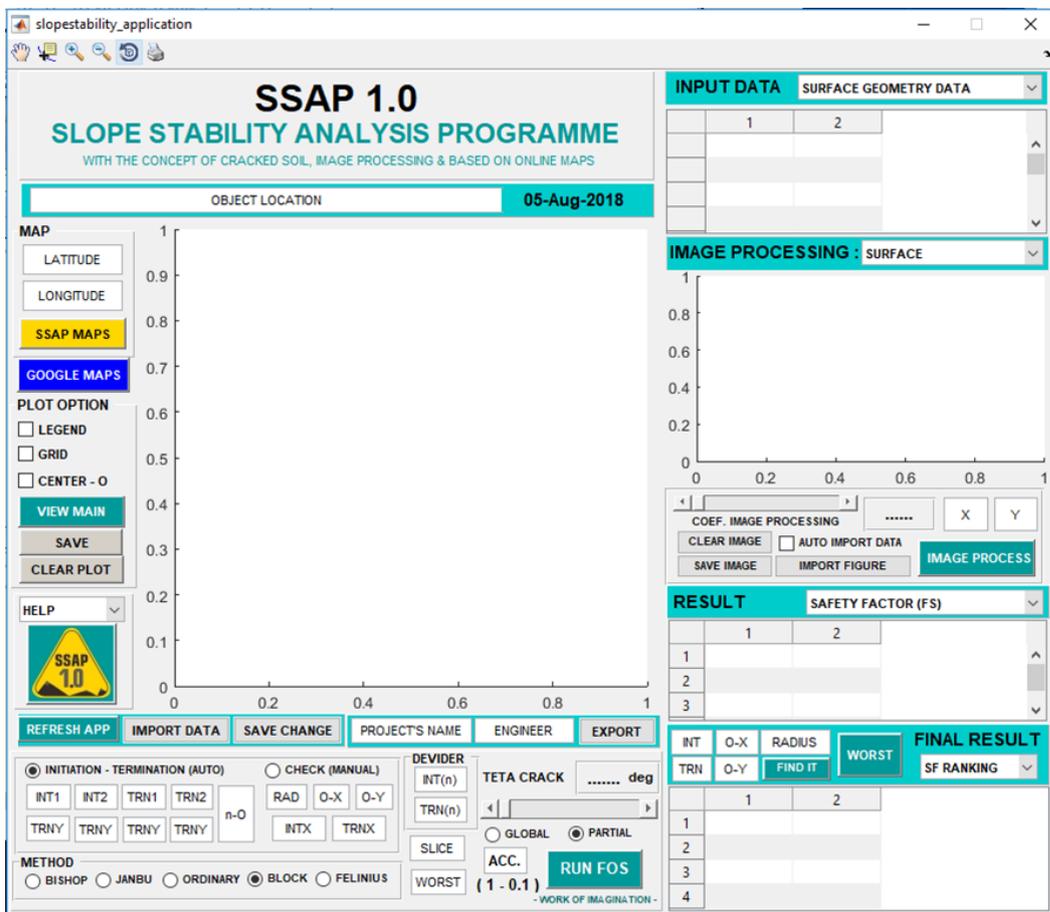
- C : untuk menampilkan atau tidak posisi titik pusat, legend, dan grid sehingga memberikan kemudahan dalam proses menggambar dan memahami hasil tampilan lereng pada area kerja D;
- D : untuk menampilkan grafik (sebagai media gambar) masukan (*input*) data lereng yang akan dianalisis serta hasil analisis (*output*).
- E : untuk menampilkan *pop up* yang berisi informasi cara penggunaan dan referensi terkait kajian yang digunakan pada NSSAP 1.0
- F : untuk mengoperasikan program NSSAP 1.0 ini (tersedia beberapa *button* yaitu “Import Data”, “Save Data”, “Refresh App”, dan “Export Data”)
- G : untuk memberikan fasilitas *edit text* ketika proses pemasukan (*input*) data *initiation* dan *termination* sebagai daerah *trial error* kelongsoran;
- H : untuk menentukan metode apa yang akan digunakan oleh pengguna dalam melakukan analisis kelongsoran lereng;
- I : untuk mengisi beberapa masukan (*input*) data, seperti *divider* (*initiation* dan *termination*), *slice*, dan jumlah hasil *safety factor* terkecil (*worst*);
- J : untuk menampilkan beberapa tabel (tabel mempunyai fitur database sehingga mampu menyimpan hasil akhir dari beberapa kali analisis) yang berisi nilai hasil akhir analisis (dengan meranking nilai *Safety Factor*, SF) serta menentukan posisi bidang longsor terkritis.
- K : untuk menampilkan seluruh hasil analisis dari sebuah lereng disertai dengan koordinat titik *initiation* dan *termination* yang telah dipilih (ditampilkan dalam bentuk tabel);
- L : untuk mengambil secara langsung hasil data geolistrik dari sebuah gambar lereng (dengan teknologi *image processing*).

4.2.1 Cara pengoperasian NSSAP 1.0 dengan metode input data manual

NSSAP 1.0 merupakan perangkat lunak *engineering* yang mempunyai tata cara penggunaan khusus. Berikut tata cara penggunaan NSSAP 1.0.

- a. Pengaktifan Program Matlab 2015 dan pemilihan program NSSAP 1.0 melalui file “slope_stability.m”. Tampilan NSSAP 1.0 akan muncul seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.

- b. Pemasukan data geometri lereng dan beberapa data lain yang mendukung analisis stabilitas lereng. Proses ini dilakukan dengan memilih Tombol “IMPORT DATA”. Selanjutnya, file excel yang telah disediakan di dalam NSSAP 1.0 dipilih untuk diisi. Jika pengguna ingin memperbaiki (*editing*) isian data sebelumnya pada tabel “INPUT DATA”, maka isian sebelumnya dapat langsung pengguna perbarui (*update*) pada file data input tersebut dan setelah proses tersebut selesai diakhiri dengan menekan *button* “SAVE CHANGE” untuk menyimpan perubahan data input yang telah diperbaharui (*update*). Setelah proses import data berhasil selanjutnya tombol “VIEW MAIN” ditekan untuk menampilkan gambar lereng yang telah diinputkan oleh pengguna pada tahap sebelumnya.



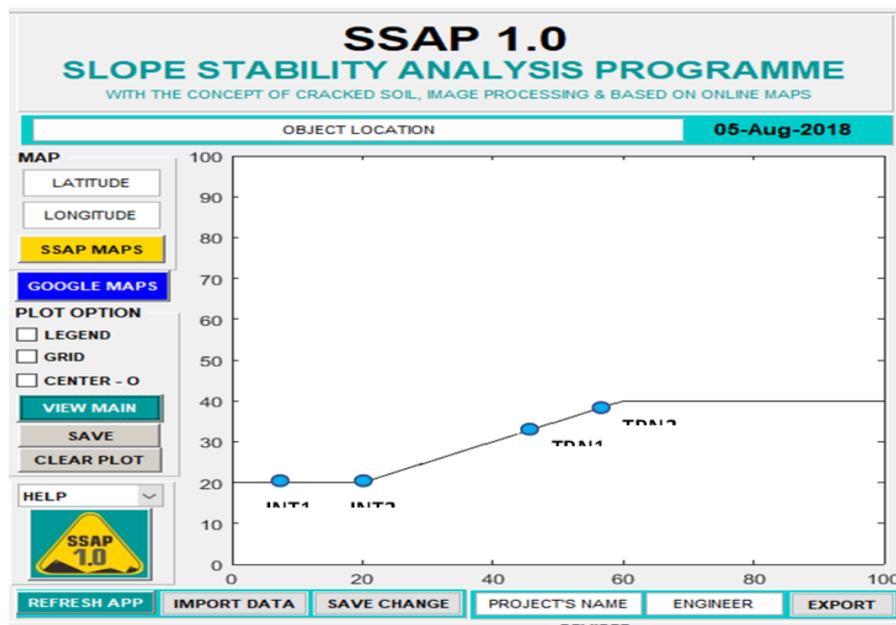
Gambar 4.2. Tampilan awal NSSAP 1.0

- c. Pengisian Input-an nilai *initiation* dan *termination* dengan memilih tampilan radio button “INITIATION – TERMINATION (AUTO)”. Kata AUTO disini memiliki pengertian bahwa pengguna tinggal menentukan titik *initiation* dan

termination yang selanjutnya untuk titik pusat busur kelongsoran dan jari – jari analisis lereng akan dihitung secara otomatis oleh NSSAP 1.0. *Initiation* (INT) dan *termination* (TRN) merupakan cakupan titik atau area percobaan bidang longsor yang akan dianalisis pada NSSAP 1.0 sehingga dapat dihasilkan nilai *Safety Factor* (SF) di titik atau area lereng tersebut. Penjelasan terkait Input-an nilai *initiation* dan *termination* adalah sebagai berikut :

- INT1 : Titik *initiation* yang pertama (titik ini sebagai batas kiri) dari lingkaran keruntuhan (*trial error* bidang longsor), pengisian dilakukan seperti pada program xstabl
- INT2 : Titik *initiation* yang kedua (titik ini sebagai batas kanan) dari lingkaran keruntuhan (*trial error* bidang longsor), pengisian dilakukan seperti pada program xstabl
- TRN1 : Titik *termination* yang pertama (titik ini sebagai batas kiri) dari lingkaran keruntuhan (*trial error* bidang longsor), pengisian dilakukan seperti pada program xstabl
- TRN2 : Titik *termination* yang kedua (titik ini sebagai batas kanan) dari lingkaran keruntuhan (*trial error* bidang longsor), pengisian dilakukan seperti pada program xstabl

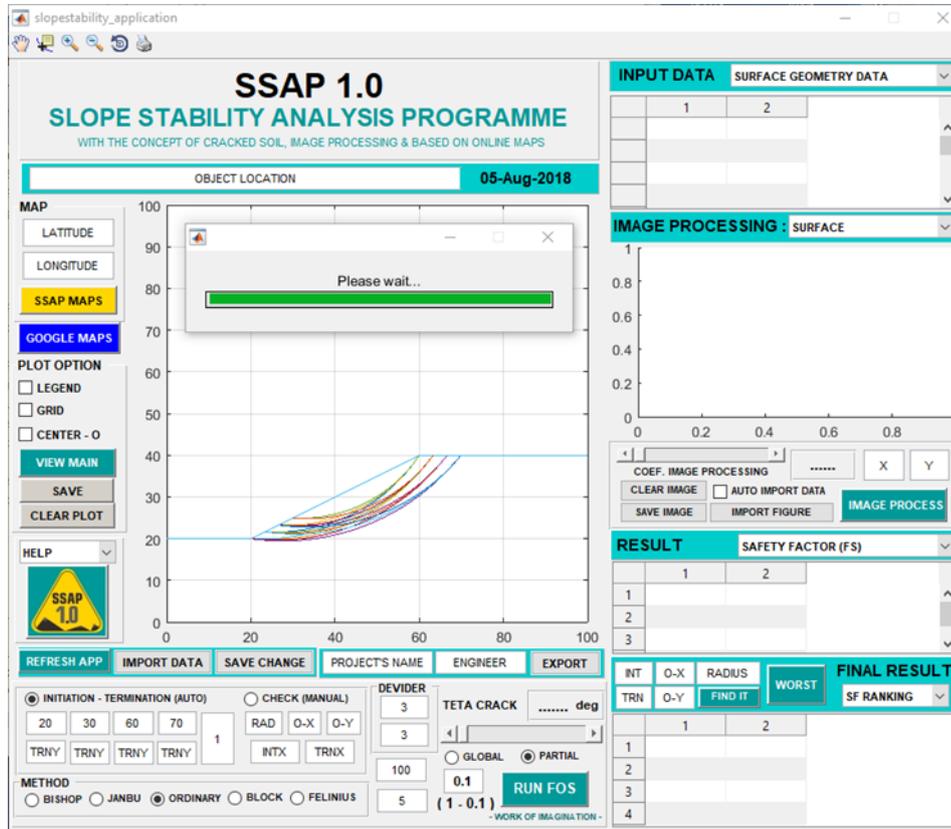
Visualisasi posisi iniatin dan termination dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Visualisasi posisi initation dan termination NSSAP 1.0

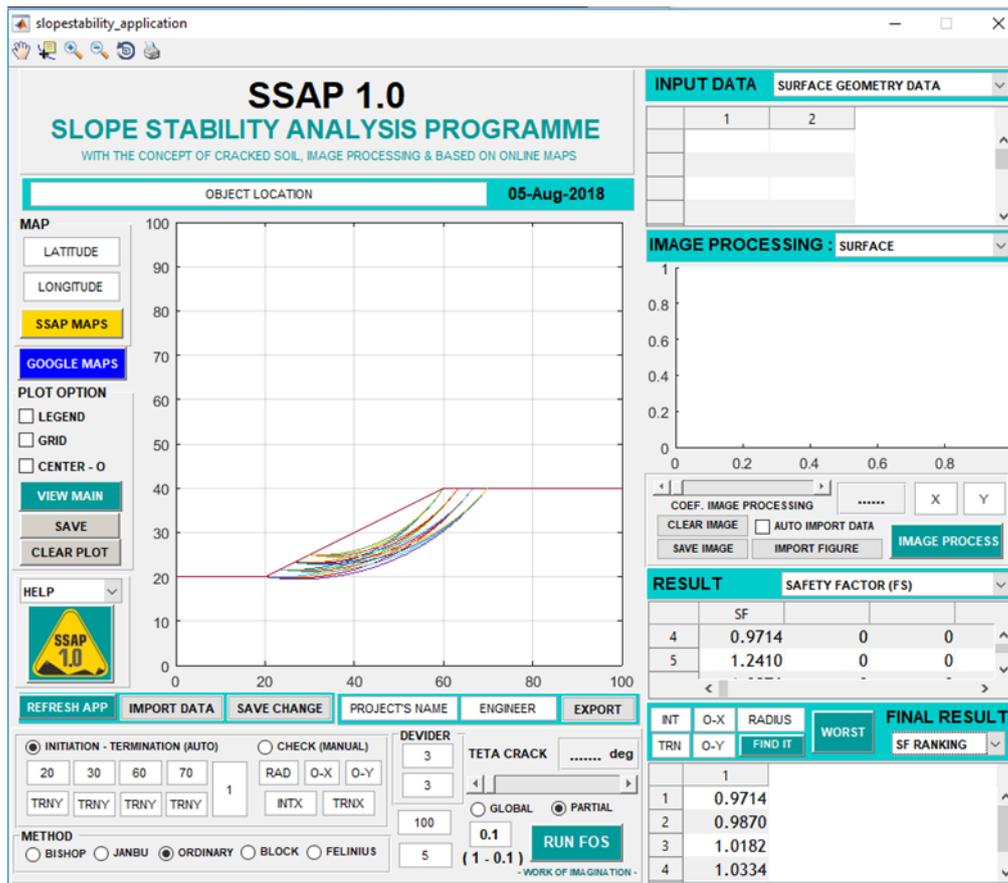
- d. Pengisian kotak “n-O” dengan isian berupa angka interger (1,2,3,...). Isian ini berfungsi untuk menentukan jumlah titik pusat analisis kelongsoran lereng yang akan dianalisa. Secara otomatis program NSSAP 1.0 ini mampu memberikan rekomendasi beberapa titik pusat kelongsoran lereng.
- e. Pemilihan metode analisis stabilitas lereng. Dalam NSSAP 1.0 ini disediakan 3 (tiga) metode analisis stabilitas lereng yaitu Bishop, Janbu, dan Ordinary. Pengguna dipersilahkan untuk memilih salah satu metode metode dari 3 (tiga) metode yang disediakan.
- f. Pengisian nilai pembagi kelompok “DEVIDER” pada kotak “INT(n)” dan “TRN(n)”. Nilai ini diinputkan untuk membagi range area titik dari *initiation* dan *termination* yang sudah ditentukan pada tahap sebelumnya. Sebagai contoh “INT(n)” diisi dengan nilai “2” dan “TRN(n)” dengan nilai “2” sehingga pada *initiation* dan *termination* akan muncul 3 titik *initiation* dan 3 titik *termination*. Ketelitian jarak *initiation* dan *termination* adalah 0.1. Jika suatu lereng ditentukan jarak *initiation* 5 meter dan *termination* 3 meter, dan masing-masing dibagi menjadi dua ($INT(n) = 2$ dan $TRN(n) = 2$), maka masing-masing memiliki 3 titik, dimana posisi titik *initiation* (0, 2.5, 5) dan *termination* (0, 1.5, 3).
- g. Pengisian inputan jumlah pias (*slice*) pada kotak “SLICE” secara otomatis dengan nilai interger (100). Jumlah pias ini akan bertambah dengan adanya perubahan geometri lereng maupun perubahan parameter tanah (lapisan tanah). Area lereng akan dibagi menjadi pias-pias kecil dan akan dianalisis perpias. Dari sini dapat disimpulkan jika nilai jumlah pias “SLICE” semakin banyak maka hasil analisis kelongsoran lereng menjadi lebih valid dan presisi.
- h. Pengisian inputan jumlah hasil analisis (*safety factor*) terkritis yang akan ditampilkan berdasarkan ranking indeks kelongsoran yang dapat diinputkan pada kotak “WORST” dengan nilai integer (1,2,3,4,5,...,10,...).
- i. Pengisian inputan nilai akurasi perhitungan pada kotak “ACC” dengan nilai (1 atau 0,1). Rekomendasi yang diberikan untuk nilai “ACC” adalah 0.1. Nilai 0.1 ini akan menghasilkan hasil *safty factor* yang lebih presisi meskipun membutuhkan waktu analisis yang sedikit lebih lama.

- j. Pemulaian proses analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menekan tombol “RUN FOS”. Pada saat dilakukan analisis akan ditampilkan penggambaran bidang kelongsoran secara realtime seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



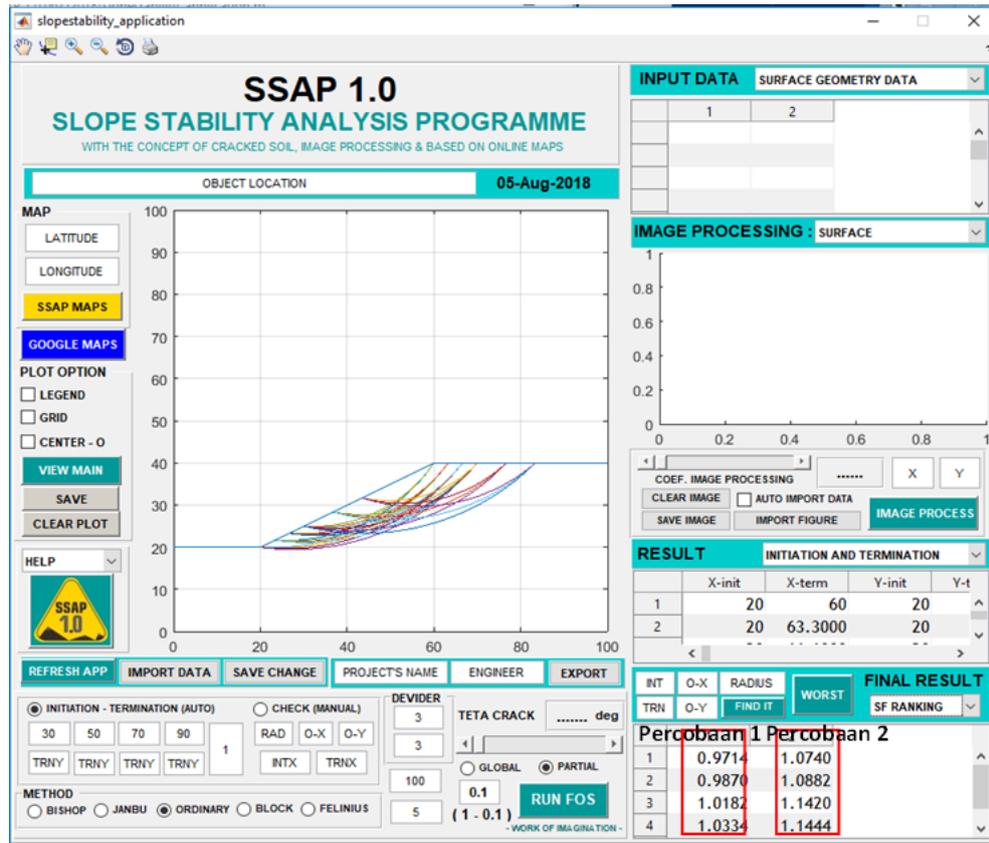
Gambar 4.4. Tampilan analisis kelongsoran lereng NSSAP 1.0

- k. Setelah proses analisis kelongsoran lereng selesai, hasil analisis dapat dilihat pada dua tampilan tabel pada area “RESULT” yang terletak pada bagian kanan bawah tampilan NSSAP 1.0 seperti terlihat pada Gambar 4.5.
- l. Penampilan hasil analisis NSSAP 1.0 dapat dilihat pada bagian “RESULT”. Pada bagian tersebut ditemukan beberapa macam data hasil analisis yang dapat dipilih pada tampilan pop-up pada tabel “RESULT” maupun “FINAL RESULT”. Tampilan “FINAL RESULT” merupakan hasil ranking berdasarkan nilai safety factor yang dihasilkan pada analisa tersebut. Jumlah ranking yang dimasukkan kedalam tabel “FINAL RESULT” oleh NSSAP 1.0 sesuai dengan nilai yang diisikan pada kotak “WORST” pada awal persiapan simulasi. Pada “FINAL RESULT” juga mempunyai fasilitas database sehingga dapat menyimpan hasil analisis dari percobaan sebelumnya atau berikutnya. Guna lebih jelasnya ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.5. Tampilan hasil analisis kelongsoran lereng NSSAP 1.0

- m. Penampilan hasil akhir simulasi kelongsoran lereng yang terkritis dilakukan dengan menekan tombol “WORST” pada area “FINAL RESULT. Hasil terkritis ditunjukkan dengan bidang kelongsoran berwarna tebal. Visualisasi dapat dilihat pada Gambar 4.7. Dari gambar tersebut terlihat bahwa bidang longsor yang berwarna merah tebal merupakan bidang longor terkritis dari seluruh percobaan kelongsoran yang dilakukan.
- n. Penampilan hasil akhir simulasi kelongsoran lereng sesuai dengan pilihan pengguna dapat dilakukan secara manual. Pengguna dapat menampilkan sebuah bidang longsor dengan menggunakan fasilitas tombol “FIND IT” dengan mengisi beberapa kotak INT, TRN, O-X,O-Y dan RADIUS pada bagian atas dan kiri pada tombol “FIND IT”. Hasil visualisasinya digambarkan dengan garis berwarna hijau tebal pada Gambar 4.8.
- o. Penyimpanan hasil data analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menekan button “EXPORT”. Hasil analisis pada tabel “RESULT” dan “FINAL RESULT” dapat tersimpat dengan format data excel (.csv).



Gambar 4.6. Tampilan hasil analisis kelongsoran lereng NSSAP 1.0 pada tabel result

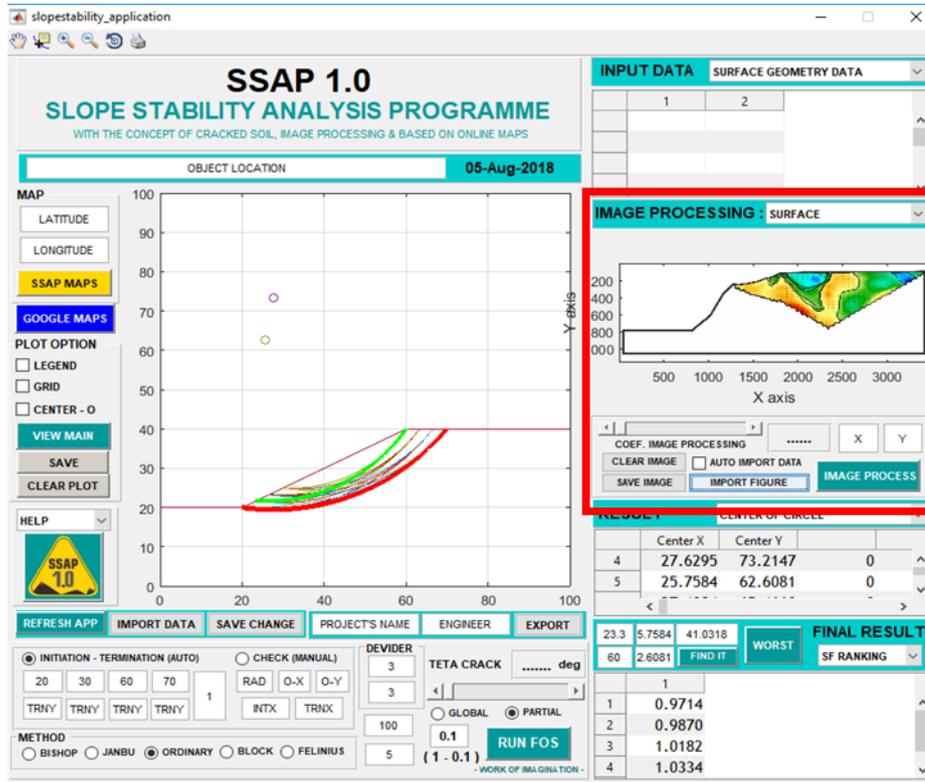
- p. Penyimpanan gambar hasil analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menekan button “SAVE” pada area “PLOT OPTION”. Dengan menekan tombol tersebut, gambar hasil simulasi akan otomatis tersimpan pada format jpeg, png, pdf atau yang lainnya sesuai pilihan pengguna.
- q. Pembersihan layar untuk memulai kembali menganalisis stabilitas lereng dilakukan dengan menekan tombol “CLEAR PLOT” pada area “PLOT OPTION”. Jika ingin melakukan analisis yang benar-benar baru misalnya dengan data yang berbeda maka semua data simulasi sebelumnya harus dihapus dengan menekan tombol “REFRESH APP” (tampilan NSSAP 1.0 akan tampil seperti tampilan awal NSSAP 1.0).

4.2.2 Cara pengoperasian NSSAP 1.0 dengan metode input data menggunakan teknologi citra digital

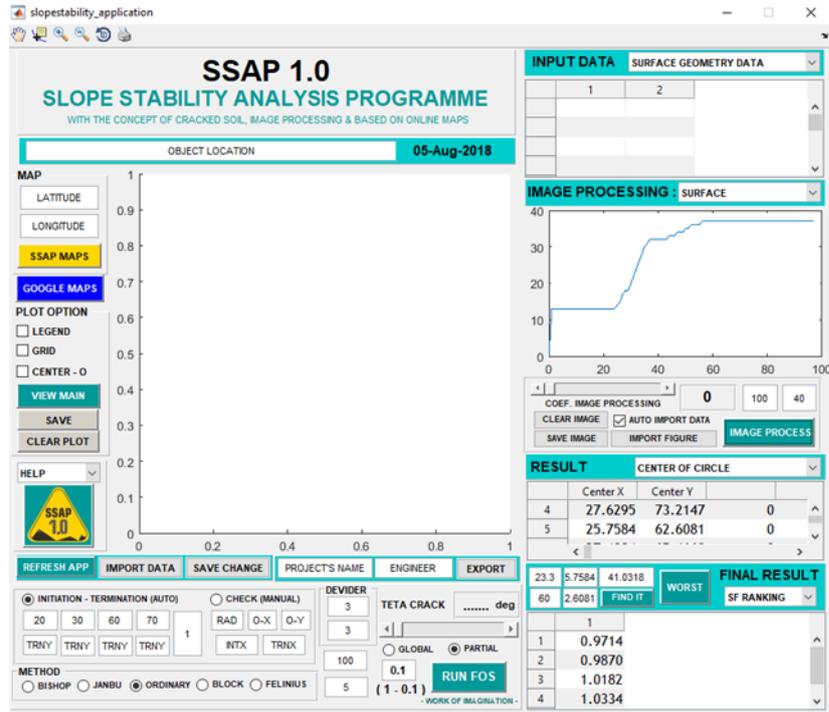
Image processing merupakan fitur unggulan pada NSSAP 1.0, karena fitur tersebut mampu memberikan kemudahan kepada pengguna untuk menginputkan data analisis pada program NSSAP 1.0. Fitur ini mampu mendeteksi geometri dan lapisan stratigrafi tanah pada lereng berdasarkan warna yang dihasilkan oleh pengujian geolistrik pada lereng tersebut. Selain itu, fitur *Image processing* pada NSSAP 1.0 ini juga mampu digunakan untuk mendeteksi posisi posisi retakan (crack) pada suatu lereng. Berikut cara penggunaan fitur *image processing* pada NSSAP 1.0 :

- a. Program Matlab 2015 diaktifkan dan selanjutnya dipilih “slope_stability.m”. Tampilan NSSAP 1.0 akan muncul seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2.
- b. Penentuan geometri lereng (surface)
 - i. Pengambilan data geolistrik (Import gambar) pada NSSAP 1.0 pada bagian “*Image processing*” yang ditunjukkan pada tampilan NSSAP 1.0 pada bagian tengah kanan dengan menekan “*Import Figure*” dan pemilihan gambar hasil geolistrik pada lokasi file penyimpanan data. Setelah proses *pengimportan* data berhasil, tampilan program akan terlihat seperti pada Gambar 4.9.
 - ii. Proses pemasukan (Input) nilai X dan Y pada kotak yang terdapat pada tampilan *image processing*, dimana nilai X merupakan nilai panjang dari lereng dan nilai Y merupakan nilai tinggi dari lereng.
 - iii. Proses *auto import data* dengan mengklik pada check box “*Auto Import Data*”, dan dilanjutkan mengklik “*Image process*” sehingga akan tampil hasil *image processing* untuk mendeteksi geometri lereng (*surface*) seperti terlihat pada Gambar 4.10.
 - iv. Proses selanjutnya adalah pengimporan data. Proses ini dilakukan dengan mengklik tombol “Import Data” dan memilih data lereng excel (csv). Setelah proses *pengimportan* data berhasil, secara otomatis gambar lereng hasil proses *image processing* akan langsung masuk ke dalam simulasi analisis. Hasil proses *image processing* dapat dilihat pada

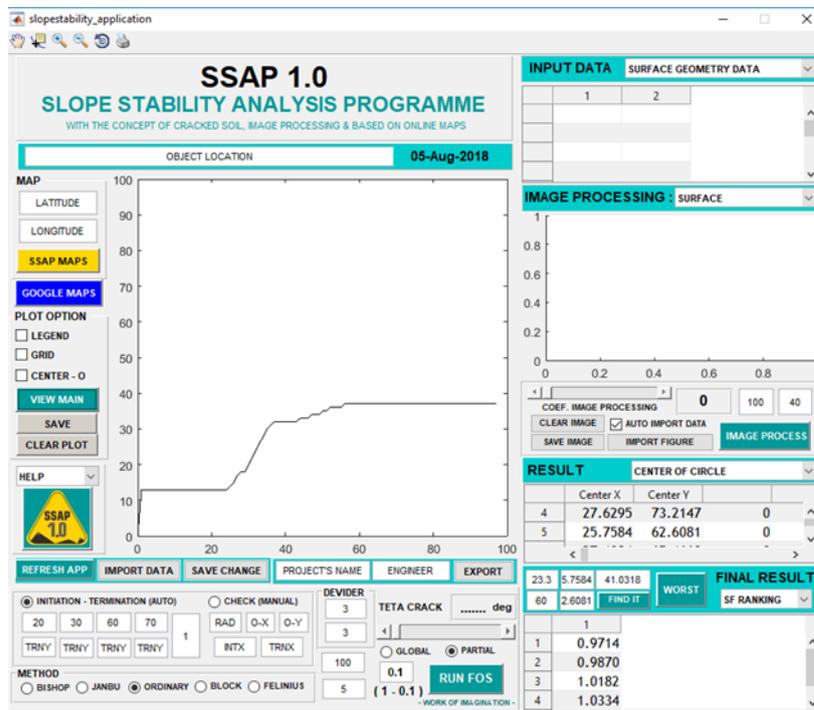
windows grafik utama dengan mengklik button “View Main”. sehingga bisa langsung dilakukan analisis tanpa mengambil data untuk menggambar lereng. Hasil penampilan pada grafik utama ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.9. Tampilan *image processing* setelah *import* gambar



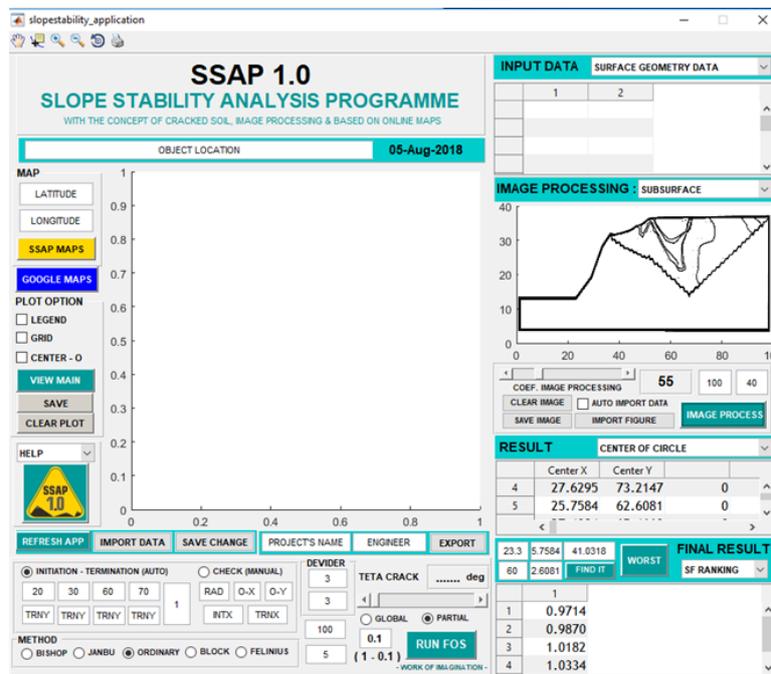
Gambar 4.10. Tampilan *image processing* setelah *image process*



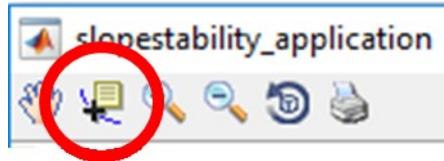
Gambar 4.11. Tampilan Import gambar dari *image processing* ke simulasi analisis utama

c. Penentuan statigrafi tanah

- i. Pemasukan (*import*) gambar dengan menekan tombol “*import figure*” dan pilih gambar lereng. Proses ini sama seperti pada proses penentuan geometri lereng yang telah dijelaskan sebelumnya.
- ii. Pemasukan (*input*) nilai axis dan ordinat, berturut-turut X dan Y.
- iii. Penggeseran nilai slider hingga bernilai ≥ 50 .
- iv. Proses penentuan statigrafi dapat dilakukan dengan menekan tombol “*Image process*” sehingga akan muncul tampilan gambar hasil deteksi lapisan pada Gambar 4.12.
- v. Pencuplikan beberapa titik pada gambar menggunakan fasilitas cuplik data. Hasil dari proses pencuplikan ini adalah nilai koordinat pada titik-titik yang dicuplik. Koordinat tersebut selanjutnya akan diinputkan pada tabel “INPUT DATA” -> “SUB SURFACE GEOMETRY DATA” pada tampilan menu pop-up. Berikut fasilitas yang digunakan untuk mencuplik data pada Gambar 4.13 hasil *image processing*.
- vi. Penyimpanan data statigrafi lereng dilakukan dengan mengklik tombol “*Save Change*”. Proses ini sekaligus untuk meng-*update* data simulasi.



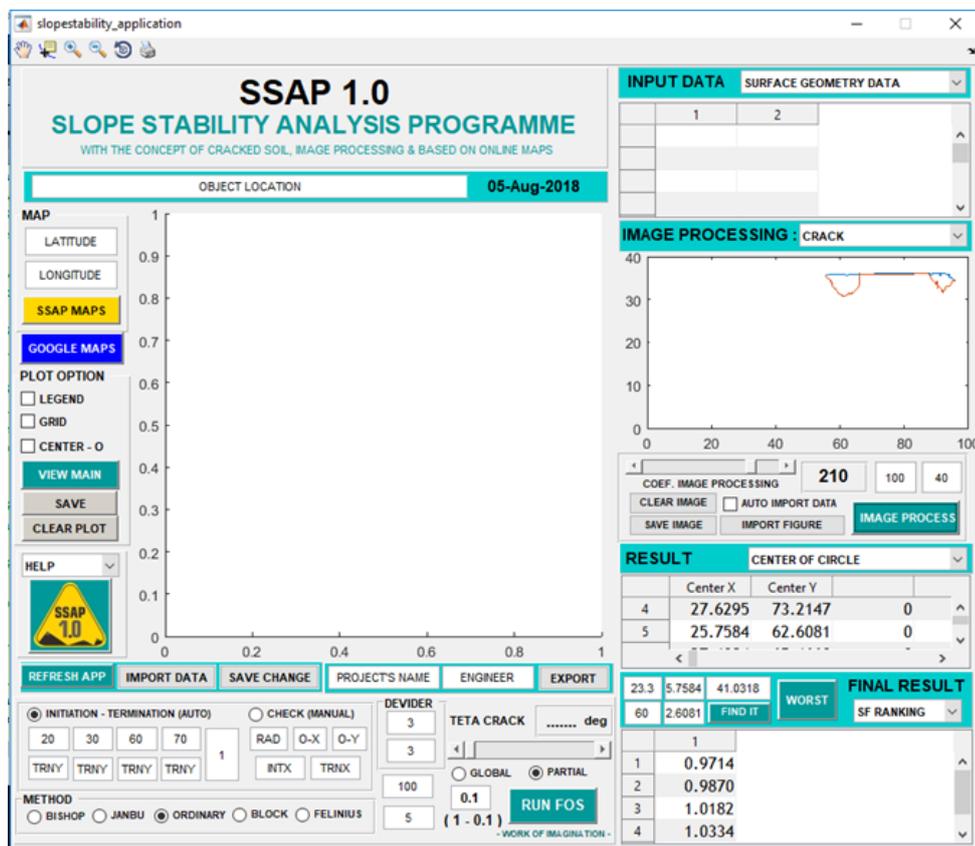
Gambar 4.12. Tampilan hasil *image processing* untuk deteksi lapisan tanah atau air



Gambar 4.13. Fasilitas tambahan NSSAP 1.0

d. Penentuan posisi retak (cracks)

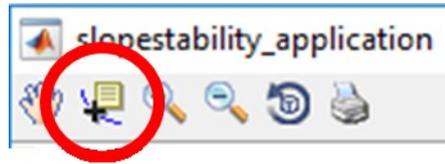
- i. Import gambar pada tombol “IMPORT FIGURE” dan pilih gambar lereng
- ii. Inputkan nilai X dan Y
- iii. Geser slider hingga bernilai ≥ 200
- iv. Tekan tombol “*IMAGE PROCESS*” sehingga akan muncul tampilan gambar hasil deteksi lapisan pada gambar, yang ditampilkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Tampilan hasil *image processing* untuk crack

- v. Pencuplikan beberapa titik pada gambar menggunakan fasilitas dan akan muncul nilai koordinat pada titik tersebut, yang selanjutnya diinputkan pada tabel “INPUT DATA” -> “CRACK GEOMETRY DATA” pada

tampilan menu pop-up. Pada Gambar 4.15 terlihat fasilitas yang digunakan untuk mencuplik data hasil *image processing*.



Gambar 4.15. Fasilitas tambahan NSSAP 1.0

- vi. Dan selanjutnya klik tombol “SAVE CHANGE” untuk meng-update data simulasi

4.3 Sistem Kerja Program NSSAP 1.0

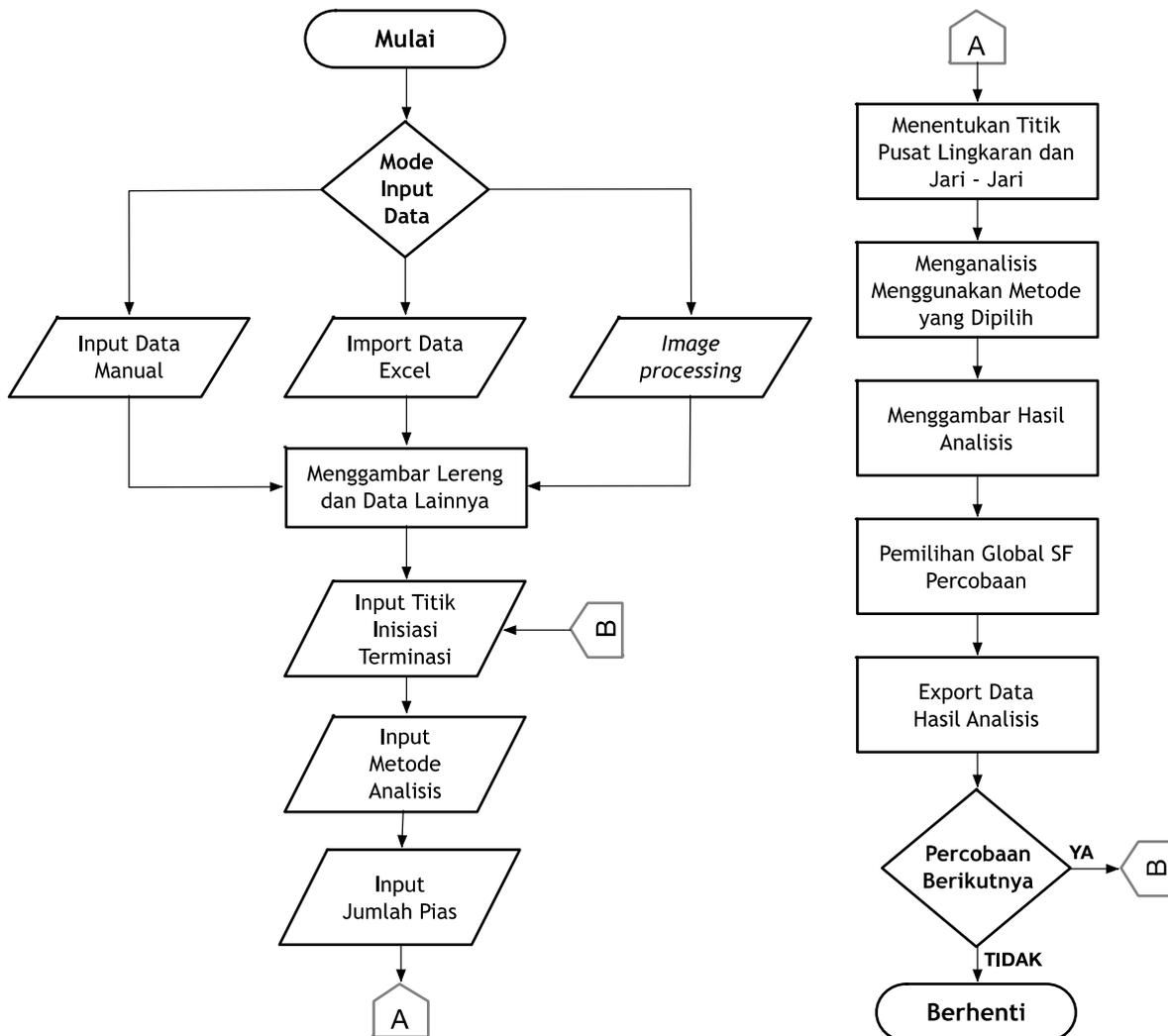
Sesuai dengan namanya, Slope Stability Analysis Program (NSSAP 1.0) digunakan untuk menganalisis keamanan suatu lereng. Hasil keluaran program NSSAP 1.0 ini berupa angka keamanan (*safety factor*). Pada sub bab ini akan dibahas alur kerja dari NSSAP 1.0 dalam menentukan *Safety Factor* (SF) dan juga akan dijelaskan mengenai teknis perhitungan NSSAP 1.0 dalam menentukan nilai SF dari sebuah lereng.

4.3.1 Penentuan angka keamanan (*safety factor*)

Langkah pertama yang harus disiapkan ketika akan menganalisis suatu lereng menggunakan program NSSAP 1.0 ini yaitu menyiapkan data-data yang diperlukan. Data-data yang diperlukan untuk menjalankan program ini dapat dilihat pada Tabel 4.1. Data geometri lereng, statigrafi tanah, dan posisi cracks dapat diinputkan dari menggunakan 3 (tiga) cara yaitu input data manual ke NSSAP 1.0, input data dengan mengimport data dari excel secara langsung, dan input data menggunakan fasilitas "*Image processing*" yang tersedia pada NSSAP 1.0. Ketiga proses penginputan ini secara garis besar dibedakan menjadi 2 (dua) cara yaitu input data secara manual dan input data secara otomatis melalui fitur *image processing*. Kedua proses ini telah dijelaskan lebih rinci pada sub bab sebelumnya.

Tabel 4.1. Data-data yang Diperlukan dalam NSSAP 1.0

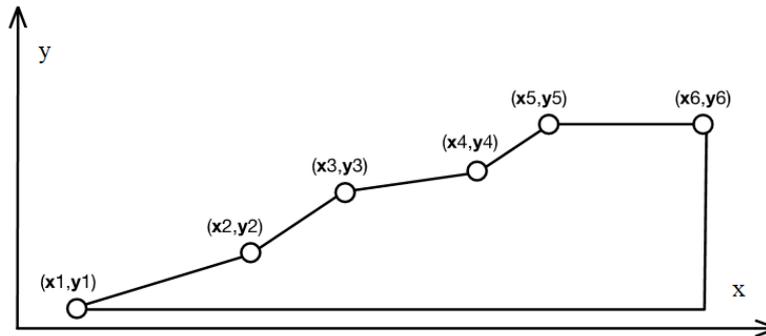
Data	Simbol Data
Data geometri lereng/Lapisan Lereng/Crack	(x,y)
Data inisiasi analisis	(x_{int1}, x_{int2})
Data terminasi analisis	(x_{trn1}, x_{trn2})
Data jumlah pias	(x_n)
Data jumlah pusat lingkaran	$(x_{c.o}, y_{c.o})$
Jari - jari kelongsoran	R
Pembagi inisiasi	(N_{int})
Pembagi Terminasi	(N_{trn})
Jumlah nilai SF terjelek	(SF_{worst})
Akurasi Perhitungan	Acc



Gambar 4.16. Diagram alir analisis stabilitas lereng menggunakan NSSAP 1.0

Penjelasan mengenai diagram alir analisis program NSSAP 1.0 yang terlihat pada Gambar 4.16 adalah sebagai berikut.

1. Penginputan data geometri lereng, statigrafi tanah, dan posisi *crack* dilakukan dengan menggambar pasangan koordinat x_i dan y_i pada titik - titik cuplik tertentu seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17.

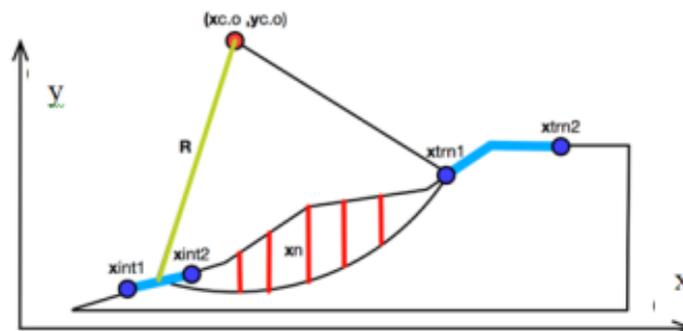


Gambar 4.17. Contoh data geometri lereng

Pada Gambar 4.17 terlihat bahwa untuk membuat suatu geometri lereng dibutuhkan beberapa titik yang kemudian akan disambung. Titik-titik koordinat pembentuk geometri lereng kemudian diplot dalam sebuah grafik, sehingga pada data perhitungan dapat ditulis sebagai berikut.

$$(x, y) = (x_1, y_1); (x_2, y_2); (x_3, y_3); (x_4, y_4); (x_5, y_5); (x_6, y_6) \quad (4.1)$$

Untuk data lapisan tanah (statigrafi) dan posisi *crack* sama seperti pemodelan data (x_i, y_i) pada geometri lereng. Pemodelan ketiga data koordinat ini nantinya dapat diimplementasikan dalam perhitungan penentuan nilai SF. Penentuan beberapa nilai inisialisasi data lainnya, yang dapat dilihat pada penjelasan Gambar 4.18.



Gambar 4.18. Beberapa data inisialisasi sebelum melakukan perhitungan SF

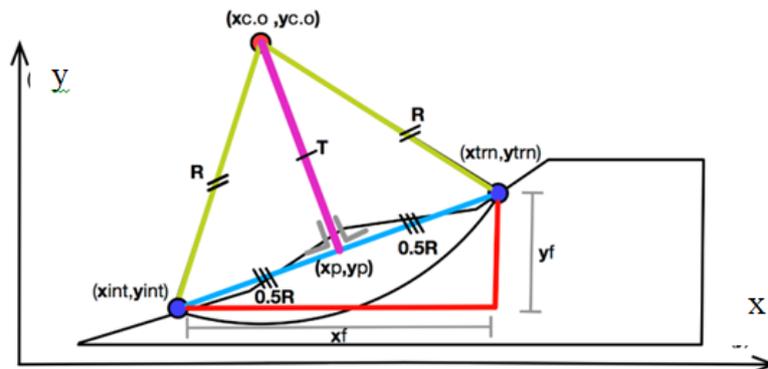
Penjelasan Gambar 4.18 adalah sebagai berikut.

- a. Titik initiation (x_{int1}, x_{int2}) dan termination (x_{trn1}, x_{trn2}) ditentukan secara *trial error* (hanya mengisi nilai x saja karena nilai y untuk masing-masing ((y_{int1}, y_{int2}) dan (y_{trn1}, y_{trn2})) akan otomatis diambil dari posisi nilai y pada surface lereng dimana nilai x dimasukan). Titik ini merupakan titik yang akan dilalui oleh bidang longsor yang biasanya letaknya berada di permukaan lereng. Penginputan awal nilai ini berupa garis (*range*) initiation (x_{int1}, x_{int2}) dan termination (x_{trn1}, x_{trn2}). Selanjutnya, nilai antara (x_{int1}, x_{int2}) dan (x_{trn1}, x_{trn2}) akan dibagi dengan nilai tertentu yakni (N_{int}) dan (N_{trn}) sehingga akan diperoleh beberapa titik inisiasi dan terminasi yang nantinya setelah dianalisis akan menghasilkan nilai angka keamanan (*safety factor*) yang berbeda-beda antara posisi initiation termination satu dengan yang lain.
 - b. Nilai x_{n-pias} merupakan jumlah pembagian pias - pias daerah longsor dengan batasan initiation dan termination yang telah ditentukan. Semakin besar jumlah pias maka akan mendukung akurasi perhitungan angka keamanan (*safety factor*) yang lebih akurat.
 - c. Nilai titik pusat lingkaran ($x_{c.o}, y_{c.o}$) dan jari - jari (R) tidak ditentukan secara acak, nilai ini tergantung dari posisi titik initiation dan termination. Setelah titik initiation dan termination ditentukan, kemudian dilakukan perhitungan nilai ($x_{c.o}, y_{c.o}$) dan (R) yang akan dibahas lebih detail pada poin berikutnya.
2. Persamaan dan konsep yang digunakan untuk menentukan titik pusat bidang longsor ($x_{c.o}, y_{c.o}$) dan jari-jari bidang longsor (R) dari posisi titik initiation dan termination yang telah ditentukan dapat dilihat pada Gambar 4.19.
- Tahapan dalam penentuan koordinat titik pusat bidang longsor ($x_{c.o}, y_{c.o}$) dan panjang jari-jari bidang longsor (R) adalah sebagai berikut.
- a. Pertama, menghitung nilai jari - jari ($x_{c.o}, y_{c.o}$) yang dapat dilihat pada gambar diatas dengan persamaan matematika sebagai berikut :

$$xf = xtrn - xint \quad (4.2)$$

$$yf = ytrn - yint \quad (4.3)$$

$$R = \sqrt{xf^2 + yf^2} \quad (4.4)$$



Gambar 4.19. Gambar pemodelan lereng dalam menentukan titik pusat bidang longsor ($x_{c.o}$, $y_{c.o}$) dan jari-jari bidang longsor (R)

- b. Kedua, menentukan nilai (x_p, y_p) yang merupakan nilai tengah dari tali busur yang ditunjukkan pada garis dengan warna biru dengan menggunakan persamaan matematika berikut :

$$x_p = \frac{1}{2}(x_{trn} + x_{int}) \quad (4.5)$$

$$y_p = \frac{1}{2}(y_{trn} + y_{int}) \quad (4.6)$$

$$T = \sqrt{R^2 - (0.5R)^2} \quad (4.7)$$

Setelah menentukan nilai R dan T maka, akan langkah selanjutnya adalah menemukan titik pusat dari lingkaran $(x_{c.o}, y_{c.o})$ yang ditunjukkan pada Gambar 4.20.

3. Penentuan nilai $(x_{c.o}, y_{c.o})$ yang merupakan nilai dari titik pusat lingkaran dengan menggunakan persamaan matematika berikut:

$$a \text{ (degree)} = 180 - 90 - \text{atan}(y_f/x_f) \quad (4.8)$$

$$b \text{ (degree)} = a \text{ (degree)} \quad (4.9)$$

$$c \text{ (degree)} = b \text{ (degree)} \quad (4.10)$$

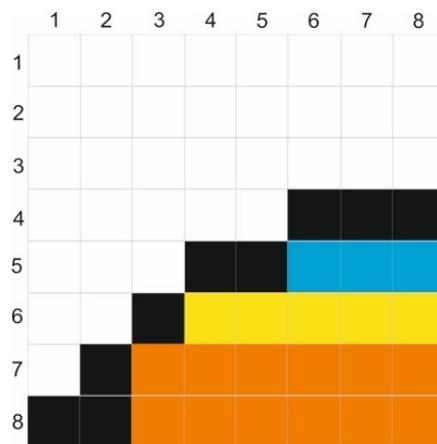
$$d \text{ (degree)} = c \text{ (degree)} \quad (4.11)$$

$$e \text{ (degree)} = 90 - d \text{ (degree)} \quad (4.12)$$

sebuah gambar dengan ukuran 64 pixel.

Diberikan sebuah gambar yang tersusun dari beberapa warna dengan ukuran 64 pixel yang ditunjukkan pada Gambar 4.21. Selanjutnya gambar tersebut diinterpretasikan ke dalam ruang warna RGB sehingga dihasilkan 3 (tiga) matrik red (W_{red}), green (W_{green}), dan blue (W_{blue}) yang merupakan kode warna penyusun gambar tersebut. Guna mempermudah pemahaman di atas diberikan contoh sebuah warna dengan ukuran 1 x 1 pixel sebagai berikut :

Putih : Red = [255], Green = [255], Blue = [255]
Hitam : Red = [0], Green = [0], Blue = [0]
Biru Muda : Red = [0], Green = [175], Blue = [18]



Gambar 4.21 Contoh ilustrasi sebuah gambar yang memiliki ukuran pixel 64

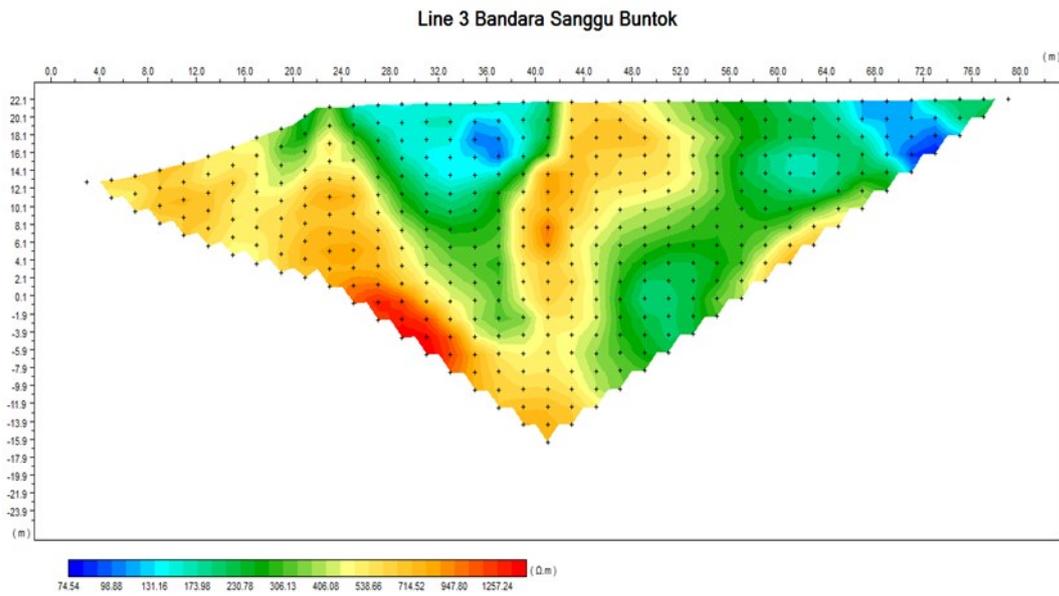
Dari contoh pada Gambar 4.21 dapat diketahui bahwa sebuah warna dalam ruang warna RGB tersusun atas 3 (tiga) kode warna dasar red, green, blue dan ukuran matrik tersebut sama dengan ukuran pixel gambar tersebut. Semakin besar nilai sebuah kode warna dalam red, green, dan blue akan membuat warna cenderung lebih pudar dan cenderung mengarah ke warna putih dan sebaliknya semakin kecil nilai kode warna akan membuat warna cenderung gelap dan mengarah ke warna hitam. Jika gambar pada Gambar 4.21 dengan ukuran 64 pixel diinterpretasikan dalam ruang warna RGB maka diperoleh tiga matrik red, green dan blue adalah sebagai berikut:

$$W_{red} = \begin{bmatrix} 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 0 & 0 & 0 \\ 255 & 255 & 255 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 255 & 255 & 0 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 0 & 245 & 245 & 245 & 245 & 245 & 245 \\ 0 & 0 & 245 & 245 & 245 & 245 & 245 & 245 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

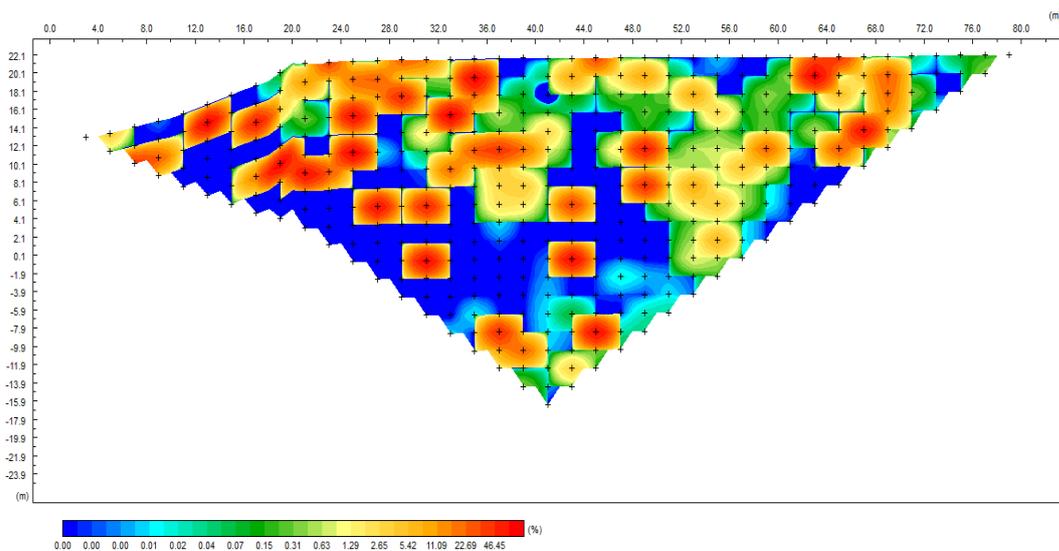
$$W_{green} = \begin{bmatrix} 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 0 & 0 & 0 \\ 255 & 255 & 255 & 0 & 0 & 175 & 175 & 175 \\ 255 & 255 & 0 & 242 & 242 & 242 & 242 & 242 \\ 255 & 0 & 134 & 134 & 134 & 134 & 134 & 134 \\ 0 & 0 & 134 & 134 & 134 & 134 & 134 & 134 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$W_{blue} = \begin{bmatrix} 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 255 & 255 & 255 & 255 & 0 & 0 & 0 \\ 255 & 255 & 255 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 255 & 255 & 0 & 255 & 255 & 255 & 255 & 255 \\ 255 & 0 & 52 & 52 & 52 & 52 & 52 & 52 \\ 0 & 0 & 52 & 52 & 52 & 52 & 52 & 52 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Penjelasan sistem kerja *image processing* pada program ini menggunakan data keluaran hasil survey geolistrik. Data tersebut adalah data resistivity tomografi dan induksi polarisasi. Nilai resistivity tomografi (TR) dan nilai induksi polarisasi (IP) telah dijelaskan detail pada Bab sebelumnya. Contoh hasil survey geolistrik dapat dilihat pada Gambar 4.22 dan Gambar 4.23. Resistivity tomografi pada Gambar 4.22 memberikan informasi bahwa daerah yang berwarna biru memiliki konsentrasi air yang lebih tinggi dan sebaliknya daerah yang berwarna merah memiliki konsentrasi air yang lebih rendah sesuai dengan skala warna yang ditunjukkan pada bagian bawah gambar tersebut. Induced polarization pada Gambar 4.23 menginformasikan bahwa daerah yang berwarna merah telah mengalami retak dan daerah berwarna biru masih cukup padat (tidak mengalami retak). Kedua data inilah yang akan diolah menggunakan teknologi citra digital pada penelitian ini.



Gambar 4.22. Hasil survey geolistrik 2 dimensi Tomografi Resistivity (TR) (Alexsander, S., dkk., 2017)

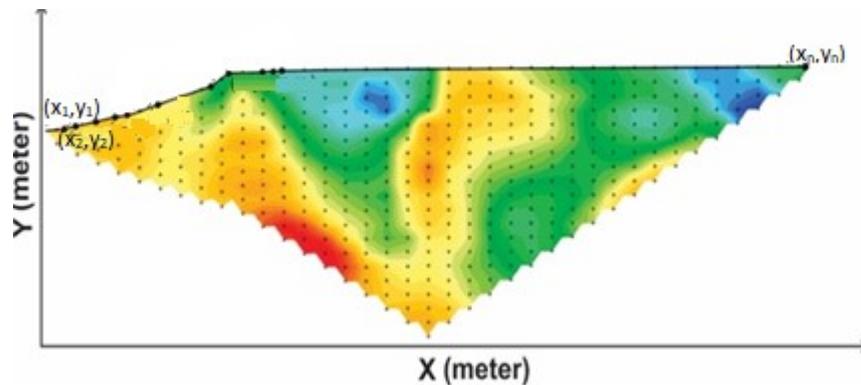


Gambar 4.23. Hasil Survey Geolistrik 2 dimensi Induced Polarization (IP) (Alexsander, S., dkk., 2017)

4.3.3 Penentuan geometri lereng

Pemodelan geometri lereng dapat dibentuk dari beberapa titik (x_n, y_n) yang selanjutnya antara titik tersebut dihubungkan dengan sebuah garis lurus seperti yang terlihat pada Gambar 4.24. Dari pemodelan tersebut diperoleh pasangan koordinat (x, y) sebagai berikut.

$$(x,y) = (x_1,y_1);(x_2,y_2)...(x_n,y_n) \quad (4.20)$$



Gambar 4.24. Model hasil data uji geolistrik dan input data teknik pengolahan citra

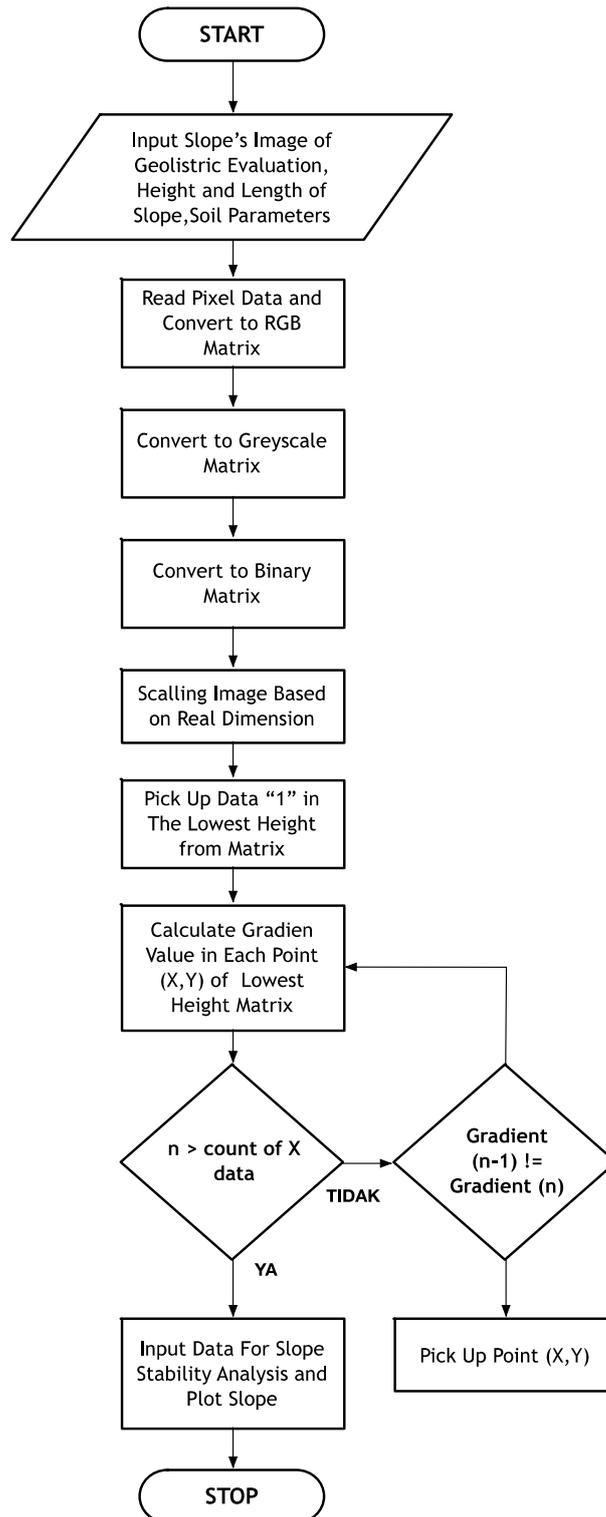
Tahapan pengolahan data geolistrik menggunakan teknologi citra digital untuk mendapatkan geometri lereng dapat dilihat pada Gambar 4.25. Penjelasan terkait tahapan pengolahan citra digital pada Gambar 4.25 dapat diuraikan sebagai berikut :

- Penginputan gambar hasil data uji geolistrik. Pada tahap ini dilakukan penskalaan panjang dan tinggi gambar hasil geolistrik terhadap ukuran nyata lereng di lapangan.
- Pembacaan data pixel dari gambar hasil data uji geolistrik dalam ruang warna RGB. Jika menggunakan contoh pada Gambar 4.21 maka diperoleh matrik seperti pada Persamaan 4.17 s.d 4.19.
- Pengkonversian tiga matrik *red*, *green*, dan *blue* ke dalam bentuk satu matrik *greyscale* dengan Persamaan 4.21.

$$[Grey] = 0.2989 \times [Red] + 0.5870 \times [Green] + 0.1140 \times [Blue] \quad [10] \quad (4.21)$$

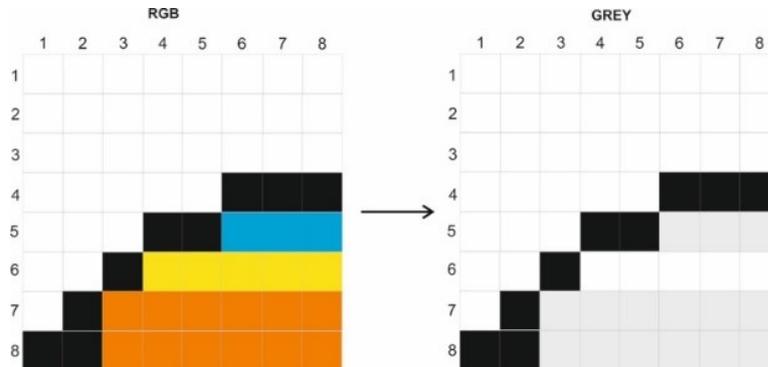
Hasil operasi perkalian matrik W_{red} , W_{green} , W_{blue} dengan Persamaan 4.21 berupa matrik W_{grey} .

$$W_{grey} = \begin{bmatrix} 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 \\ 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 \\ 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 254 \\ 254 & 254 & 254 & 254 & 254 & 0 & 0 & 0 \\ 254 & 254 & 254 & 0 & 0 & 104 & 104 & 104 \\ 254 & 254 & 0 & 247 & 247 & 247 & 247 & 247 \\ 254 & 0 & 160 & 160 & 160 & 160 & 160 & 160 \\ 0 & 0 & 160 & 160 & 160 & 160 & 160 & 160 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$



Gambar 4.25. Diagram alir untuk memperoleh data geomteri lereng dari sebuah hasil uji geolistrik

Dari matrik di atas akan diperoleh warna pixel baru (grey) seperti ditampilkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26. Perbandingan gambar RGB dan GREY

d. Pengkonversian matrik *grey* ke dalam bentuk matrik *binary* dengan persamaan sebagai berikut :

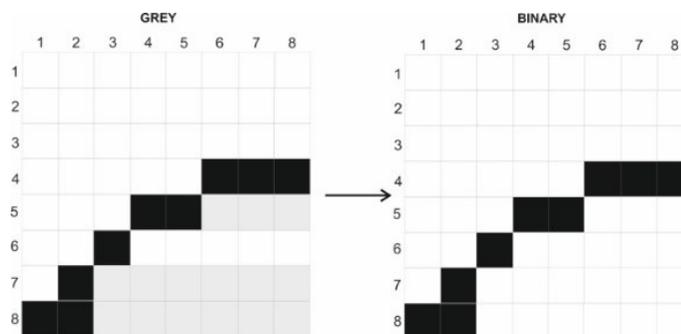
$$\text{jika } \text{grey}(n,n) < 1 \text{ maka } \text{grey}(n,n) = 0 \quad (4.23)$$

$$\text{jika } \text{grey}(n,n) \geq 1 \text{ maka } \text{grey}(n,n) = 1 \quad (4.24)$$

Dengan menggunakan Persamaan (4.23) dan (4.24) dihasilkan matrik *binary* (W_{binary}).

$$W_{\text{binary}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Hasil akhir gambar dari *grey* ke *binary* ditunjukkan pada Gambar 4.27. Perbandingan gambar *grey* dan *binary* 4.27.



Gambar 4.27. Perbandingan gambar grey dan binary

- e. Perkalian ukuran pixel gambar dengan panjang dan tinggi sesungguhnya menghasilkan ukuran pixel yang mewakili ukuran sebenarnya. Jika pada contoh ini, diberikan ukuran sebenarnya 80 m x 80 m maka 10 m/pixel untuk ukuran setiap pixelnya.
- f. Pengambilan data posisi (x,y) yaitu nilai '0' pada matrik W_{binary} pada setiap kolom dan memilih nilai '0' dengan posisi teratas atau dengan posisi nilai (y) yang paling kecil pada setiap kolomnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada visualisasi Persamaan (4.26) untuk nilai '0' yang terpilih dan ditanda dengan warna hijau.

$$W_{binary} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Dari Persamaan (4.26) dapat dilihat nilai '0' yang terpilih. Langkah selanjutnya yaitu mengambil data posisi (x,y) dari nilai '0' yang terpilih pada matrik W_{binary} . Hasil daftar posisi nilai '0' yang terpilih adalah matrik 1 baris [X] dan [Y] sebagai berikut :

$$[X] = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8] \quad (4.27)$$

$$[Y] = [8 \ 7 \ 6 \ 5 \ 5 \ 4 \ 4 \ 4] \quad (4.28)$$

Agar sesuai dengan kaidah kurva $x - y$, matrik 1 baris [X] dan [Y] perlu dilakukan konversi dengan persamaan berikut :

$$x_{baru} = x(1, n) - 1 \quad (4.29)$$

$$y_{baru} = \max \text{ pixel}_y - y(1, n) \quad (4.30)$$

dimana :

n = elemen ke - i

Hasil matrik 1 baris [X_{baru}] dan [Y_{baru}] adalah sebagai berikut :

$$[X_{baru}] = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7] \quad (4.31)$$

$$[Y_{baru}] = [0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 4 \ 4 \ 4] \quad (4.32)$$

- g. Perhitungan nilai gradien dari setiap posisi yang ditunjukkan pada Persamaan (4.33) dan (4.34) dengan menggunakan persamaan berikut :

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (4.33)$$

Dari Persamaan (4.35) diperoleh hasil gradien seperti berikut.

$$[M] = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (4.34)$$

- h. Penyeleksian posisi yang ditunjukkan pada Persamaan (4.31) dan (4.32) berdasarkan nilai matrik satu baris $[M]$ dengan syarat sebagai berikut.

$$(x_{\text{terpilih}}, y_{\text{terpilih}}) \text{ jika } m(n) \neq m(n+1) \quad (4.35)$$

Artinya yaitu, nilai (x,y) merupakan nilai $(x_{\text{terpilih}}, y_{\text{terpilih}})$ jika nilai gradient ke- n tidak sama dengan nilai gradient setelahnya atau $(n+1)$.

Dari Matrik $[M]$ dan persamaan (4.35) didapatkan matrik 1 baris $[M_{\text{terpilih}}]$ serta matrik 1 baris $[X_{\text{terpilih}}]$ dan $[Y_{\text{terpilih}}]$ yang merupakan titik cuplik (pada tahap ini tidak perlu semua titik (x,y) dimasukkan). Hasil seleksi ditunjukkan pada persamaan matrik berikut :

$$[M_{\text{terpilih}}] = [1 \ 1 \ 0 \ 1] \quad (4.36)$$

$$[X_{\text{terpilih}}] = [0 \ 3 \ 4 \ 5] \quad (4.37)$$

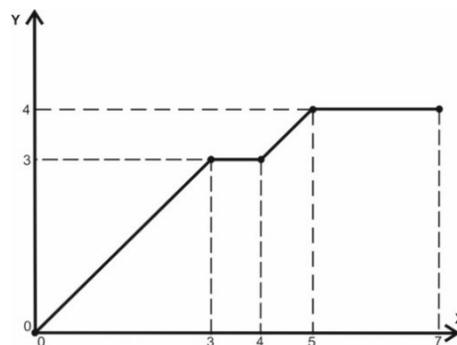
$$[Y_{\text{terpilih}}] = [0 \ 3 \ 3 \ 4] \quad (4.38)$$

- i. Tahapan akhir yaitu menambahkan posisi titik terakhir dari matriks pada $[X_{\text{terpilih}}]$ dan $[Y_{\text{terpilih}}]$ yakni $x_{\text{akhir}} = 7$ dan $y_{\text{akhir}} = 4$ pada persamaan $[X_{\text{terpilih}}]$ dan y_{terpilih} sehingga diperoleh matrik $[X_{\text{terpilih baru}}]$ dan $y_{\text{terpilih baru}}$ sebagai berikut :

$$[X_{\text{terpilih baru}}] = [0 \ 3 \ 4 \ 5 \ 7] \quad (4.39)$$

$$[Y_{\text{terpilih baru}}] = [0 \ 3 \ 3 \ 4 \ 4] \quad (4.40)$$

Setelah memperoleh $x_{\text{terpilih baru}}$ dan $y_{\text{terpilih baru}}$, maka dilakukan plotting sesuai Persamaan (4.41) dan (4.42). Hasil plotting dapat dilihat pada Gambar 4.28.



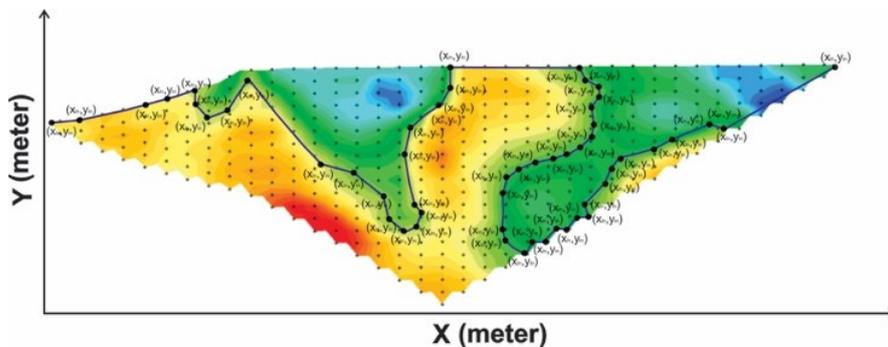
Gambar 4.28. Plotting kurva dari persamaan $(x_{\text{terpilih baru}}, y_{\text{terpilih baru}})$

Dari semua tahap yang telah dijelaskan terlihat bahwa pengambilan data geometri lereng dari hasil geolistrik dapat beroperasi secara otomatis dan pengguna dapat langsung diberikan data geometri lereng dalam bentuk kurva (x,y) sehingga dapat langsung dieksekusi oleh program analisis stabilitas lereng.

4.3.4 Penentuan stratigrafi tanah

Untuk penentuan stratigrafi tanah diperlukan data Tomografi Resistivity (TR) seperti terlihat pada Gambar 4.29. Pada Gambar 4.29 terlihat sebuah garis serta beberapa titik cuplik pada perbatasan area berwarna hijau dan kuning. Titik cuplik itu yang akan digunakan untuk mendeteksi adanya perbedaan parameter tanah (lapisan tanah). Hasil ini nantinya sebelum disimulasikan pada program stabilitas tanah harus dibandingkan dengan data bor tanah. Persamaan pada pemodelan permukaan lereng juga berlaku untuk memodelkan lapisan tanah pada Gambar 4.29 (ditulis dengan (x_{ln}, y_{ln})). Hasil model pasangan koordinat (x,y) sebagai berikut.

$$(x,y) = (x_{t1}, y_{t1}); (x_{t2}, y_{t2}) \dots (x_{tn}, y_{tn}) \quad (4.41)$$



Gambar 4.29. Model data yang diperlukan untuk pemodelan lapisan tanah pada lereng berdasarkan hasil data TR

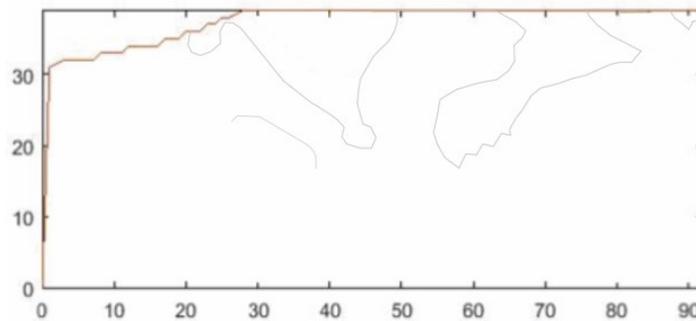
Pemodelan lapisan tanah pada suatu lereng juga menggunakan algoritma yang hampir sama dengan algoritma geometri lereng, yakni mendeteksi garis hitam, karena pada setiap lapisan tanah pada hasil uji geolistrik dapat dipilih tampilan pemisah gradasi warna dengan sebuah garis hitam. Berikut algoritma yang digunakan :

1. Pencuplikan data titik yang mewakili bentuk dari lapisan tanah dilakukan secara manual dengan menggunakan *tools* cuplik sehingga dapat diketahui titik (x,y) dari titik cuplik tersebut. Metode pencuplikan sengaja dipilih agar penentuan statigrafi tanah dapat disesuaikan dengan data bor tanah.
2. Pemasukan titik cuplik (x,y) kedalam matriks satu baris berikut :

$$[x_{subsoil}] = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7] \quad (4.41)$$

$$[y_{subsoil}] = [y_0 \ y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7] \quad (4.42)$$

3. Setelah diperoleh matrik $[x_{subsoil}]$ dan $[y_{subsoil}]$, hasil matrik dapat di-*plotting* pada kurva (x-y) bersama data geometri lereng, seperti terlihat pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30. Hasil penentuan statigrafi tanah

4.3.5 Penentuan posisi *cracks*

Dalam penentuan area retakan (*cracks*) diperlukan data Tomografi Resistivity (TR) dan Induced Polarization (IP) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.22 dan Gambar 4.23. Kedua data tersebut selanjutnya akan dilakukan proses *intersection*. Visualisasi proses *intersection* ditunjukkan pada Gambar 4.31.

Proses untuk menentukan algoritma dalam rangka mengambil data *cracks* ditunjukkan pada diagram alir pada Gambar 4.32.

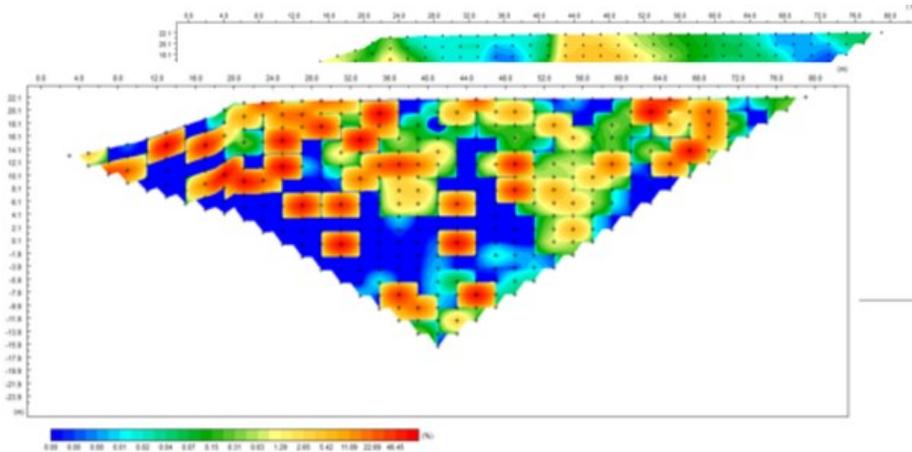
Pembacaan data (TR)

1. Penginputan data gambar hasil uji geolistrik (Gambar 4.22);
2. Penginterpretasian gambar kedalam tiga matrik (RGB);
3. Pendeteksian warna dengan intensitas biru pada gambar untuk setiap pixel yang berfungsi membedakan warna biru dengan warna lain, sehingga diberikan intensitas warna biru ≥ 202 (angka 202 diperoleh dari hasil tuning untuk

menyeleksi warna biru). Untuk menentukan bahwa warna tersebut adalah warna biru digunakan persamaan berikut :

jika $blue(n,m) \leq 202$ (Intensitas kebiruan)

maka $red(n,m), green(n,m), blue(n,m) = 255$ (4.43)



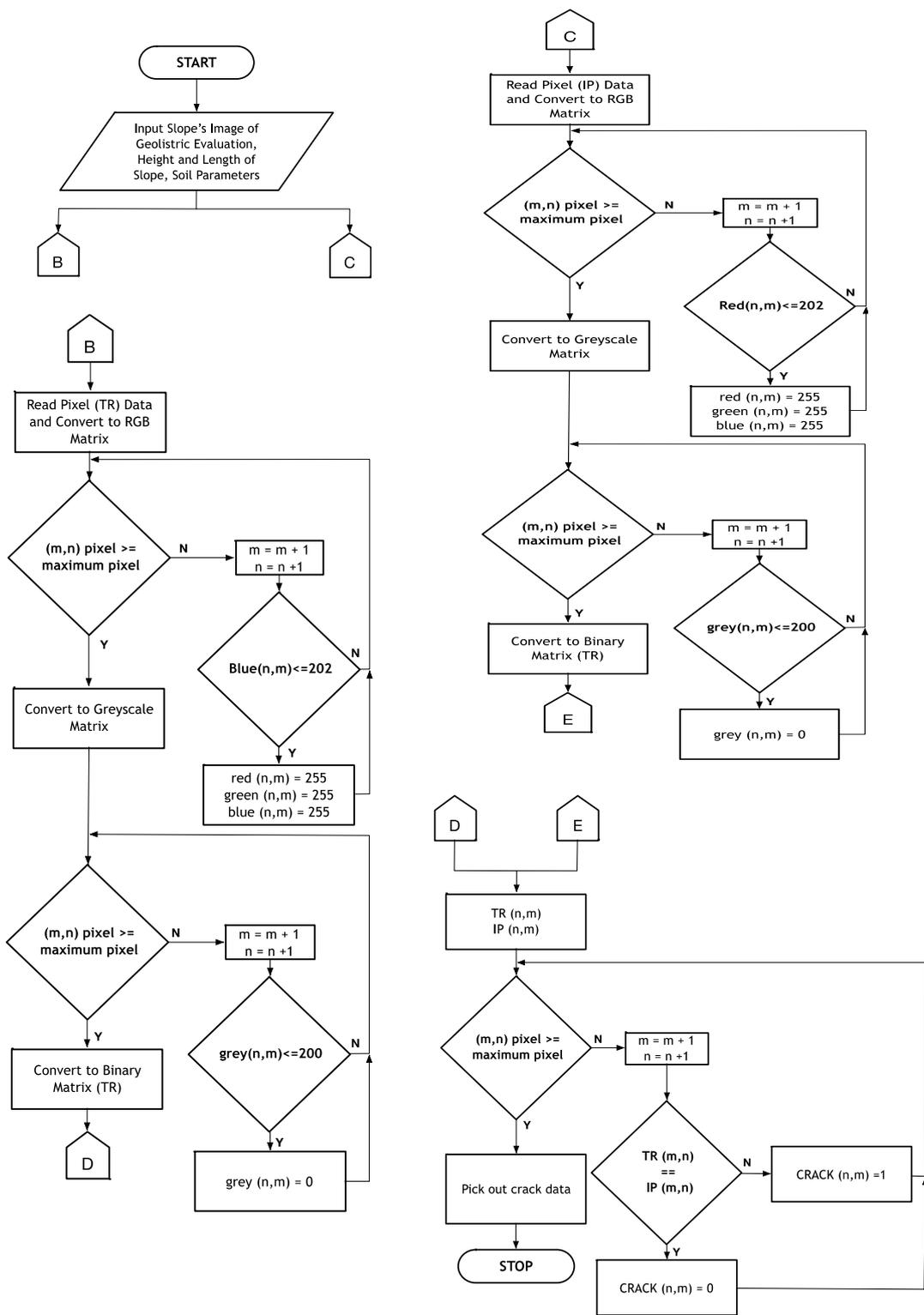
Gambar 4.31. Proses intersection pada area yang berwarna biru pada (TR) dan (IP)

Hasil dari eksekusi Persamaan (4.43) dapat dilihat pada Gambar 4.33. Dari Gambar 4.33 terlihat yang terseleksi adalah zona berwarna biru saja yang mengartikan bahwa di daerah tersebut memiliki kandungan air yang cukup tinggi.

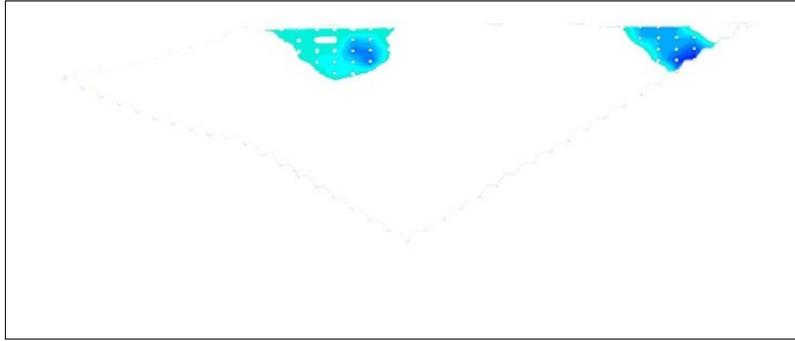
4. Pengkonversian RGB ke dalam bentuk *grayscale*
5. Pendeteksian intensitas warna abu - abu terpekat pada gambar untuk setiap pixel yang berfungsi membedakan warna abu - abu terang dengan abu - abu pekat bahkan mendekati hitam. Hal ini bertujuan untuk mengambil warna biru berintensitas yang tinggi sehingga diambil intensitas keabu - abuan ≥ 200 dengan menggunakan persamaan berikut :

jika $grey(n,m) \leq 200$ (Intensitas keabuan) maka $grey(n,m) = 0$ (4.44)

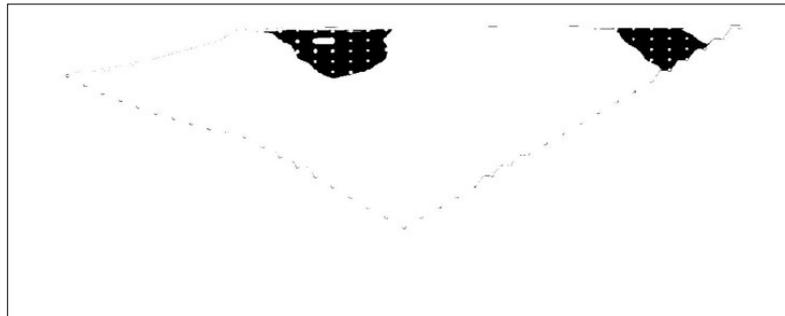
6. Pengkonversian matrik *grey* ke dalam bentuk matrik *binary* akan diperoleh hasil akhir yang ditunjukkan pada
7. Gambar 4.34.



Gambar 4.32. Diagram alir deteksi cracks data (TR) dan (IP) dari hasil uji geolistrik



Gambar 4.33. Hasil data gambar setelah melewati seleksi warna intensitas biru



Gambar 4.34 Hasil akhir data gambar deteksi warna biru

Pembacaan data (IP) :

1. Penginputan data gambar hasil uji geolistrik untuk data IP (Gambar 4.23);
2. Penginterpretasikan gambar kedalam tiga matrik (RGB);
3. Pendeteksian intensitas warna merah pada gambar untuk setiap pixel yang berfungsi membedakan warna merah dengan warna lain, sehingga diambil intensitas warna merah yang paling tinggi ≥ 202 dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} &\text{jika } red(n,m) \leq 202 \text{ (Intensitas kemerahan)} \\ &\text{maka } red(n,m), green(n,m), blue(n,m) = 255 \end{aligned} \quad (4.45)$$

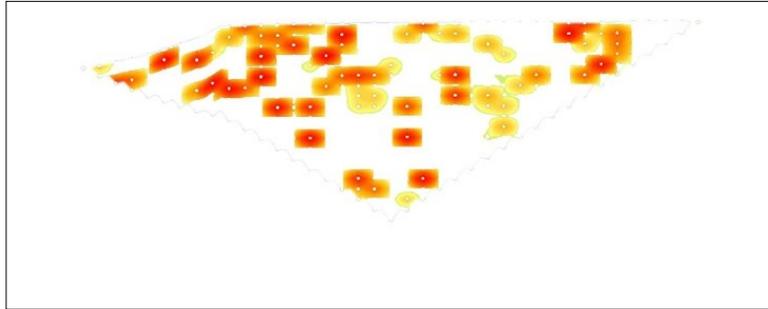
Hasil dari eksekusi persamaan di atas dapat dilihat pada Gambar 4.35.

4. Pengkonversian RGB ke dalam bentuk *grayscale*
5. Pendeteksian intensitas warna abu - abu terpekat pada gambar untuk setiap pixel yang berfungsi membedakan warna abu - abu terang dengan abu - abu pekat bahkan mendekati hitam. Hal ini bertujuan untuk mengambil warna abu - abu berintensitas yang tinggi dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\text{jika } grey(n,m) \leq 200 \text{ (Intensitas keabuan)}$$

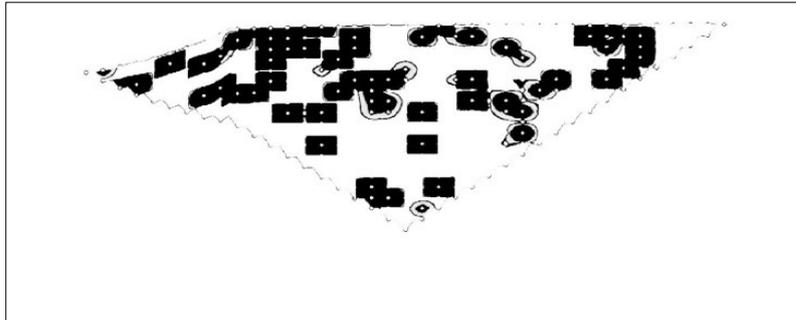
maka

$$\text{grey}(n,m) = 0 \quad (4.46)$$



Gambar 4.35. Hasil data gambar setelah melewati seleksi warna kemerahan

6. Pengkonversian matrik *grey* ke dalam bentuk matrik *binary* dan diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4.36.



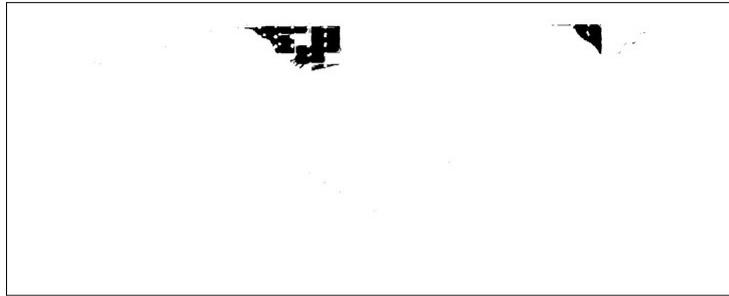
Gambar 4.36. Hasil akhir data gambar deteksi warna merah

Intersection antara warna biru (TR) dan warna merah (IP) untuk menemukan posisi *cracks* dilakukan dengan cara sebagai berikut.

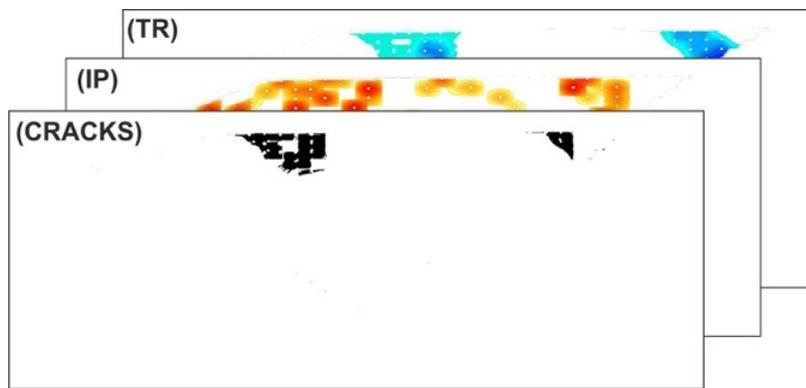
1. Diterapkan syarat deteksi *cracks* seperti yang ditunjukkan pada persamaan sebelumnya sehingga diperoleh hasil gambar *cracks* yang ditunjukkan pada Gambar 4.37.
2. $\text{Zona crack} = \text{irisian antara TR dan IP}$ (4.47)

Visualisasi proses *intersection* ditunjukkan pada Gambar 4.38. Hasil crack merupakan hasil perpotongan bidang antara TR dengan IP.

3. Pencuplikan data area cracks ke dalam bentuk persamaan matrik dilakukan secara manual dengan alat bantu picker yang sudah tersedia pada program sehingga ketika di klik pada sebuah titik akan muncul titik koordinat (x,y) dan dimasukkan kedalam persamaan area cracks (Persamaan 4.48 – 4.51).



Gambar 4.37. Gambar area cracks yang terdeteksi



Gambar 4.38. Visualisasi proses intersection dan hasil dari area cracks yang terdeteksi

line 1

$$x_c = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7] \quad (4.48)$$

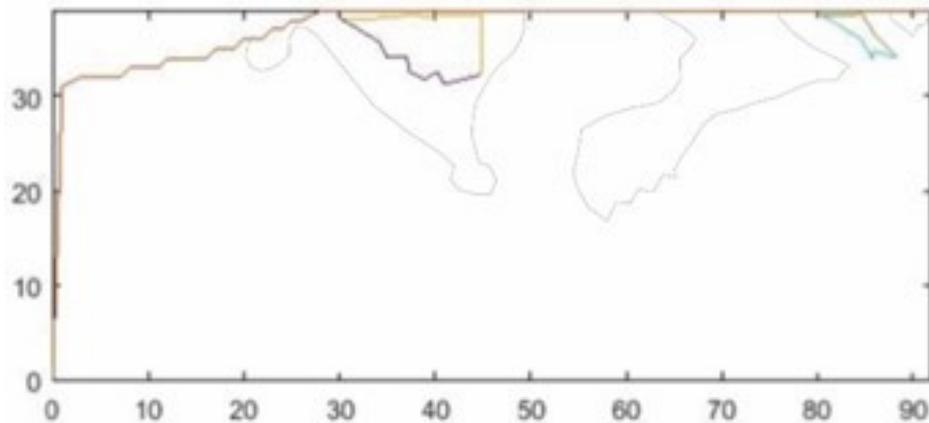
$$y_c = [y_0 \ y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7] \quad (4.49)$$

line 2

$$x_c = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7] \quad (4.50)$$

$$y_c = [y_0 \ y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5 \ y_6 \ y_7] \quad (4.51)$$

Selanjutnya, diperoleh data persamaan untuk *line 1* dan *line 2* untuk menggambar bidang *cracks*. Dari data tersebut sudah dapat di plotting sehingga diperoleh visualisasi area *cracks*. Dari data di atas, selanjutnya dilakukan pengolahan menggunakan algoritma dan teknik pengolahan citra yang telah dipaparkan di atas sehingga diperoleh hasil pengolahan citra dari program seperti diberikan pada Gambar 4.39.



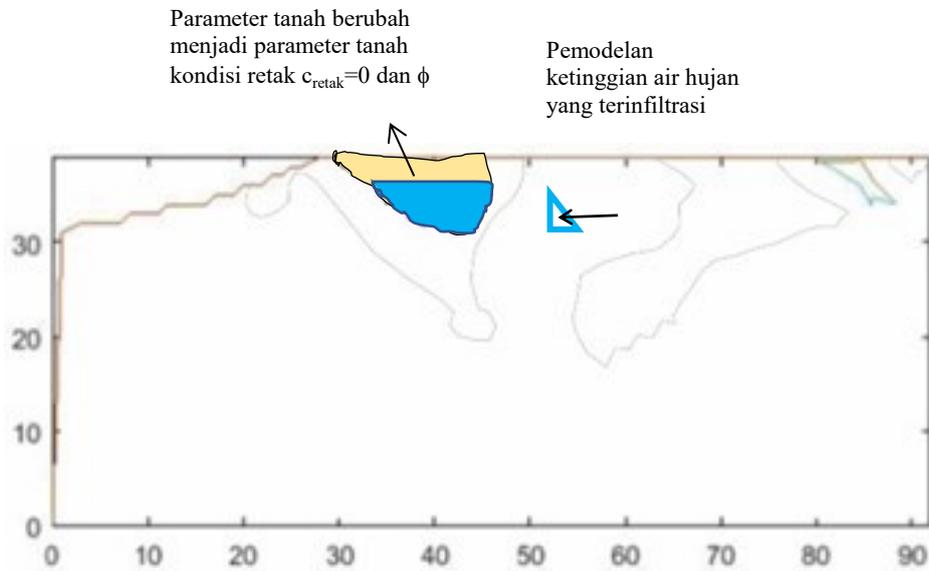
Gambar 4.39. Hasil luaran program dengan data lapangan

4.3.6 Penerapan konsep baru *cracked soil*

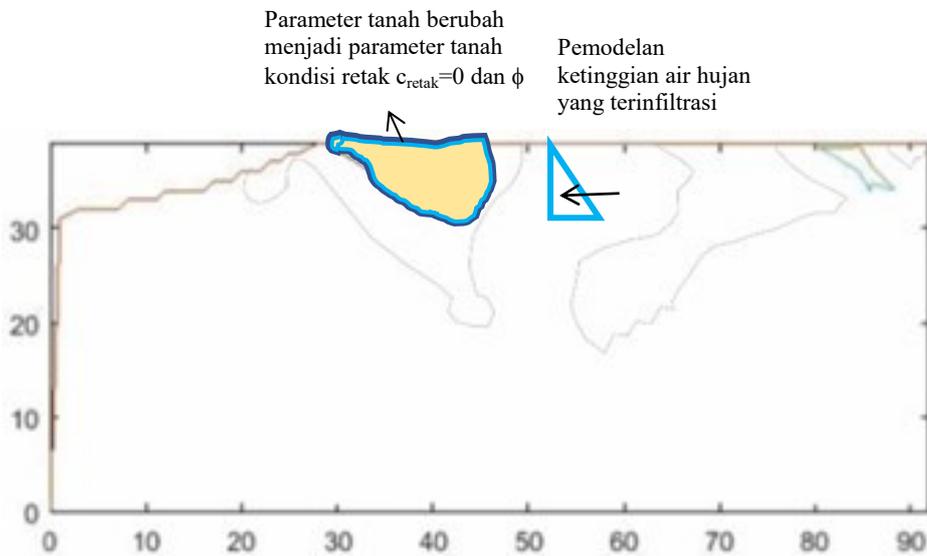
Untuk posisi retakan digambar sesuai dengan posisi retakan di lapangan hasil geolistrik. Dalam penelitian ini data didapatkan dari hasil peneliti lain (Alexsander dkk., 2016). Retakan ini dapat berupa retakan tunggal atau retakan acak tidak terpola yang merupakan suatu sistem retak. Selain dijadikan sebagai bidang lemah (cikal bakal bidang longsor), perilaku retakan berbeda dengan perilaku tanah utuh, yaitu

- a. Tanah yang retak mengalami *behaving like sand*, yaitu tanah berperilaku seperti pasir, dimana $c = 0$ dan parameter geser tanah pada bidang retak tidak lagi sama dengan parameter tanah utuh, yaitu $\phi_{\text{retak}} \neq \phi$ dan $c_{\text{retak}} \neq c = 0$. Parameter geser kondisi retak didapatkan dari uji tanah menggunakan alat uji geser modifikasi yang telah dikembangkan oleh Hutagamissufardal dkk., (2012, 2017, dan 2018) serta Mochtar dan Hutagamissufardal (2016).
- b. Pada tanah yang retak mengalami *pore water pressure build up* sedangkan pada tanah yang utuh tidak mengalami hal tersebut. *Pore water pressure build up* dilakukan dengan memodelkan lereng yang retak dalam kondisi terisi air. Tinggi air dalam retakan dapat disimulasi secara manual untuk selanjutnya didapatkan kondisi kritis dari lereng tersebut. Retakan dijadikan sebagai cikal bakal kelongsoran. Contoh pemodelan dapat dilihat pada Gambar 4.40 dan Gambar 4.41 untuk entry data menggunakan data

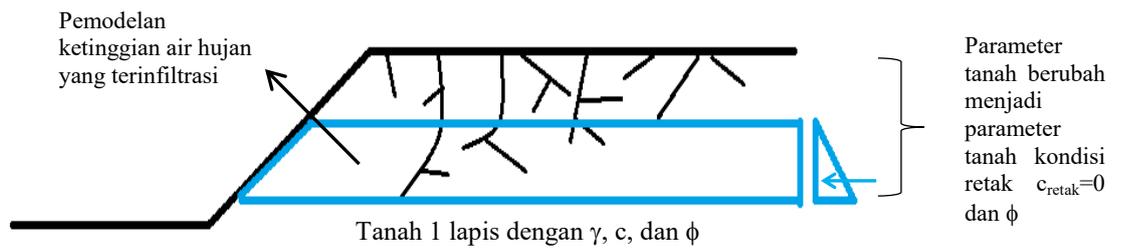
geolistrik serta Gambar 4.42 dan Gambar 4.43 untuk entry data secara manual.



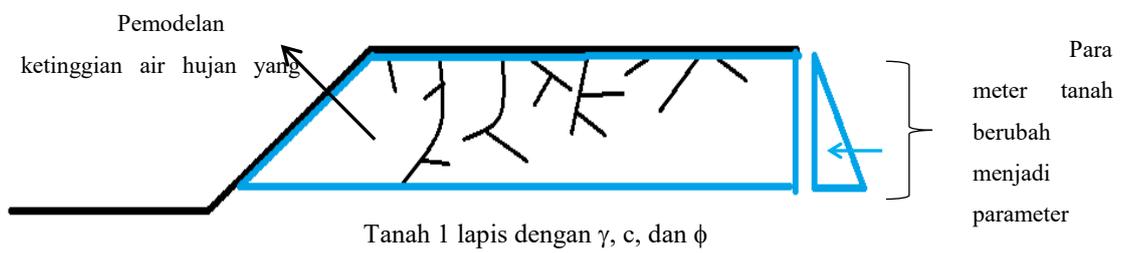
Gambar 4.40. Pemodelan lereng yang mengalami retak (berdasarkan hasil geolistrik) dan sebagian retakan terinfiltrasi air hujan



Gambar 4.41. Pemodelan lereng yang mengalami retak (berdasarkan hasil geolistrik) dan semua retakan terinfiltrasi air hujan



Gambar 4.42. Pemodelan lereng yang mengalami retak dan sebagian retakan terinfiltrasi air hujan



Gambar 4.43. Pemodelan lereng yang mengalami retak dan seluruh retakan terinfiltrasi air hujan

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 5.

HASIL PENELITIAN

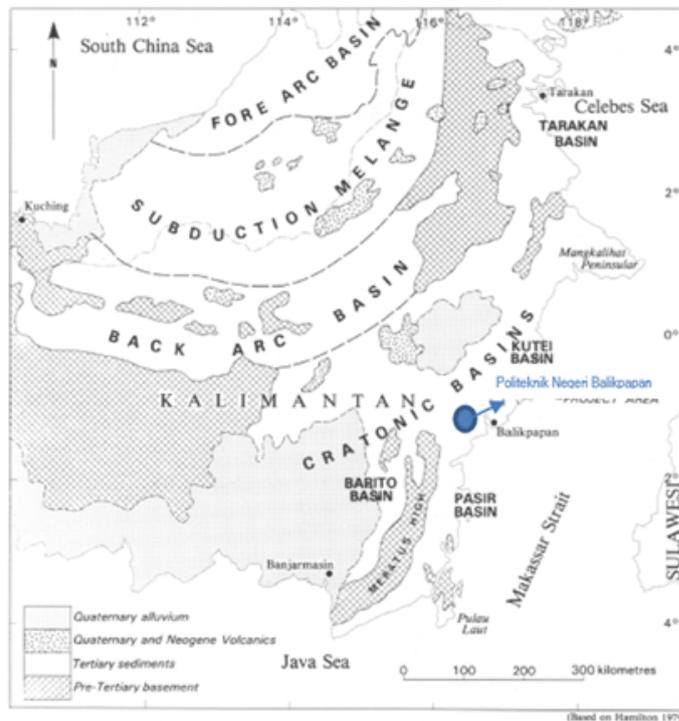
5.1 Validasi NSSAP 1.0 (New Slope Stability Analysis Programe) dengan Input Data Mannual

Untuk memastikan kehandalan program New Slope Stability Analysis Programe (NSSAP 1.0) dilakukan validasi menggunakan program XSTABL untuk kasus tanah utuh tanpa terjadi crack. Validasi dilakukan menggunakan data dari kasus kegagalan lereng yang terjadi di Politeknik Balikpapan (kondisi initial).

5.1.1 Gambaran umum lokasi studi untuk validasi

Keadaan topografi kota Balikpapan adalah sekitar 85% perbukitan dan sisanya 15% daerah datar (www.getborneo.com/kota-balikpapan). Politeknik Negeri Balikpapan (\pm KM 8 Jalan Raya Balikpapan – Samarinda) merupakan salah satu universitas di Balikpapan yang terletak di daerah perbukitan. Lokasi dari Politeknik Negeri Balikpapan dapat dilihat pada Gambar 5.1. Pada saat pekerjaan pemotongan dan perataan lahan pada proyek pembangunan gedung tersebut, disinyalir telah terjadi pergerakan-pergerakan tanah yang cukup berarti dari bagian-bagian lereng yang tidak terkena pemotongan. Tanah di lereng tersebut mengalami pergerakan-pergerakan kelongsoran yang cukup signifikan dan telah menyebabkan beberapa keretakan pada gedung-gedung di sekitar dan penurunan yang mencolok pada selasar-selasar yang berada di tepi gedung (Gambar 5.2 dan 5.3). Dikarenakan suatu alasan teknis, posisi pembangunan kemudian digeser \pm 30 meter dari rencana semula. Adanya pergeseran lokasi dan telah dilakukannya pengupasan muka tanah di lokasi yang ditentukan sebelumnya menyebabkan topografi tanah di lokasi pembangunan telah berubah dari kondisi awal seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4. Lapisan tanah permukaan dan lapisan tanah di bawahnya berturut-turut memiliki parameter $\gamma_1 = 17 \text{ kN/m}^3$, $\phi_1 = 0^\circ$, $c_1 = 20 \text{ kN/m}^2$ dan $\gamma_2 = 17 \text{ kN/m}^3$, $\phi_2 = 0^\circ$, $c_2 = 50 \text{ kN/m}^2$ (Tabel 5.1).

D. H. Land & C. M. Jones



Gambar 5.1. Peta lokasi studi (Land, et. al, 1986)



Gambar 5.2. Retak pada bangunan disebabkan oleh adanya pergerakan tanah pada pasangan batu kali penutup pagar Politeknik Negeri Balikpapan



Gambar 5.3. Kerusakan bangunan disekitar akibat terjadinya pergerakan tanah dan kelongsoran



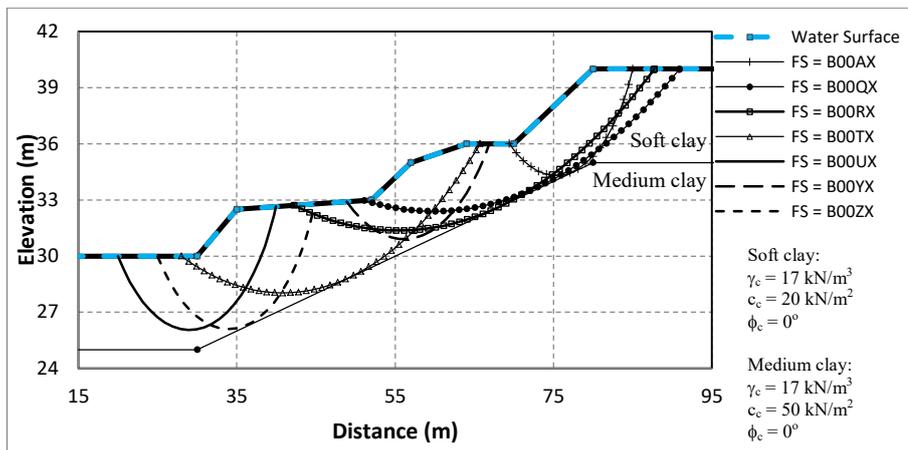
Gambar 5.4. Lokasi pembangunan di mana tanah dasarnya telah dilakukan pengupasan

Tabel 5.1 Soil Properties Kondisi Asli

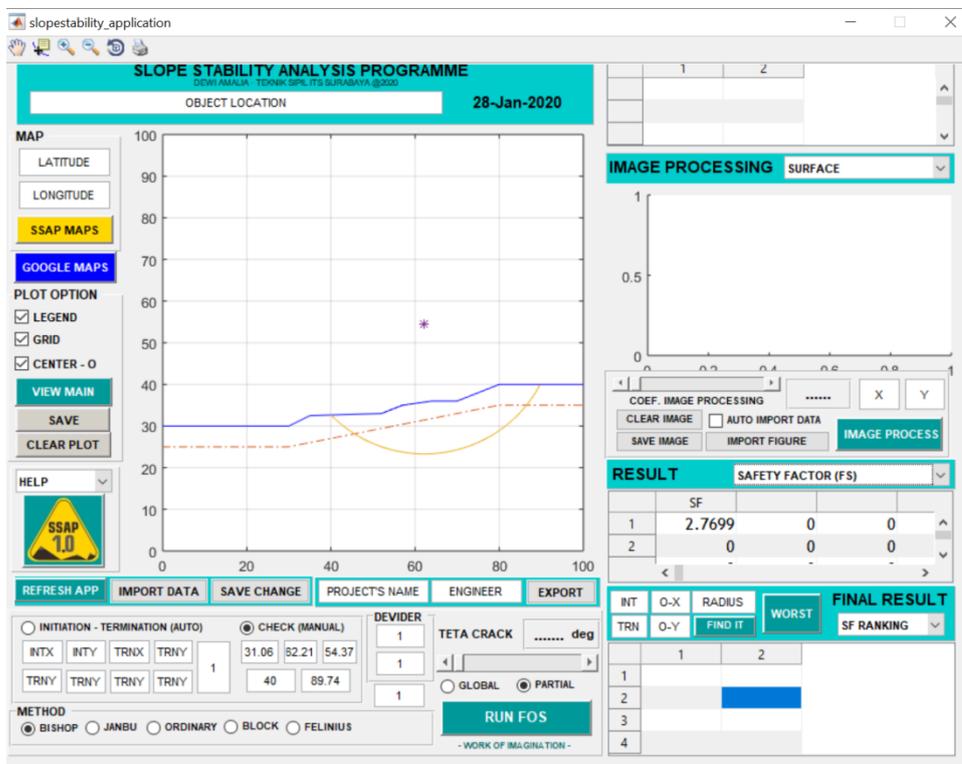
	γ (kN/m ³)	ϕ_1 (°)	c (kN/m ²)
Soft clay	17	0	20
Medium clay	17	0	50

5.1.2 Hasil analisis stabilitas lereng kondisi inisial menggunakan XSTABL

Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode Bishop dan Janbu pada program XSTABL yang berturut-turut dapat dilihat pada Gambar 5.5. dan 5.6 dan Tabel 5.2.



Gambar 5.5. Hasil analisa stabilitas lereng menggunakan data tanah inisial



Gambar 5.6. Contoh tampilan hasil running NSSAP 1.0 untuk B00RX

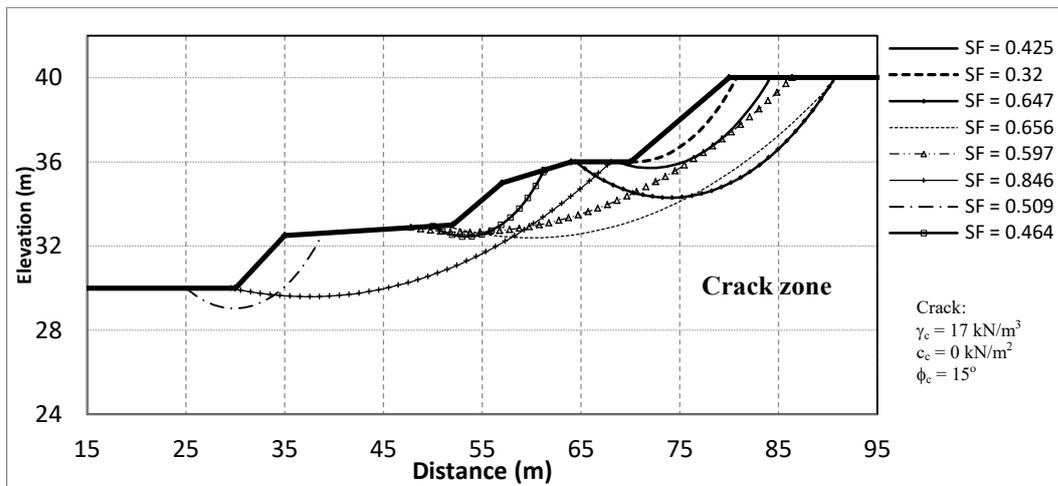
Tabel 5.2. Hasil Validasi Program

No	Kode	R	X Center	Y Center	Intiation	Termination	Geoslope	XSTABL	NSSAP
1	B00AX	10.705	75.175	45.077	69.54	84.55	2.011	2.011	1.9808
2	B00QX	68.24	59.562	100.57	50.613	90.97	2.433	2.403	2.3802
3	B00RX	31.06	62.21	54.37	40	89.74	1.072	2.468	2.7699
4	B00TX	42.809	40.958	70.864	28.3	65.87	2.843	2.802	2.7568
5	B00UX	12.517	28.196	39.461	20	38.97	2.976	3.068	2.9841
6	B00YX	14.028	55.899	44.592	48.1	67.1	2.805	2.861	2.7281
7	B00ZX	11.004	54.973	41.513	48.1	64.46	2.833	2.833	2.7189

Dari hasil tersebut terlihat bahwa harga SF semuanya $\gg 1.0$, sehingga secara teoritis seharusnya lereng tersebut tidak akan mengalami kelongsoran. Tapi pada kenyataannya kelongsoran terjadi, sehingga pendapat teoritis di sini boleh dikatakan tidak benar.

5.2 Pengaruh Perubahan Parameter Geser Tanah Dari Lereng yang Seluruhnya Mengalami Keretakan dan Terkena Hujan Lebat Terhadap Stabilitas Lereng

Analisa stabilitas lereng yang digunakan untuk mengetahui perubahan parameter geser tanah dari lereng yang seluruhnya mengalami keretakan dan terkena hujan lebat adalah metode Bishop dengan software NSSAP 1.0. Dalam analisa ini, tanah sedalam retakan dimodelkan berperilaku sebagai tanah pasir (*behaving like sand*) dengan parameter $c_{\text{crack}} \neq c_{\text{tanah}}$; $c_c = 0$; dan $\phi_c = 15^\circ, 20^\circ$, dan 25° dan mengalami *pore water pressure built up*. Analisis ini menggunakan data pada kasus kelongsoran pada pembangunan gedung serbaguna di area lokasi Politeknik Negeri Balikpapan. Hasil analisis NSSAP 1.0 bisa dilihat pada Gambar 5.17 -5.19.

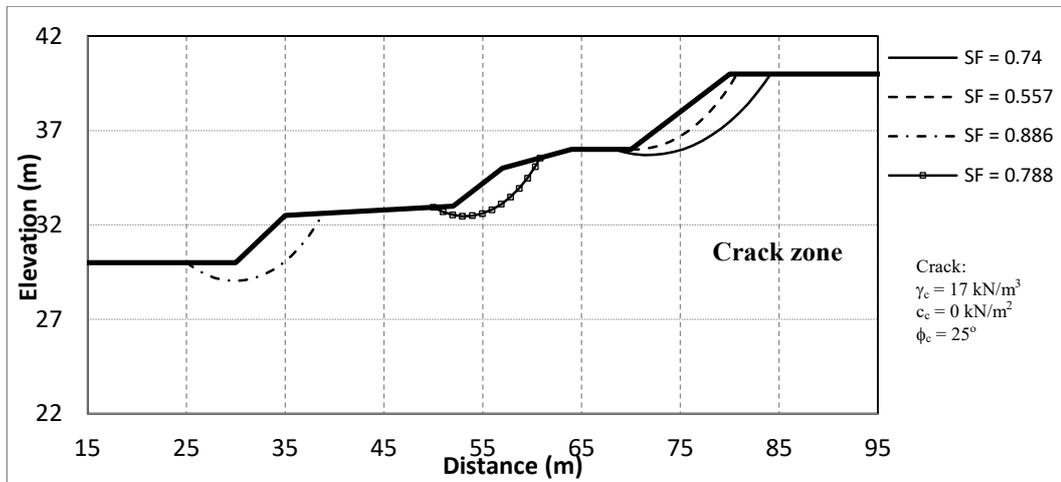


Gambar 5.7 Hasil analisis stabilitas tanah yang mengalami retak dengan $\phi_c = 15^\circ$

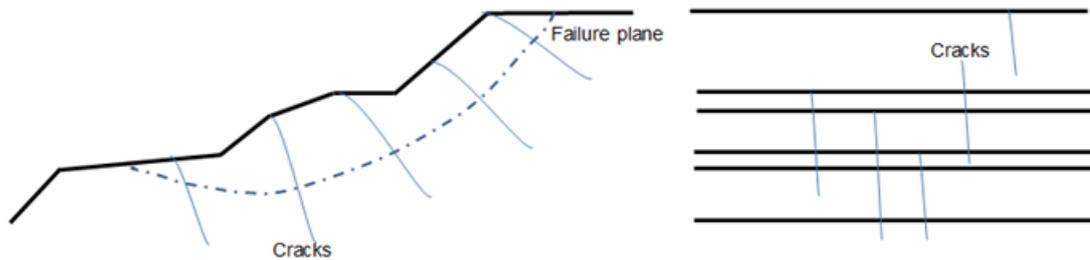


Gambar 5.8. Hasil analisis stabilitas tanah yang mengalami retak dengan $\phi_c = 20^\circ$

Pengaruh perubahan parameter geser tanah dari lereng yang seluruhnya mengalami keretakan dan terkena hujan lebat terhadap stabilitas diberikan pada Gambar 5.7 - 5.9. Stabilitas lereng dengan sudut geser internal retak (ϕ_c) = 15° (Gambar 5.7) memiliki lebih banyak bidang longsor dan nilai SF (safety factor) lebih kecil dari pada lereng dengan sudut geser internal retak (ϕ_c) = 20° dan 25° . Selain itu, kelongsoran yang terjadi adalah internal stability dan overall stability dimana terjadinya merata di setiap bagian tingkatan lereng (terasering).



Gambar 5.9. Hasil analisis stabilitas tanah yang mengalami retak dengan $\phi_c = 25^\circ$



Gambar 5.10. Arah retakan yang tidak mempengaruhi stabilitas lereng (a) tegak lurus terhadap arah kegagalan lereng (b) Paralel dengan kemiringan bidang penampang melintang

Tipe kelongsoran yang terjadi pada lereng dengan parameter sudut geser internal retak 20° (Gambar 5.8), mirip dengan lingkaran kegagalan dengan sudut gesekan internal 15° . Hanya saja kelongsoran tipe overall terjadi pada lereng bagian atas saja, sedangkan lereng bagian bawah hanya mengalami internal stability. Nilai SF untuk lereng dengan $\phi_c = 20^\circ$ lebih besar dan bidang longsor yang terjadi lebih sedikit dibandingkan dengan SF dan jumlah bidang longsor pada lereng dengan $\phi_c = 15^\circ$.

Tabel 5.3. Pengaruh Variasi Parameter Geser Tanah terhadap Stabilitas Lereng Selama Hujan Deras

Parameter Tanah Retak	N slip surface, SF < 1	Minimum Safety Factor (2D)	Tipe dari Kelongsoran Lereng
$c = 0 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi = 15^\circ$	8	0.320	kelongsoran terjadi hampir merata di setiap bagian dari tingkat kemiringan (teras), untuk kelongsoran tipe <i>internal stability</i> dan <i>overall stability</i> (diameter lingkaran lebih besar)
$c = 0 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi = 20^\circ$	6	0.435	mirip bidang longsor dengan $\phi = 15^\circ$, Namun, kelongsoran tipe <i>overall stability</i> hanya terjadi pada lereng atas, sedangkan bagian bawah lereng hanya menunjukkan kelongsoran tipe <i>internal stability</i> .
$c = 0 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi = 25^\circ$	4	0.557	hanya memiliki beberapa bidang kelongsoran lokal di semua tingkat lereng dan tidak ada lingkaran kegagalan keseluruhan yang terlihat

Berbeda dengan dua analisis stabilitas sebelumnya, lereng tanah yang retak dengan sudut gesekan internal $\phi_c = 25^\circ$ hanya memiliki tipe kelongsoran internal di semua tingkatan lereng; dengan kata lain, tidak ditemukan tipe kelongsoran overall. Jumlah bidang longsor yang terbentuk pada lereng dengan $\phi_c = 25^\circ$ ini adalah yang paling sedikit.

Dari pemodelan ini dapat dilihat bahwa parameter kekuatan geser tanah yang retak ϕ_c akan menentukan stabilitas lereng. Ini berarti bahwa semakin kecil nilai ϕ_c , semakin besar keadaan kritis lerengnya. Berdasarkan studi oleh (Mochtar, dkk 2018), $\phi_c = 15^\circ$ diasumsikan mewakili sudut internal retak tanah lempung, $c = 20^\circ$ diasumsikan mewakili tanah lanau, sedangkan $\phi_c = 25^\circ$ diasumsikan mewakili tanah berpasir (sandy soils) yang agak longgar (loose). Ini berarti bahwa lereng yang awalnya stabil, terbentuk dari *rocky shale (clay stone)*, dan juga lereng timbunan yang awalnya stabil dari tanah yang dipadatkan (compacted), kaku (stiff), silty soil, dapat secara bertahap menjadi sangat tidak stabil ketika retakan telah berkembang dan timbunan tergyur hujan dengan intensitas lebat.

Konsep tanah yang retak juga menyatakan bahwa arah retakan sangat mempengaruhi stabilitas lereng. Hasil dalam pemodelan ini di mana $SF < 1.0$, mengasumsikan bahwa propagasi retakan mengikuti arah bidang kegagalan. Namun, jika pola retak tidak sama dengan bidang kegagalan, yaitu retakan yang tegak lurus terhadap bidang kegagalan sirkular atau retakan yang sejajar dengan pandangan penampang kemiringan lereng (lihat Gambar 5.10), faktor keamanan akan jauh lebih besar dari 1.0, seperti tanah utuh tanpa retakan.

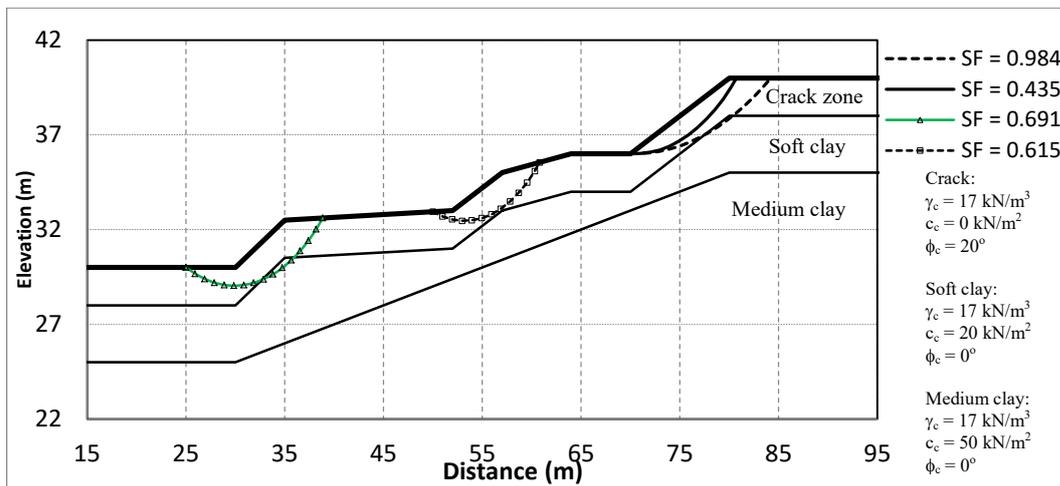
Hasil pemodelan ini dapat digunakan untuk mewakili kondisi kemiringan aktual dalam kasus Politeknik Balikpapan. Pada kenyataannya, lereng-lereng itu mengalami kelongsoran (*sliding*) selama hujan deras hingga sangat deras. Lereng stabil hanya ketika tidak ada hujan atau ketika hujan ringan sampai sedang. Selain itu, lereng umumnya dianggap stabil karena terdiri dari tanah lempung berlumpur dalam bentuk batuan sedimen dengan lapisan tanah sedang hingga sangat kaku. Oleh karena itu, konsep tanah retak dalam kondisi ekstrem (hujan sangat lebat) dapat menjelaskan kondisi sebenarnya dari kegagalan luncuran dan lereng dalam kasus Politeknik Negeri Balikpapan, Indonesia.

Dari bukti yang ditunjukkan pada Gambar 5.7, penulis menyimpulkan bahwa jenis kegagalan yang terlihat di lapangan adalah mereka yang memiliki masalah stabilitas keseluruhan yang juga terjadi di lereng bawah (*terase*). Ini adalah kondisi yang hanya ditemukan pada Gambar 5.7, di mana sudut gesekan internal tanah $\phi_c = 15^\circ$, yang sangat mewakili kondisi tanah lempung kaku di lapangan. Ringkasan Hasil Model-1 dapat dilihat pada Tabel 5.3.

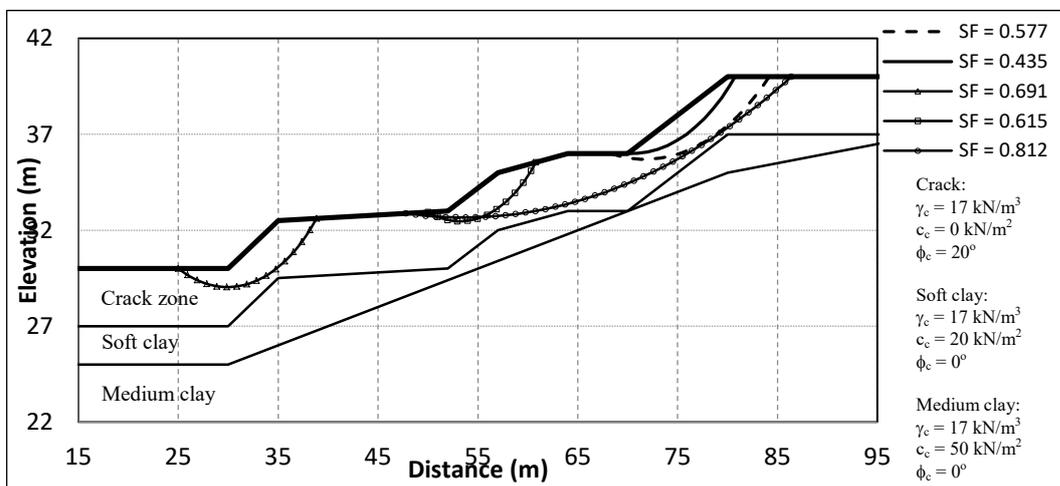
5.3 Pengaruh Posisi Retakan Lereng Ketika Terkena Hujan Lebat Terhadap Stabilitas Lereng

Analisa stabilitas lereng yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Bishop dengan software NSSAP 1.0. Tanah sedalam retakan dimodelkan berperilaku sebagai tanah pasir (*behaving like sand*) dengan parameter $c_{\text{crack}} \neq c_{\text{tanah}}$; $c_c = 0$; dan $\phi_c = 20^\circ$ dan mengalami *pore water pressure built up*. Variasi dilakukan terhadap kedalaman retakan yaitu 2 m, 3 m, dan 4 m. Analisis ini

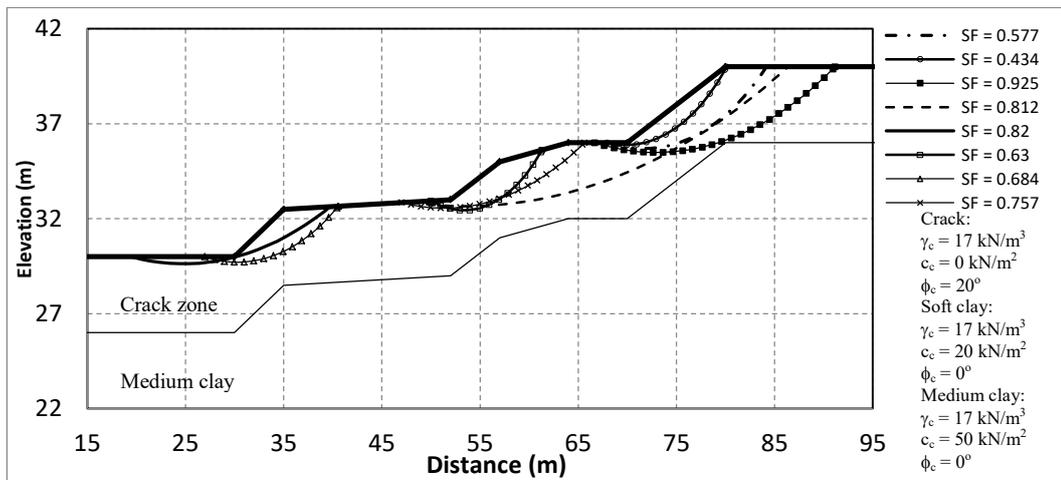
menggunakan data pada kasus kelongsoran pada pembangunan gedung serbaguna di area lokasi Politeknik Negeri Balikpapan. Hasil analisis NSSAP 1.0 bisa dilihat pada Gambar 5.11-5.13.



Gambar 5.11. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan model kedalaman crack $r = 2$ m



Gambar 5.12. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan model kedalaman crack $r = 3$ m



Gambar 5.13. Hasil analisis stabilitas lereng menggunakan model kedalaman crack $r = 4$ m

Pengaruh posisi retak terhadap stabilitas lereng ditunjukkan pada Gambar. 5.11-5.13. Lereng dengan kedalaman retak maksimum 2 m (parameter tanah retak $c_c = 0$ kN/m² dan $\phi_c = 20^\circ$) dalam kondisi hujan sangat deras (Gambar 5.11) memiliki bidang longsor paling sedikit dan semua tipe kelongsornya adalah *internal stability*. Ketika kedalaman retak meningkat (merambat) menjadi 3 m (Gambar 5.12), bidang longsornya serupa dengan lereng dengan kedalaman retak 2 m, hanya saja pada kasus ini ditemukan juga kelongsoran tipe overall yang terjadi di bagian atas lereng lingkaran. Bila dibandingkan dengan dua analisis stabilitas sebelumnya, jumlah bidang longsor yang terjadi pada lereng dengan kedalaman retak 4 m lebih banyak (Gambar 5.13) dan lebih banyak juga ditemui *overall stability*. Dari model ini dapat disimpulkan bahwa kedalaman retak yang lebih dalam akan menyebabkan masalah stabilitas yang lebih keseluruhan, yang juga berarti stabilitas lereng menjadi semakin kritis. Selain itu, dari Model-2 dapat dilihat bahwa tipe overall stability yang lebih besar di bagian bawah lereng tidak muncul, bahkan ketika retakan mencapai kedalaman 4 m. Ringkasan Hasil Model-2 dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Pengaruh Posisi Retakan terhadap Stabilitas Lereng, dengan $\phi_c = 20^\circ$

Kedalaman retakan	N slip surface, SF < 1	Minimum Safety Factor (2D)	Tipe dari Kelongsoran Lereng
2 meter	4	0.435	hanya memiliki beberapa bidang longsor tipe internal stability di semua tingkat lereng dan tidak bidang longsor tipe overall stability yang terlihat
3 meter	5	0.435	mirip dengan tipe kelongsoran dengan kedalaman retakan = 3 meter, Namun, kelongsoran tipe overall stability hanya terjadi pada lereng bagian atas, sedangkan bagian bawah lereng hanya menunjukkan kelongsoran tipe internal stability.
4 meter	8	0.434	kelongsoran terjadi hampir merata di setiap bagian tingkat lereng (teras), kelongsoran tipe overall stability hanya terjadi di lereng atas

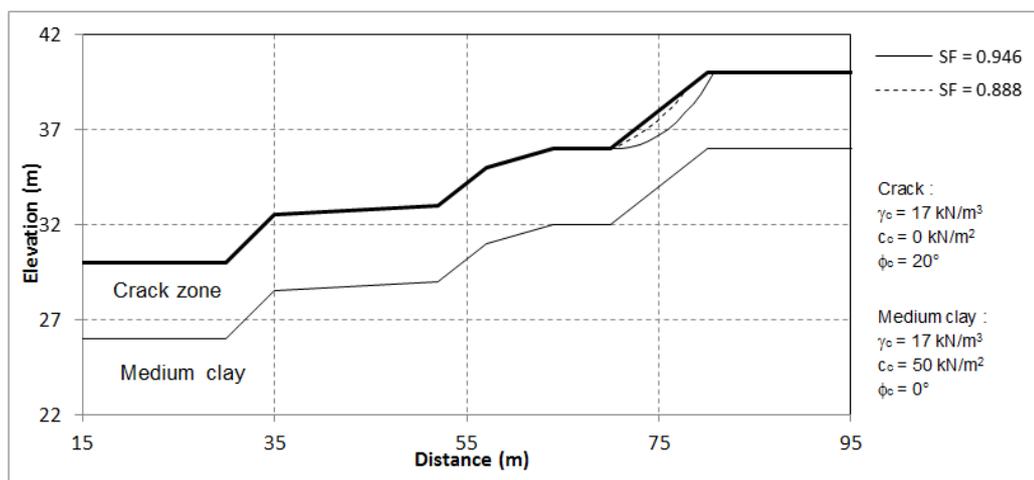
5.4 Pengaruh Intensitas Hujan Terhadap Stabilitas Lereng yang Mengalami Retak

Pada pemodelan terakhir ini, analisa stabilitas lereng masih menggunakan metode Bishop dengan software NSSAP 1.0. Tanah sedalam retakan dimodelkan berperilaku sebagai tanah pasir (*behaving like sand*) dengan parameter $c_{\text{crack}} \neq c_{\text{tanah}}$; $c_c = 0 \text{ kN/m}^2$; dan $\phi_c = 20^\circ$ dan mengalami *pore water pressure built up*. Pemodelan ini dilakukan dengan asumsi kedalaman retakan 4 m dan parameter geser internal tanah retak, $\phi_c = 20^\circ$ dan $c_c = 0 \text{ kN/m}^2$; pengaruh intensitas hujan di lapangan dimodelkan dalam 4 kondisi, yaitu :

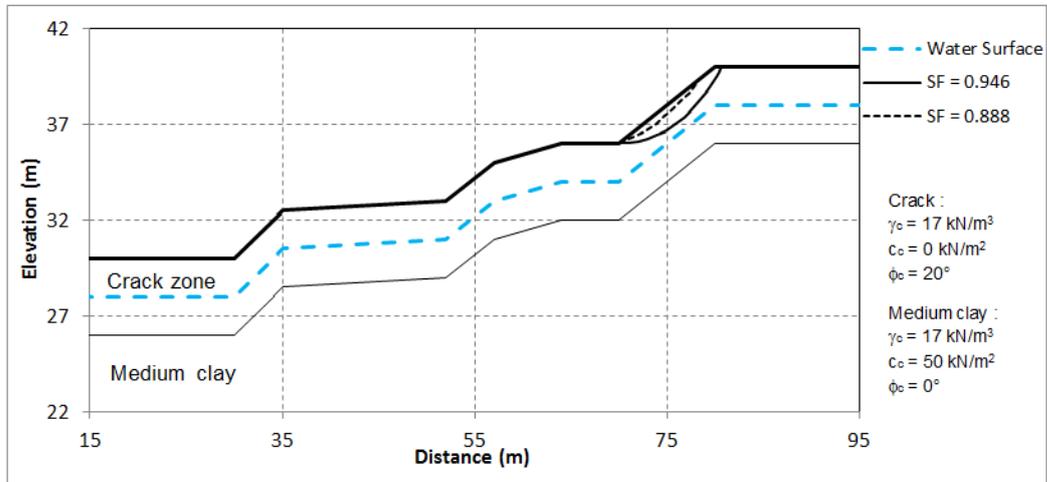
- i. Kondisi-1 untuk memodelkan lereng pada saat tidak terjadi hujan atau terjadi hujan dengan intensitas rendah (gerimis) pada lereng; pada Kondisi-1 ini elevasi muka air tanah disesuaikan dengan elevasi muka air tanah inisial di lapangan yaitu -21 m dari permukaan lereng.

- ii. Kondisi-2 untuk memodelkan lereng pada saat terjadi hujan dengan intensitas sedang (hujan sedang); kondisi ini menggambarkan mulai terjadi sedikit penumpukan air di dalam crack, yaitu setinggi 1.0 m dari dasar retakan atau berada di kedalaman -3.0 meter dari permukaan lereng.
- iii. Kondisi-3 untuk memodelkan lereng pada saat lereng diguyur hujan dengan intensitas tinggi (hujan lebat); dalam kondisi ini penumpukan air hujan yang terinfiltrasi ke dalam retakan semakin tinggi yaitu setinggi 3.0 m dari dasar retakan atau berada di kedalaman -1.0 meter dari permukaan lereng.
- iv. Kondisi-4 untuk memodelkan lereng yang diguyur oleh hujan dengan intensitas sangat lebat (hujan sangat deras); hujan ini membuat debit air yang terinfiltrasi ke dalam retakan jauh lebih besar daripada debit air yang merembes ke luar sehingga terjadi *pore water pressure build up*. Kondisi ini adalah kondisi terekstrim dari suatu lereng dimana kondisi ini sama seperti Model 2 dimana panjang retak 4.0 meter terisi seluruhnya oleh air.

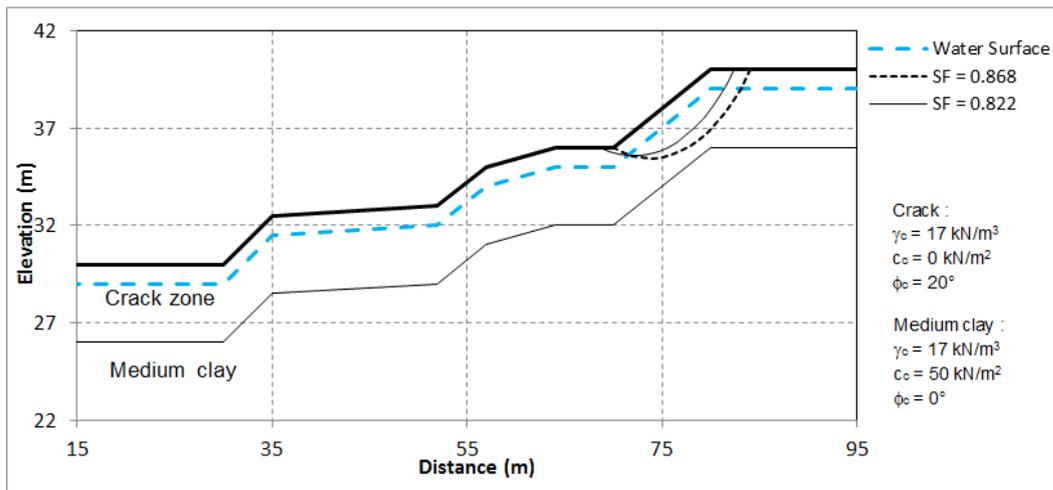
Analisis ini masih menggunakan data pada kasus kelongsoran pada pembangunan gedung serbaguna di area lokasi Politeknik Negeri Balikpapan. Hasil analisis NSSAP 1.0 bisa dilihat pada Gambar 5.13 -5.16.



Gambar 5.14. Hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi hujan dengan intensitas ringan/kondisi tidak hujan



Gambar 5.15 Hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi hujan dengan intensitas sedang



Gambar 5.16 Hasil analisis stabilitas lereng pada kondisi hujan dengan intensitas lebat

Tipe keruntuhan lereng yang terjadi karena variasi intensitas hujan dari tidak terjadi hujan/hujan gerimis s.d. lebat dapat dilihat pada Gambar 5.14-5.16 dan intensitas hujan sangat lebat dapat dilihat pada Gambar 5.13. Hujan intensitas rendah diwakili oleh tingkat permukaan air tanah yang lebih dalam. Dalam ketiga gambar ini terlihat bahwa keruntuhan yang terjadi hanya internal stability dan hanya terjadi di bagian atas lereng. Dengan kata lain, keruntuhan di bagian bawah lereng tidak dimungkinkan terjadi. Nilai-nilai SF untuk lereng terkena hujan dengan intensitas hujan rendah adalah lebih besar daripada lereng yang terkena

hujan dengan intensitas lebat. Hasil ini sesuai dengan (Zeng dkk., 2018) dalam penelitiannya yang mencari penemuan fraktur anisotropi lereng dalam proses infiltrasi air tanah dari lereng yang dihubungkan dengan metode numerik menggunakan perangkat lunak GEO-slope. Dari Model-3, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi intensitas hujan yang mengguyur lereng yang retak, semakin kecil nilai stabilitas lereng (SF) dan semakin kritis kondisi lereng. Selain itu, curah hujan sedang dan rendah (gerimis) ditemukan memiliki pengaruh yang dapat diabaikan pada stabilitas lereng.

Safety faktor (SF) ini dihitung dengan analisis stabilitas lereng dalam 2-Dimensi (2D), sehingga bila diperoleh nilai $SF < 1$ dan berarti lereng tersebut tidak stabil atau mengalami kelongsoran, baik dalam kondisi hujan ringan s.d. lebat. Akan tetapi pada kenyataannya di lapangan jika hanya terjadi hujan dengan intensitas rendah s.d. menengah, pada lereng tersebut tidak akan terjadi kelongsoran. Di sini penulis berpendapat bahwa untuk mendapatkan nilai SF sesuai dengan kondisi lapangan ($= SF_{lap.}$) harus digunakan analisis stabilitas lereng secara 3-Dimensi (3D). Menurut Stark dan Ruffing (2017) terdapat perbedaan angka keamanan antara $SF-3D = SF_{lap.} = (1.3 \text{ s/d } 1.5) \times SF-2D$. Untuk kondisi hujan dengan intensitas rendah didapatkan SF terkritis (2D) = 0.888 maka SF di lapangan $SF_{lap.} = 1.3 \times 0.888 = 1.15$; ini berarti kondisi lereng sesungguhnya di lapangan masih aman. Untuk kondisi hujan dengan intensitas sedang dan agak lebat SF di lapangan, $SF_{lap.} = 1.3 \times 0.822 = 1.07$ (kondisi lereng masih relatif aman). Kondisi terkritis ketika hujan sangat lebat dengan $SF_{lap.} = 1.3 \times 0.434 = 0.562$ (kondisi lereng longsor).

Desain struktur pada lereng harus didasarkan pada asumsi bahwa lereng awalnya berisi beberapa retakan. Dengan metode konvensional, faktor keamanan lebih besar dari 1 (Gambar 5.5), namun, dengan pendekatan retakan tanah, faktor keamanan menjadi lebih rendah dari 1. Pengaruh 3 indikator baru konsep crack soil terhadap stabilitas lereng berdasarkan hasil dari model ini, sesuai dengan hasil penelitian lapangan yang dilakukan oleh Aleksander, S., dkk. (2017 dan 2018). Indikator baru yang mempengaruhi stabilitas lereng adalah: parameter kekuatan geser tanah dalam kondisi retak, posisi retakan (kedalaman dan arah retakan), dan

intensitas hujan. Besarnya nilai untuk parameter geser tanah retak diperoleh dengan menggunakan alat pengujian geser dimodifikasi, dirancang khusus untuk menentukan nilai parameter geser tanah retak Hutagamissufardal dkk., (2012, 2017, dan 2018) serta Mochtar dan Hutagamissufardal (2016). Arah dan kedalaman retakan di lapangan dapat diperoleh dari pengujian lapangan, seperti yang telah dilakukan oleh Alexsander (2017 dan 2018). Seperti yang telah dijelaskan, sebagian besar curah hujan dengan intensitas sangat deras yang mempengaruhi stabilitas lereng. Hujan dengan intensitas tinggi ini akan menyebabkan air hujan yang menembus ke lereng melalui celah-celah semakin banyak. Akhirnya, laju air hujan yang masuk melebihi kemampuan retakan untuk mengalirkan air keluar sehingga di dalam retakan tekanan air pori akan terus menumpuk sampai tekanan maksimum tercapai. Kondisi terakhir ini pada akhirnya akan menyebabkan kelongsoran lereng. Jika hujan tidak lebat, retakan hanya akan terisi sebagian oleh air hujan dan tekanan air di dalam retakan relatif kecil, sehingga lereng umumnya stabil. Ringkasan Hasil Model-3 dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5. Pengaruh Intensitas Curah Hujan terhadap Stabilitas Lereng dengan Tanah yang Retak ($c_c = 0 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi_c = 20^\circ$)

Intensitas Hujan	N slip surface, SF < 1	Minimum Safety Factor 2D	Tipe dari Kelongsoran Lereng
Hujan sangat lebat	4	0.434	kelongsoran terjadi hampir merata di setiap bagian tingkat lereng (teras), kelongsoran tipe overall stability hanya terjadi di lereng atas
Hujan lebat	5	0.822	hanya memiliki beberapa kelongsoran tipe internal stability di bagian atas lereng dan tidak ada kelongsoran tipe overall stability yang terlihat
Hujan sedang	5	0.822	hanya memiliki beberapa kelongsoran tipe internal stability di bagian atas lereng dan tidak ada kelongsoran tipe overall stability yang terlihat
Hujan gerimis/tidak terjadi hujan	2	0.888	hanya memiliki beberapa kelongsoran tipe internal stability di bagian atas lereng dan tidak ada kelongsoran tipe overall stability yang terlihat

5.5 Contoh Penanganan Kelongsoran pada Kasus Pembangunan Gedung Serbaguna di Area Lokasi Politeknik Negeri Balikpapan

Dari penjelasan sebelumnya dapat dilihat bahwa cara lain untuk menjaga stabilitas lereng adalah dengan menjaga agar air tidak tinggal di dalam retakan. Ini dapat dilakukan dengan memasang saluran air internal (sub-saluran air) di dalam lereng, sehingga air hujan dapat segera dikeringkan keluar dari lereng, bahkan selama hujan lebat yang paling parah. Solusi alternatif pemasangan sub-drain untuk meningkatkan stabilitas lereng dapat dilihat pada Gambar 5.17. Gambar 5.17. Solusi alternatif untuk menjaga stabilitas lereng menggunakan sub-drain yang terdiri dari bronjong yang diisi dengan kerikil dan jalan berbatu dan dibungkus dengan geotekstil non-woven (Amalia, D., dkk, 2018)

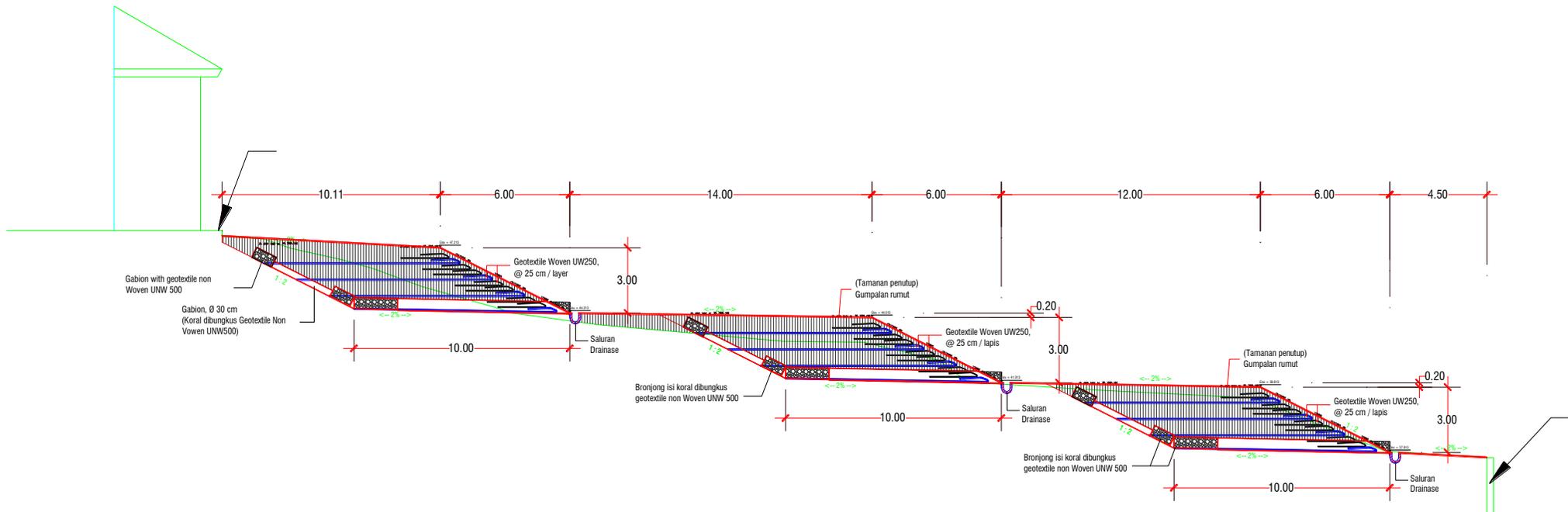
. Di mana sub-drain dipasang di dalam lereng dan dirancang untuk memiliki kapasitas pengeringan yang cukup untuk memungkinkan air hujan mengalir keluar dari lereng dengan mudah, selama intensitas hujan tertinggi, sehingga lereng akan tetap stabil. Disain perbaikan lereng (Gambar 5.17. *Solusi alternatif untuk menjaga stabilitas lereng menggunakan sub-drain yang terdiri dari bronjong yang diisi dengan kerikil dan jalan berbatu dan dibungkus dengan geotekstil non-woven (Amalia, D., dkk, 2018)*

) tersebut cukup stabil karena sampai tulisan disertasi ini dibuat tidak lagi terlihat adanya tanda-tanda kelongsoran pada lereng tersebut.

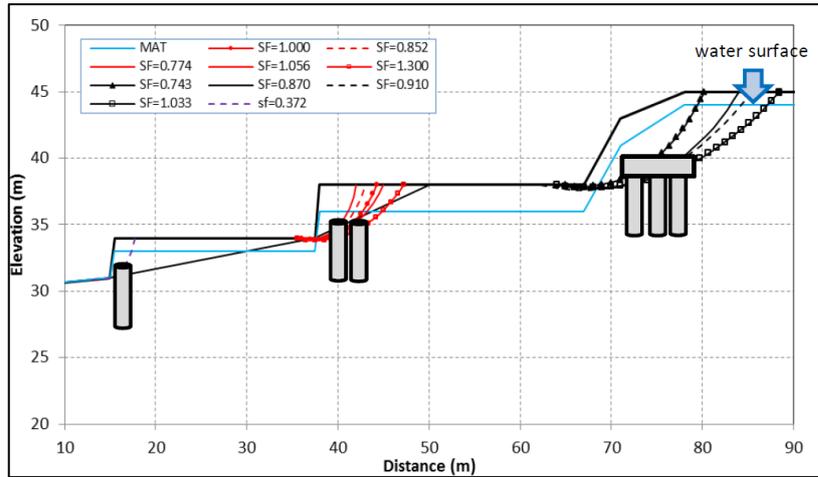
Dari hasil analisa sebelumnya diketahui bahwa dengan penurunan muka air hujan (air hujan yang masuk ke dalam lereng melalui retakan) sampai elevasi -3 s.d. -4 meter dari permukaan tanah setempat akan menjadikan lereng stabil. Upaya penurunan muka air hujan yang masuk ke dalam lereng melalui retakan dapat dilakukan dengan memasang sumur-sumur (pipa) untuk penyedotan air hujan yang masuk ke dalam tanah setiap interval jarak maksimal 10 meter (jarak lebih rapat akan lebih baik). Diameter sumur (pipa) minimal 3 (tiga) inchi. Sumur-sumur ini dimasukan pipa-pipa PVC yang berlubang-lubang yang dibalut oleh lapisan filter dari bahan geotextile type non-woven (ekivalen berat minimal 300 mgr/m²), dan kemudian air yang terkumpul di dalam sumur ini dipompa. Semua

sumur penyedotan dihubungkan dengan pompa-pompa air (pompa hisap) untuk mempertahankan permukaan air di dalam tanah selalu lebih rendah dari pada kedalaman minimal yang disyaratkan. Pompa ini hanya difungsikan jika hujan lebat terjadi.

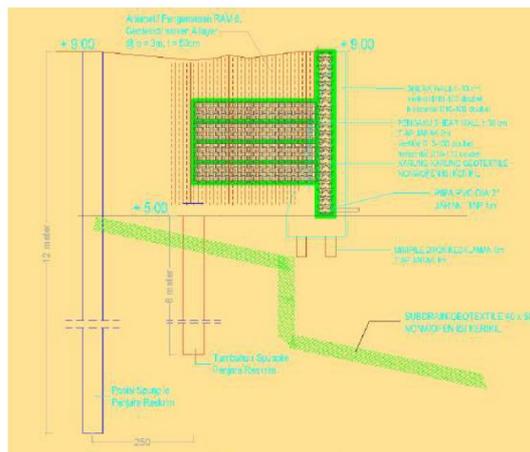
Penerapan subdrain juga telah dicoba oleh peneliti di kasus kelongsoran lainnya yang terjadi di lereng pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan, dimana subdrain dikombinasikan dengan perkuatan cerucuk seperti terlihat pada Gambar 5.18 - 5.20 (Amalia dkk., 2018). Sistem subdrain yang dikombinasikan dengan angker juga terlihat pada kasus kelongsoran lereng yang mengalami crack (Mochtar dan Hutagamissufardal, 2016). Subdrain dapat dipasang di dalam lereng dengan kemiringan tertentu, sehingga saat air hujan masuk air akan segera mengalir melalui sub-saluran air dan lereng akan tetap stabil. .



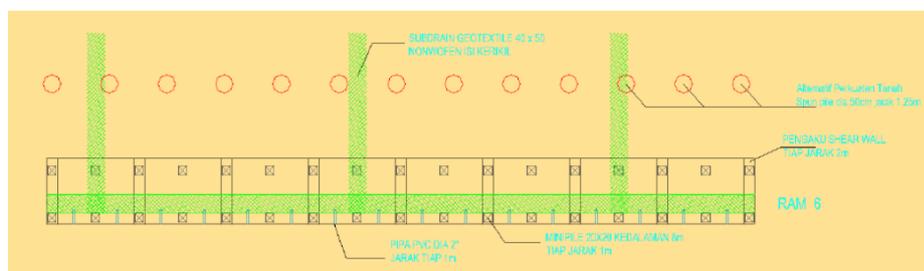
Gambar 5.17. Solusi alternatif untuk menjaga stabilitas lereng menggunakan sub-drain yang terdiri dari bronjong yang diisi dengan kerikil dan jalan berbatu dan dibungkus dengan geotekstil non-woven (Amalia, D., dkk, 2018)



Gambar 5.18. Ilustrasi pemasangan perkuatan tiang pancang pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan (Amalia, D., dkk, 2018)



Gambar 5.19. Ilustrasi pemasangan subdrain pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan (Amalia, D., dkk, 2018)



Gambar 5.20. Ilustrasi pemasangan subdrain tampak atas pada area pembangunan gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan (Amalia, D., dkk, 2018)

BAB 6.

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis yang telah diberikan di atas, kesimpulan berikut dapat diturunkan:

1. Pemodelan stabilitas lereng yang mengalami keretakan berbeda dengan pemodelan stabilitas lereng pada umumnya (tanah utuh). Retakan dapat berupa retakan tunggal atau retakan acak tidak terpola merupakan suatu sistem retak. Perbedaan perilaku tanah retak dengan tanah utuh, yaitu pada tanah yang retak mengalami *behaving like sand*, yaitu tanah berperilaku seperti pasir, dimana $c = 0$ dan parameter geser tanah pada bidang retak tidak lagi sama dengan parameter tanah utuh, yaitu $\phi_{\text{retak}} \neq \phi$ dan $c_{\text{retak}} \neq c = 0$. Selain itu, pada tanah yang retak mengalami *pore water pressure build up* sedangkan pada tanah yang utuh tidak mengalami hal tersebut. *Pore water pressure build up* dilakukan dengan memodelkan lereng yang retak dalam kondisi terisi air. Tinggi air dalam retakan dapat disimulasi secara manual untuk selanjutnya didapatkan kondisi kritis dari lereng tersebut. Retakan dijadikan sebagai cikal bakal kelongsoran.
2. Pemodelan retakan pada program NSSAP 1.0 ini dibagi menjadi dua cara entry data, yaitu entry data secara otomatis dan manual. Entry data secara otomatis dilakukan dengan mengambil data cracks di lapangan secara langsung dari hasil pengujian geolistrik seperti yang dilakukan oleh (Alexsander dkk., 2017), (Alexsander dkk., 2018). Data geolistrik tersebut kemudian diolah menggunakan teknologi citra digital (*image processing*). Hasil penelitian diperoleh ketelitian 0.0578 m/pixel atau sama dengan 5.78 cm/pixel. Berikutnya, yaitu entry data retakan secara manual. Hal ini dilakukan jika tidak dimungkinkan mengambil data cracks secara langsung di lapangan. Hasil dari input retakan secara manual adalah berupa prediksi yang belum diketahui secara pasti tingkat keakuratannya, mengingat posisi

retakan yang merupakan faktor utama penentu stabilitas ditentukan dengan perkiraan saja.

3. Desain perencanaan suatu struktur di suatu lereng harus dilakukan berdasarkan asumsi bahwa lereng tersebut telah mengalami keretakan. Konsekuensi dari keretakan tersebut adalah berubahnya parameter tanah yang retak yaitu bersifat menyerupai tanah pasir (*behaving like sand*) dan kondisi terkritis ketika hujan sangat lebat (terjadi *pore water pressure build up*) terjadi. Dari hasil analisa stabilitas pada lereng terlihat bahwa angka keamanan lereng, SF semuanya > 1.0 , sehingga secara teoritis seharusnya lereng tersebut tidak akan mengalami kelongsoran. Dengan menggunakan *the concept of cracked soil* yang terinternalisasi pada program NSSAP 1.0 terlihat bahwa lereng yang awalnya diprediksi aman ($SF > 1$) ternyata longsor ($SF < 1$) terutama ketika hujan sangat lebat terjadi. Hal ini sesuai dengan kondisi di lapangan di mana lereng tersebut longsor setelah terguyur hujan sangat lebat.

6.2 Saran

Perlu dilakukan pengembangan lebih mendalam terkait program NSSAP 1.0 yang telah dikembangkan ini agar dapat dijalankan tanpa menggunakan program dasar Matlab yang membutuhkan spesifikasi computer/laptop yang cukup tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexsander, S., Mochtar, I. B., dan Utama, W. (2016): Identifikasi Keberadaan dan Perubahan Cracks di Dalam Lereng Tanah melalui Pengujian Tomographic Resistivity dan Induced Polarization sebagai Upaya Pembuktian Hipotesa The Concept of Crack Soil (PhD Research Proposal), Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Alexsander, S., Mochtar, I. B., dan Utama, W. (2017): The Measurements of Water Intrusion through Cracks Propagation Inside Slopes to Explain the Cause of Slope Failure — Case Study of Embankment in the Sanggubuntok Airport , Central Kalimantan , Indonesia, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, 22(14), 5347–5362.
- Alexsander, S., Mochtar, I. B., dan Utama, W. (2018): Field Validated Prediction of Latent Slope Failure Based on Cracked Soil Approach, *Lowland Technology International*, 20(3), 245–258.
- Alexsander, S., Mochtar, I. B., dan Utama, W. (2018): Identifikasi Keberadaan dan Perubahan Cracks di Dalam Lereng Tanah melalui Pengujian Tomographic Resistivity dan Induced Polarization sebagai Upaya Pembuktian Hipotesa The Concept of Crack Soil (PhD Research Report), Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Alimohammadlou, Y., Naja, A., dan Gokceoglu, C. (2014): Catena Estimation of rainfall-induced landslides using ANN and fuzzy clustering methods : A case study in Saen Slope , Azerbaijan province , Iran, 120, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.009>
- Amalia, D., Mochtar, I. B., dan Mochtar, N. E. (2018): Penerapan Konsep Baru Cracked Soils pada Penanggulangan Kelongsoran Lereng (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan), "Industrial Research Workshop and National Seminar (Irwns) 9th Polban", 50–63.
- Amarasiri, A. L., Costa, S., dan K. Kodikara, J. (2011): Determination of cohesive properties for mode I fracture from compacted clay beams, *Canadian Geotechnical Journal*, 1163–1173.
- Bishop, A. W. (1955): The use of The Slip Circle in The Stability Analysis of

- Slopes, *Geotechnique*, 5, 7–17.
- Chen, X., Wu, Y., Yu, Y., Liu, J., Frank, X., dan Ren, J. (2014): Computers and Geotechnics A two-grid search scheme for large-scale 3-D finite element analyses of slope stability, *Computers and Geotechnics*, 62, 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.07.010>
- Cheng, M. Y., dan Hoang, N. D. (2015): A Swarm-Optimized Fuzzy Instance-based Learning approach for predicting slope collapses in mountain roads, *Knowledge-Based Systems*, 76, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.kno-sys.2014.12.022>
- Fan, P., Liu, Q.Q., Li, J.C., Sun, J. P. (2005): Numerical analysis of rainfall infiltration in the slope with a fracture, *Science in China* 48(S), 107–120.
- Fellenius, W. (1936): Calculations of the Stability of Earth Dams, the Second Congress of Large Dams, 445–63.
- Gouw, I., Liong, T., Eng, M., Juven, D., dan Herman, G. (2012): Analisa Stabilitas Lereng Limit Equilibrium Vs Finite Element Method, *Pertemuan Ilmiah Tahunan Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia XVI (PIT HATTI - XVI) Indonesia, Jakarta*.
- Hamedifar, H., Bea, R. G., Pestana-nascimento, J. M., dan Roe, E. M. (2014): Role of Probabilistic Methods in Sustainable Geotechnical Slope Stability Analysis, *Procedia Earth and Planetary Science*, 9, 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.06.009>
- Hu, S. (2000): Reliability of slope stability considering infiltration through surface cracks, *Hong Kong University of Science and Technology*.
- Hutagamissufardal, Mochtar, I. B., dan Mochtar, N. E. (2012): Analisis Parameter Kekuatan Geser Tanah Berdasarkan Pendekatan Bidang Retak pada Peristiwa Kelongsoran Lereng (PhD Research Proposal), Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Hutagamissufardal, Mochtar, I. B., dan Mochtar, N. E. B. (2017): The Effect of Soil Cracks on Cohesion and Internal Friction Angle at Landslide, *The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum*.
- Hutagamissufardal, Mochtar, I. B., dan Mochtar, N. E. B. (2018): The Effect of Cracks Propagation on Cohesion and Internal Friction Angle for High

Plasticity Clay, 13(5), 2504–2507.

- Hutagamissufardal, Mochtar, I. B., dan Mochtar, N. E. (2018): Analisis Parameter Kekuatan Geser Tanah Berdasarkan Pendekatan Bidang Retak pada Peristiwa Kelongsoran Lereng (PhD Research Report), Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Iswinarno, Chandra (2020), Longsor Dekat Tol Cipularang, PVMBG Rekomendasikan Beban Kendaraan Dibatasi, *suarajabar.id*, Senin, 17 Februari 2020, pk. 22:18 WIB, <https://jabar.suara.com/read/2020/02/17/-221857/longsor-dekat-tol-cipularang-pvmbg-rekomendasikan-beban-kendaraan-dibatasi>
- Kang, F., Han, S., Salgado, R., dan Li, J. (2015): Computers and Geotechnics System probabilistic stability analysis of soil slopes using Gaussian process regression with Latin hypercube sampling, *Computers and Geotechnics*, 63, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.08.010>
- Kashani, A. R., Gandomi, A. H., dan Mousavi, M. (2016): Imperialistic Competitive Algorithm: A metaheuristic algorithm for locating the critical slip surface in 2-Dimensional soil slopes, *Geoscience Frontiers*, 7(1), 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.11.005>
- Kassim, A., Gofar, N., Min, L., dan Rahardjo, H. (2012): Modeling of suction distributions in an unsaturated heterogeneous residual soil slope, *Engineering Geology*, 131–132, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.005>
- Kim, J., Jeong, S., dan Regueiro, R. A. (2012): Instability of partially saturated soil slopes due to alteration of rainfall pattern, *Engineering Geology*, 147–148, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.07.005>
- Li, D., Zhang, F., Cao, Z., Zhou, W., Phoon, K., dan Zhou, C. (2015): Computers and Geotechnics Efficient reliability updating of slope stability by reweighting failure samples generated by Monte Carlo simulation, *Computers and Geotechnics*, 69, 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.06.017>
- Lim, T. T., Rahardjo, H., Chang, M. F., dan Fredlund, D. G. (1996): Effect of rainfall on matric suction in a residual soil slopes, *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (2), 618–628.

- Mahatma, Fred, 2019, Longsor Lagi di Sukabumi, 1 Anak Tewas Tertimbun di Lokasi Proyek Rel Ganda, Jumat, 11 Januari 2019 03:54, Artikel ini telah tayang di Wartakotalive dengan judul Longsor Lagi di Sukabumi, 1 Anak Tewas Tertimbun di Lokasi Proyek Rel Ganda, <https://wartakota.tribunnews.com/2019/01/11/longsor-lagi-di-sukabumi-1-anak-tewas-tertimbun-di-lokasi-proyek-rel-ganda>.
- Michalowski, R. L. (2012): Stability assessment of slopes with cracks. In Proceedings of, Geo-Congress, Oakland, California, 442–450.
- Mochtar, I. B. (2010): Masalah Pergerakan Tanah dan Turap Baja di Lereng Tebing Dekat Gedung Squash, Kota Balikpapan, Laporan Penyelidikan oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat.
- Mochtar, I. B. (2011): Cara Baru Memandang Konsep Stabilitas Lereng (Slope Stability) berdasarkan Kenyataan di Lapangan, Seminar Nasional Geoteknik Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI).
- Mochtar, I. B. (2012): Field Evidences as the Base for Suggested New Concept of Soils Shear Strength Analysis and Slope Stability, 16th Annual Scientific Meeting HATTI Indonesia, Jakarta.
- Mochtar, I. B., dan Hutagamissufardal (2016): Cracks in Soil and Their Implication for Geotechnical Engineering, Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT XX) 2016, 49–54.
- Mohamed, T., Kasa, A., dan Taha, M. R. (2012): Advanced Science Information Technology Fuzzy Logic System for Slope Stability Prediction, International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology Fuzzy, 2(2), 38–42.
- Moriwaki, H., Inokuchi, T., Sassa, K., Ochiai, H., dan Wang, G. (2004): Failure process in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator, Landslides, 1 (4), 277–288.
- Plaxis (2016): Tutorial Manual Plaxis 2D.
- PM, N., dan Chezian, R. M. (2013): Various Colour Spaces And Colour Space Conversion, 4(1), 44–48.
- Rabie, M. (2014): Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall, HBRC Journal, 10(2), 160–168.

<https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.10.002>

- Reale, C., Xue, J., Pan, Z., dan Gavin, K. (2015): Computers and Geotechnics Deterministic and probabilistic multi-modal analysis of slope stability, Computers and Geotechnics, 66, 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.comp-geo.2015.01.017>
- Rogers, N. W., dan Selby, M. J. (1980): Mechanisms of Shallow Translational Landsliding during Summer Rainstorms: North Island, New Zealand, Geografiska Annaler Series A, Physical Geography, 62(1/2), 11–21.
- Sengupta, A., dan Upadhyay, A. (2009): Locating the critical failure surface in a slope stability analysis by genetic algorithm, 9, 387–392. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2008.04.015>
- Sharma, S. (2008): Reference Manual XSTABL “An Intrgrated Slope Stability Analysis Program for Personal Computers” . Interactive Software Designs Inc, Moscow.
- Shi, B., Chen, S., Han, H., dan Zheng, C. (2104): Expansive Soil Crack Depth under Cumulative Damage, The Scientific World Journal, 1–9.
- Spencer, E. (1967): A Method for The Analysis of The Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces, Geotechnique, 23(1), 11–26.
- Stark, T. dan Ruffing, D. (2017): Selecting Minimum Factors of Safety for 3D Slope Stability Analyses, Geo-Risk 2017, 259-266, <https://doi.org/10.1061/-9780784480700.025>.
- Sweeting, T. J., dan Finn, A. F. (1992): A Monte Carlo method based on first- and second-order reliability approximations *, 11(May 1993), 203–212.
- Trandafir, A. C., Sidle, R. C., Gomi, T., dan Kamai, T. (2008): Monitored and simulated variations in matric suction during rainfall in a residual soil slope, Environmental Geology, 55 (5), 951–961.
- Wang, R., Zhang, G., dan Zhang, J. (2010): Centrifuge modelling of clay slope with montmorillonite weak layer under rainfall conditions., Applied Clay Science, 50 (3), 386–394.
- Zeng, L., Liu, J., Zhang, J., Bian, H., dan Lu, W. (2018): Effect of Colluvial Soil Slope Fracture ’ s Anisotropy Characteristics on Rainwater Infiltration Process, 2018.

Zhang, G., Wang, R., Qian, J., Zhang, J., dan Qian, J. (2012): Effect study of cracks on behavior of soil slope under rainfall conditions, *Soils and Foundations*, 52(4), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.07.005>

BIOGRAFI PENULIS



I. Data Pribadi

1. Nama : Dewi Amalia, S.T., M.T.
2. Tempat/Tanggal Lahir : Jakarta, 28 April 1985
3. Jenis Kelamin : Perempuan
4. Status Perkawinan : Kawin
5. Alamat Sekarang : Cluster Pesona Cihanjuang 4, no.22, Cisasawi, Kel. Cihanjuang, Kec. Parongpong, Kab. Bandung Barat
6. Hand Phone : 081 9385 24467
7. Bidang Keahlian : Teknik Sipil – Geoteknik

II. Riwayat Pendidikan

1. TK : TK Hang Tuah X Juanda (Sidoarjo, 1989-1991)
2. SD : SD Hang Tuah X Juanda (Sidoarjo, 1991-1997)
3. SMP : SMPN 2 Waru (Sidoarjo, 1997-2000)
4. SMA : SMAN 1 Waru (Sidoarjo, 2000-2003)
5. S1 : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (Surabaya, 2004-2008)
6. S2 : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (Surabaya, 2008-2010)
7. S3 : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (Surabaya, 2015-sekarang)

III. Riwayat Pekerjaan

Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung (2010-sekarang)

IV. Riwayat Publikasi

1. Application Of Digital Image Technology for Determining Geometry, Stratigraphy, and Position of Cracks Inside Earth Slope, International Journal of Geomate, Geomate International Society, International Journal of GEOMATE, Nov., 2019 Vol.17, Issue 63, pp. 297 – 306, ISSN: 2186-2982

(P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2019.63.25640>
Geotechnique, Construction Materials and Environment (**Terindeks Scopus**)

2. Application of a New Concept of Cracked Soils in Slope Stability Analysis with Heavy Rain and the Pattern of Cracks as the Governing Factors, Springer Nature Switzerland AG 2020, F. Mohamed Nazri (ed.), Proceedings of AICCE'19, Lecture Notes in Civil Engineering 53, https://doi.org/10.1007/978-3-030-32816-0_42 (**Terindeks Scopus**).
3. Penerapan Konsep Baru Cracked Soils Pada Penanggulangan Kelongsoran Lereng (Studi Kasus: Pembangunan Gedung Reskrimsus Polda Kalimantan Timur, Balikpapan), 9th Industrial Research Workshop and National Seminar, 25-26 Juli 2018, Politeknik Negeri Bandung (**Terindeks Google Scholar**)
4. Perancangan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan – Pemasang, Jurnal Potensi Jurusan Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bandung, 2019/Vol 21/No.1, ISSN 1411-2949 (**Terakreditasi**)