

TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN WAY-APU TERHADAP BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN METODE PSHA *STABILITY ANALYSIS OF THE WAY-APU DAM TO THE EARTHQUAKE LOAD USING PSHA METHOD*

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



Kamil Johannes Paransa

15511149

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL - PROGRAM SARJANA
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2023

TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS BENDUNGAN WAY-APU TERHADAP BEBAN GEMPA MENGGUNAKAN METODE PSHA

STABILITY ANALYSIS OF THE WAY-APU DAM TO THE EARTHQUAKE LOAD USING THE PSHA METHOD

Disusun oleh

Kamil Johanes Paransa

15511149

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal :

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T
NIK: 885110101

Penguji 1

Muhammad Rifqi Abdurrozak S.T., M.Eng.
NIK: 135111101

Penguji 2

Anisa Nur Amalina, S.T., M.Eng
NIK: 21511305

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Yunalia Mantani, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 095110101



HALAMAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian Program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, Desember 2022

Yang membuat pernyataan,



Kamil Johannes Paransa

(15511149)

HALAMAN DEDIKASI



Tulisan ini kupersembahkan untuk Papa Mama tercinta

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah rabbil'alamin, segala puji dan syukur kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga Tugas Akhir dengan judul "Analisis Stabilitas Bendungan Way-Apu Menggunakan Metode PSHA" dapat terselesaikan. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wa salam sebagai suri tauladan bagi umatnya.

Tugas Akhir merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh untuk menyelesaikan pendidikan tingkat Strata Satu (S1) pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak sedikit hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Selanjutnya, izinkanlah penulis mengucapkan terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti M.T. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan, ilmu, nasihat dan saran selama penyusunan tugas akhir. Terimakasih atas kesempatan dan kepercayaan yang Bapak berikan hingga tugas akhir ini dapat selesai.
2. Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan arahan dan masukan yang membangun sehingga tugas akhir ini dapat menjadi lebih baik.
3. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
4. Ibu Wiwik Saptorini, yang telah memberi atensi, semangat, dan mengembalikan kepercayaan diri penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.

5. Seluruh dosen, pengajar, laboran, asisten, staf serta karyawan Prodi Teknik Sipil UII yang telah memberikan ilmu dan memfasilitasi kegiatan pembelajaran penulis selama masa kuliah.
6. Mas Heru dan Mas Tegas, yang telah memberikan ilmu tambahan mengenai program *GeoStudio* dan *Matlab*, semoga ilmunya selalu menjadi berkah dan bermanfaat bagi banyak orang.
7. Papa-Mama tercinta, Ir. Muslah J. Paransa, M.Si., dan Ir. Mirta H. E. Pontoh, yang telah berkorban begitu banyak bagi penulis. Terimakasih tiada akhir atas doa, dan segala dukungan yang diberikan dengan penuh keikhlasan kepada penulis.
8. Aulia Zulhafni Setiyanto, Adwa dan Hanifah, *from the moment I said "I do" until the moment Hanifah was born, I never truly realize how much you all mean to me, thank you for all those years spent with me, from the ups and down, twist and turn, and in sickness and in health. I will always try my best to make you all happy even if I must get sick from it. I'll Love You All to The End of Time.*
9. Fildzah, Abi, Rafi, Fakih, Raina, Nailah, Aqilah, Thasya, Hannan, semua kakak dan adik-adikku tersayang yang selalu menjadi penghiburan di kala penulis rindu akan rumah.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, penulis ucapkan terimakasih banyak.
11. Dan yang terakhir...*to my dear self, thank you for surviving.*

Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi siapa saja yang membacanya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, Januari 2023

Kamil Johanes Paransa

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	I
HALAMAN PENGESAHAN	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
HALAMAN BEBAS PLAGIASI.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
HALAMAN DEDIKASI	IV
KATA PENGANTAR	V
DAFTAR ISI.....	VII
DAFTAR GAMBAR.....	X
DAFTAR TABEL.....	XIV
DAFTAR LAMPIRAN.....	XVI
ABSTRAK.....	XVII
<i>ABSTRACT</i>	XVIII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.1.1 Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Tipe Urugan Zonal Inti Tegak dengan Perkuatan Timbunan terhadap Beban Gempa.....	5
2.1.2 Analisis Stabilitas dan Respon Dinamik terhadap Displacement selama Gempa pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak.....	6
2.1.3 Analisis Stabilitas Statik dan Stabilitas Dinamik menggunakan Parameter <i>Safety Evaluation Earthquake</i> (SEE) pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak	6
2.1.4 Analisis Stabilitas Bendungan menggunakan Metode Bishop dan Perhitungan Rembesan dengan Pendekatan Metode Cassagrande	7
2.2 Keaslian Penelitian	7
BAB III LANDASAN TEORI	10
3.1 Bendungan Urugan	10
3.2 Gempa Bumi.....	14

3.3 Magnitudo Gempa	18
3.3.1 Magnitudo Lokal (M_L).....	18
3.3.2 Magnitudo Gelombang Permukaan (M_S).....	19
3.3.3 Magnitudo Gelombang Badan (M_b)	19
3.3.4 Momen Magnitudo (M_W).....	19
3.4 Analisis Bahaya Gempa/ <i>Seismic Hazard Analysis</i>	20
3.5 Katalog Gempa	24
3.5.1 Penyeragaman Magnitudo Gempa	24
3.5.2 <i>Declustering</i> Data Gempa	24
3.5.3 Analisis Kelengkapan Data Gempa	25
3.6 <i>Earthquake Recurrence Parameter</i>	27
3.7 Permodelan Sumber Gempa	29
3.7.1 <i>Area Source</i>	29
3.7.2 <i>Geometry Source</i>	30
3.7.3 <i>Seismicity Source</i>	30
3.8 <i>Hazard Maps</i>	31
3.9 <i>Exceedance Probability</i>	32
3.10 Fungsi Atenuasi dan <i>Logic Tree</i>	32
3.11 Deagregasi	34
3.12 Amplifikasi	34
3.13 <i>Time History</i>	35
3.14 Analisis Stabilitas Bendungan Urugan	37
3.14.1 Analisis Statik	37
3.14.2 Analisis Dinamik.....	38
3.14.3 Analisis Beban Gempa	39
BAB IV METODE PENELITIAN	46
4.1 Metode Penelitian	46
4.2 Data Bendungan.....	46
4.2.1 Material Bendungan	46
4.2.2 Data Teknis Bendungan	48
4.3 Peralatan Penelitian.....	48
4.4 Diagram Alir Penelitian	49
4.5 Tahapan Penelitian.....	51

4.5.1	Pengumpulan Data Parameter Geoteknik Bandungan	51
4.5.2	Analisis Beban Gempa/ <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>	51
4.5.3	Analisis Stabilitas Bendungan	55
4.5.4	Analisis Statik	56
4.5.5	Analisis Dinamik.....	56
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		57
5.1	Tahapan Penelitian.....	57
5.1.1	Pengumpulan Data Parameter Geoteknik Bandungan	57
5.1.2	Penyeragaman Magnitudo Gempa	58
5.1.3	<i>Declustering Data</i>	59
5.1.4	<i>Completeness Analysis</i>	64
5.1.5	Penentuan Zona Sumber Gempa.....	69
5.1.6	Penentuan Parameter Gempa pada Zona Sumber Gempa.....	76
5.1.7	PSHA dengan R- <i>CRISIS</i>	80
5.1.8	Peta <i>Peak Ground Acceleration</i> dan <i>Spectral Response Acceleration</i>	96
5.2	Analisis Stabilitas Bendungan	104
5.2.1	Data Bendungan.....	104
5.2.2	Kelas Resiko	107
5.2.3	Koefisien Gempa Bumi	108
5.2.4	Analisis Statik Lereng Bendungan.....	111
5.2.5	Analisis Dinamik Lereng Bendungan	126
5.2.6	Perhitungan <i>Displacement</i> dengan <i>QUAKE-W</i>	130
5.2.7	Perhitungan <i>Displacement</i> dengan <i>QUAKE-W</i>	137
BAB VI PENUTUP.....		139
6.1	Kesimpulan.....	139
6.2	Saran	139
DAFTAR PUSTAKA		141
LAMPIRAN.....		144

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Tatanan Lempeng Tektoknik Utama di Indonesia.....	1
Gambar 1.2	Lokasi Bendungan Way-Apu.....	2
Gambar 3.1	Klasifikasi Umum Bendungan Urugan.....	11
Gambar 3.2	Ilustrasi Peristiwa <i>Spreading</i>	15
Gambar 3.3	Ilustrasi Gesekan Antara Dua Lempeng (a) Oblique (b) Tampak	16
Gambar 3.4	Notasi Geometris untuk Menggambarkan Interseksi Bidang Patahan ...	17
Gambar 3.5	Ilustrasi Jenis Patahan (a) <i>Normal Fault</i> , (b) <i>Strike Slip</i> , (c) <i>Reverse Fault</i>	17
Gambar 3.6	Ilustrasi Perambatan Gelombang Gempa.....	18
Gambar 3.7	Tahapan Analisis Bahaya Gempa dengan Metode PSHA	23
Gambar 3.8	Kriteria <i>Time</i> dan <i>Distance Windows</i> untuk <i>Declustering</i>	25
Gambar 3.9	Hasil Analisis Kelengkapan Data Gempa Interval 100 Tahun Jatigede ..	27
Gambar 3.10	<i>Earthquake Recurrence Model</i>	28
Gambar 3.11	Ilustrasi Pengelompokan Data Rekam Gempa	30
Gambar 3.12	Ilustrasi Hasil <i>Hazard Maps</i>	31
Gambar 3.13	Contoh Logic Tree dalam Analisis Resiko Gempa	33
Gambar 3.14	Aselogram Pemodelan Sumber Gempa <i>Megathrust</i>	37
Gambar 3.15	Proses Perhitungan Faktor Keamanan dalam FEM	38
Gambar 3.16	Displacement pada Bendungan Tigadihaji	39
Gambar 3.17	Grafik Hubungan antara G/G_{max} dan Regangan Geser Tanah Berbutir Halus	45
Gambar 3.18	Grafik Hubungan Antara Rasio Redaman dan Regangan Geser untuk Tanah Berbutir Halus.....	45
Gambar 4.1	Zona Material Pembentuk Bendungan Way - Apu.....	48
Gambar 4.2	Diagram Alir Penelitian	51
Gambar 5.1	Format Ketentuan <i>Input zMap</i>	59
Gambar 5.2	<i>Menu Utama zMap v6.0</i>	60
Gambar 5.3	Jendela <i>Import Datafile</i> pada <i>zMap</i>	60
Gambar 5.4	Jendela <i>Data Import</i> pada <i>zMap</i>	61
Gambar 5.5	Jendela <i>General Parameter</i> pada <i>zMap</i>	61
Gambar 5.6	Jendela <i>Seismicity Map</i> pada <i>zMap</i>	62

Gambar 5.7 <i>Decluster using Gardner & Knopoff</i> pada <i>zMap</i>	62
Gambar 5.8 Peta <i>Plotting</i> Rekam Data Seismik (atas: sebelum dan bawah: sesudah <i>declustering</i>)	63
Gambar 5.9 Kurva $\sigma\lambda$ terhadap interval waktu <i>T</i>	68
Gambar 5.10 Pengambilan Data Peta pada <i>Software ArcMap</i>	71
Gambar 5.11 Pengambilan Data Peta pada <i>Software ArcMap</i>	71
Gambar 5.12 Proses <i>add XY Data</i> pada <i>Software ArcMap</i>	72
Gambar 5.13 Hasil <i>Overlay Map</i> pada <i>Software ArcMap</i>	73
Gambar 5.14 Hasil <i>Georeferencing</i> pada <i>Software ArcMap</i>	73
Gambar 5.15 Proses Digitasi Zona Sumber Gempa pada <i>ArcMap</i>	74
Gambar 5.16 Proses <i>Create New Shapefile</i> pada <i>ArcMap</i>	74
Gambar 5.17 <i>Shapefile</i> yang Digunakan Sebagai <i>Source Geometry</i>	75
Gambar 5.18 Peta Zona Sumber Gempa Bendungan Way - Apu	75
Gambar 5.19 Proses <i>Add XY Data</i>	77
Gambar 5.20 Hasil <i>Plot Data</i> Rekam Gempa pada Peta Regional Maluku	78
Gambar 5.21 <i>Table Menu</i>	78
Gambar 5.22 <i>Select by Attribute</i>	79
Gambar 5.23 Tampilan Menu Utama pada <i>Software R-CRISIS</i>	82
Gambar 5.24 Hasil <i>Input Maps</i> pada Pulau Buru	83
Gambar 5.25 <i>Sites of Computation of Hazard</i>	83
Gambar 5.26 Peta Tingkat Bahaya Gempa di Sekitar Bendungan	84
Gambar 5.27 Proses <i>Add Sources Data From Shape</i>	84
Gambar 5.28 Proses <i>Geometry of the Seismic Source</i>	85
Gambar 5.29 Menu <i>Input Source Seismicity</i>	85
Gambar 5.30 Menu <i>Input Sources Seismicity</i>	86
Gambar 5.31 <i>Attenuation Data</i>	88
Gambar 5.32 <i>Attenuation Model Selection</i>	88
Gambar 5.33 <i>Construct a Hybrid GMPE</i>	89
Gambar 5.34 <i>Intensity for Each Spectral Ordinate</i>	91
Gambar 5.35 <i>Input Global Parameter</i>	92
Gambar 5.36 Proses <i>Running</i> Simulasi PSHA dengan <i>R-CRISIS</i>	93
Gambar 5.37 Informasi Keluaran dari Simulasi PSHA dengan <i>R-CRISIS</i>	94

Gambar 5.38 <i>Hazard Map</i> Hasil Simulasi PSHA dengan R-CRISIS	94
Gambar 5.39 File Hasil Simulasi PSHA dengan R-CRISIS	95
Gambar 5.40 Memuat <i>Shapefile</i> Pulau Buru	96
Gambar 5.41 Tampilan <i>Output Shapefile</i> Pulau Buru	97
Gambar 5.42 Proses Memuat Data PGA dan <i>Spectral Acceleration</i>	98
Gambar 5.43 Keluaran Data PGA dan <i>Spectral Acceleration</i>	98
Gambar 5.44 Interpolasi data PSHA (kiri: <i>Spline tool</i> , kanan: <i>mask</i> Pulau Buru).....	99
Gambar 5.45 Interpolasi data PSHA (kiri: <i>Contour tool</i> , kanan: <i>mask</i> Pulau Buru)...	99
Gambar 5.46 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 20% dalam 10 Tahun	100
Gambar 5.47 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 10% dalam 10 Tahun	101
Gambar 5.48 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 10% dalam 50 Tahun	101
Gambar 5.49 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun	102
Gambar 5.50 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun	102
Gambar 5.51 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 2% dalam 100 Tahun	103
Gambar 5.52 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 1% dalam 100 Tahun	103
Gambar 5.53 Desain Bendungan Way - Apu	106
Gambar 5.54 Jendela <i>Define Analysis</i>	113
Gambar 5.55 Jendela <i>Define Materials</i>	114
Gambar 5.56 Jendela Pembuatan Analisis Baru untuk <i>SEEP/W</i>	116
Gambar 5.57 Jendela <i>Define Volume Water Content Function</i>	116
Gambar 5.58 Jendela <i>Define Boundary Condition</i>	119
Gambar 5.59 Jendela <i>Draw Boundary Condition</i>	119
Gambar 5.60 Analisis <i>SLOPE/W</i> (Statis, masa konstruksi selesai, tanpa gempa)	124
Gambar 5.61 Analisis <i>SLOPE/W</i> (Statis, NWL D/S Gempa $y/h=0,25$).....	124
Gambar 5.62 Analisis <i>SLOPE/W</i> (<i>Stability, rapid drawdown</i> , tanpa gempa).....	125

Gambar 5.63 Analisis <i>SLOPE/W</i> (<i>Slope stability, rapid drowdown, Gempa MDE</i> <i>y/h=0,25</i>).....	125
Gambar 5.64 Menentukan Respon Spektrum Gempa	126
Gambar 5.65 Mendefinisikan Respon Spektrum Gempa	127
Gambar 5.66 <i>Function Definition</i> pada Respon Spektrum Gempa	127
Gambar 5.67 Pembuatan <i>Time History</i> Gempa	128
Gambar 5.68 Pendefinisian Fungsi <i>Time History</i>	129
Gambar 5.69 Grafik Fungsi <i>Time History</i>	129
Gambar 5.70 Pembuatan File Analisis <i>QUAKE/W</i> Baru	130
Gambar 5.71 <i>Input</i> Properti Material pada <i>QUAKE/W</i>	131
Gambar 5.72 Pembuatan Analisis <i>QUAKE/W</i> Tipe Dinamik	132
Gambar 5.73 Pendefinisian <i>Horizontal Earthquake</i>	132
Gambar 5.74 Pendefinisian <i>Horizontal Earthquake Record</i>	133
Gambar 5.75 Penentuan <i>Boundary Condition</i>	133
Gambar 5.76 Penentuan Penggambaran Grafik.....	134
Gambar 5.77 <i>Crest Displacement</i> (<i>x-displacement</i>).....	135
Gambar 5.78 <i>Crest Displacement</i> (<i>y-displacement</i>).....	135
Gambar 5.79 <i>Crest Displacement</i> Kondisi Air Normal.....	136
Gambar 5.80 <i>Crest Displacement</i> Kondisi <i>Rapid Drowdown</i>	137
Gambar 5.81 <i>Crest Displacement</i> Kondisi Setelah Konstruksi.....	137



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian.....	1
Tabel 3.1 Parameter Bendungan Urugan.....	12
Tabel 3.2 Berat Jenis Tanah.....	13
Tabel 3.3 Parameter Kelas Batuan.....	14
Tabel 3.4 Korelasi Konversi Skala Magnitudo di Indonesia.....	20
Tabel 3.5 Korelasi Konversi Skala Magnitudo di Indonesia.....	33
Tabel 3.6 Klasifikasi Situs.....	34
Tabel 3.7 Koefisien Situs F_{PGA}	35
Tabel 3.8 Nilai <i>Safety Factor</i> Minimum.....	38
Tabel 3.9 Kriteria Faktor Risiko Evaluasi Keamanan Bendungan.....	40
Tabel 3.10 Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air.....	41
Tabel 3.11 Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan.....	41
Tabel 3.12 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah.....	42
Tabel 3.13 Nilai <i>Poisson Ratio</i> untuk Berbagai Jenis Tanah.....	43
Tabel 3.14 Rangkuman Persamaan G_{max} dan Angka Pori.....	44
Tabel 4.1 Parameter Desain Material Timbunan Bendungan Way - Apu.....	47
Tabel 4.2 Nilai Faktor Kemanan (FK) Minimum untuk Bendungan Urugan.....	56
Tabel 5.1 Parameter Bendungan Urugan.....	57
Tabel 5.2 Rekapitulasi Data Rekam Seismik.....	58
Tabel 5.3 Konversi Skala Magnitudo.....	59
Tabel 5.4 Perbandingan Katalog Seismik setelah <i>Declustering</i>	64
Tabel 5.5 Rentang Magnitudo Seismik.....	65
Tabel 5.6 Interval Waktu Seismik.....	65
Tabel 5.7 Perhitungan Magnitudo setiap Durasi Tahun.....	66
Tabel 5.8 Perhitungan Magnitudo pada Interval Waktu.....	67
Tabel 5.9 Interval <i>Completeness dari Data Gempa</i>	69
Tabel 5.10 Sumber Gempa di sekitar Pulau Buru yang digunakan dalam analisis PSHA.....	80
Tabel 5.11 Parameter Gempa pada PSHA.....	86
Tabel 5.12 Parameter Gempa pada PSHA.....	90

Tabel 5.13 Parameter Gempa pada PSHA.....	92
Tabel 5.14 Hasil Perhitungan PSHA untuk Titik Lokasi pada Bendungan Way - Apu	95
Tabel 5.15 Data Material Bendungan Way - Apu	105
Tabel 5.16 Ketinggian Muka Air Bendungan.....	107
Tabel 5.17 Perhitungan Kelas Risiko Bendungan Way - Apu	107
Tabel 5.18 Koefisien Gempa PGA	108
Tabel 5.19 Koefisien Gempa PGA pada Bendungan Way - Apu.....	109
Tabel 5.20 Koefisien Gempa Termodifikasi Bendungan Way - Apu.....	110
Tabel 5.21 Koefisien Gempa Termodifikasi Bendungan Way - Apu.....	111
Tabel 5.22 Koefisien Gempa Termodifikasi Bendungan Way - Apu.....	112
Tabel 5.23 Material dalam Simulasi Analisis <i>Slope/W</i>	114
Tabel 5.24 Hasil Simulasi Analisis Statis Bendungan Tanpa Gempa	120
Tabel 5.25 Hasil Simulasi Analisis Statis Bendungan Gempa OBE	121
Tabel 5.26 Hasil Simulasi Analisis Statis Bendungan Gempa MDE	122
Tabel 5.27 Nilai Parameter PSHA yang digunakan	128
Tabel 5.28 Hasil Analisis Dinamik Lereng Bendungan Way - Apu	136
Tabel 5.29 Hasil Perhitungan Faktor Keamanan untuk Beban Gempa Dinamik	138

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Cuplikan Katalog Gempa	Error! Bookmark not defined.	144
Lampiran 2 Peta Sumber Patahan dan Megathrust		146
Lampiran 3 Peta PGA dan Spectral Acceleration		149
Lampiran 4 Hasil Analisis Statis dengan GeoStudio		157
Lampiran 5 Hasil Analisis Dinamik dengan GeoStudio		210



ABSTRAK

Sebagai negara yang terletak pada daerah *Ring Of Fire*, Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki aktifitas seismik yang cukup tinggi dan rawan terhadap bahaya gempa, sehingga segala macam konstruksi di Indonesia harus lebih mengutamakan beban yang bekerja secara lateral yang berupa beban gempa, terutama bangunan sipil yang beresiko tinggi seperti bendungan urugan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi bahaya gempa (*seismic hazard*) serta stabilitas bendungan pada bendungan Way Apu yang terletak di Kec. Waepo, Kab. Buru, yang merupakan bagian dari Provinsi Maluku. Penelitian ini menggunakan metode PSHA (*Pseudostatic Seismic Hazard Analysis*) untuk mengetahui potensi bahaya gempa pada lokasi bendungan, serta analisis metode statik dan dinamik untuk mengetahui stabilitas bendungan yang ditinjau, dengan acuan SNI 8064:2016 dan Pd-T 14-2004-A sebagai acuan.

Hasil dari PSHA (*Pseudostatic Seismic Hazard Analysis*) menunjukkan bahwa Bendungan Way - Apu dikategorikan dalam klasifikasi kelas risiko IV (ekstrem) dengan nilai tingkat risiko sebesar 34 point, dan dari hasil analisis stabilitas bendungan menggunakan metode statis dan dinamis menunjukkan bahwa Bendungan Way-Apu memenuhi kriteria angka keamanan

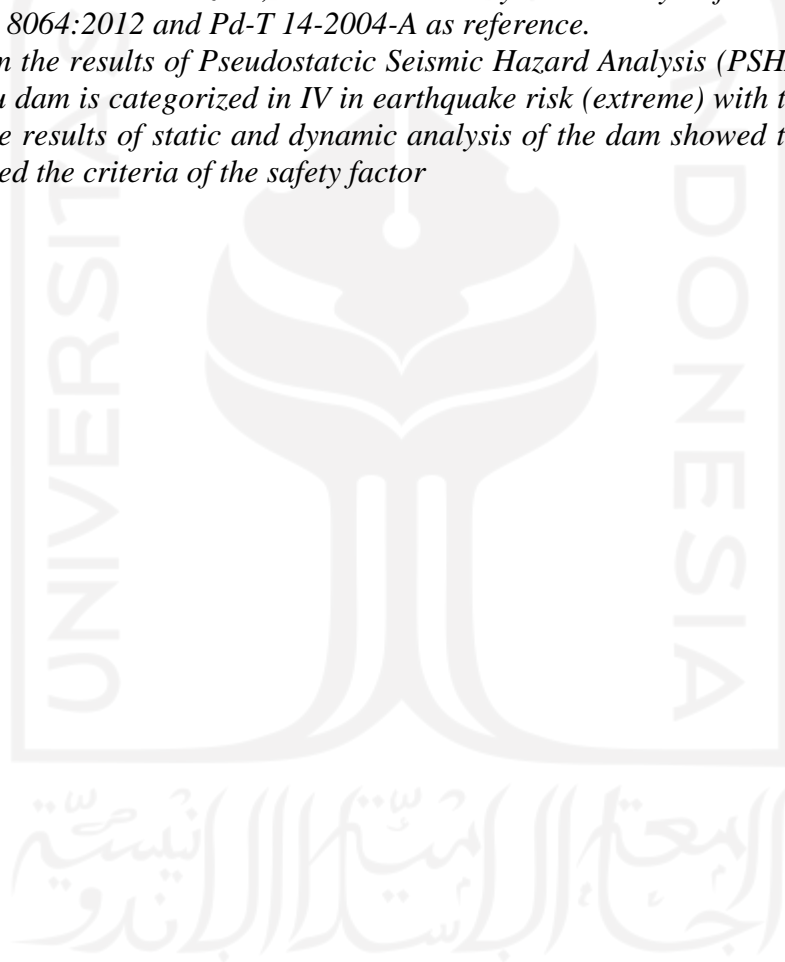
Kata Kunci: *Ring of Fire*, Bendungan Way-Apu, Stabilitas, PSHA, Bendungan Urugan.

ABSTRACT

As a nation that's situated in the Ring of Fire, Indonesia is a nation that have quite high seismic and vulcanic activites, and are vulnerable to earthquakes. Therefore the buildings that are being constructed must calculate the lateral load that is applied on the building, in this case, earthquake load, on most of the building that have a high risk when structural failure happens, like earthfill dams.

The point of this study is to understand the seismic hazard and the dam stability of Way – Apu dam that's located approximately in the Waepo sub-district, of the Buru District, from the Province of Maluku, using Pseudostatic Seismic Hazard Analysis (PSHA) for the seismic hazard, and Static and Dynamic analysis for the dam stability using, SNI 8064:2012 and Pd-T 14-2004-A as reference.

From the results of Pseudostatic Seismic Hazard Analysis (PSHA) showed that Way – Apu dam is categorized in IV in earthquake risk (extreme) with the risk point of 34, and the results of static and dynamic analysis of the dam showed that Way – Apu dam fulfilled the criteria of the safety factor

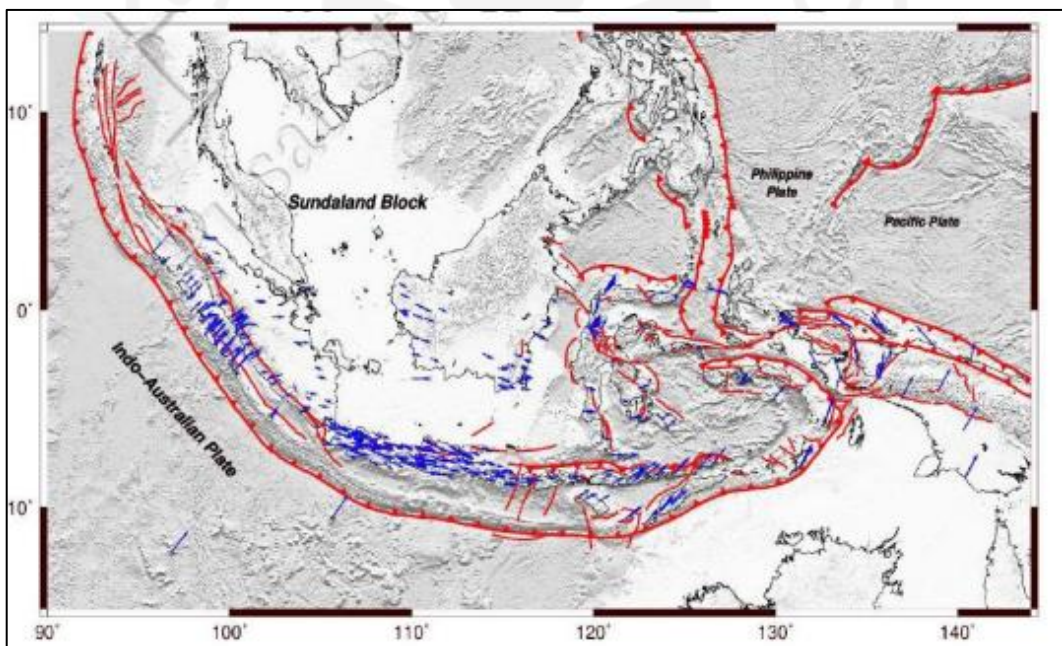


BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

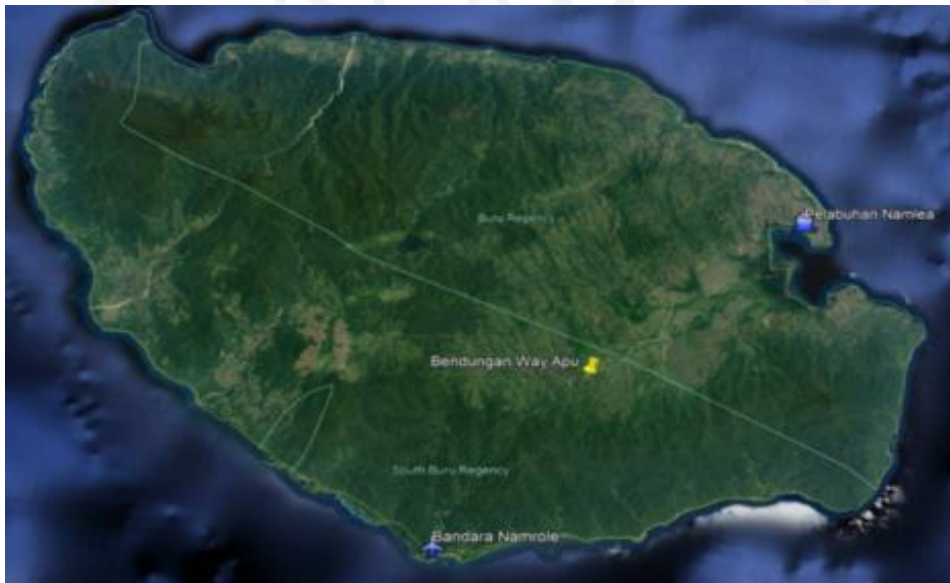
Indonesia merupakan negara yang terletak di antara tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng *Eurasia*, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Interaksi antara ketiga lempeng tersebut dan kawasan Indonesia yang terletak pada daerah *Ring of Fire* menyebabkan Indonesia menjadi salah satu negara yang memiliki aktifitas seismik dan vulkanik paling tinggi di dunia dan rawan terhadap bahaya gempa, konstruksi bendungan di Indonesia tidak hanya perlu memperhatikan kestabilan terhadap keruntuhan akibat massa tanah saja, namun juga kestabilan bendungan terhadap beban gempa yang bekerja pada dalam berbagai kondisi muka air waduk. Tatanan lempeng tektonik utama Indonesia disajikan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Tatanan Lempeng Tektoknik Utama di Indonesia (Pusgen, 2017)

Gempa besar yang terjadi dapat menyebabkan kerusakan dan keruntuhan bangunan atau infrastruktur yang mengakibatkan kerugian besar baik dalam bentuk kerugian nyawa ataupun untuk proses rekonstruksi dan rehabilitasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji stabilitas bendungan urugan Way-Apu terhadap beban

gempa. Bendungan Way-Apu merupakan bendungan urugan zonal inti tegak yang terletak pada daerah Kecamatan Waepo, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku yang memiliki fungsi utama sebagai pengendali aliran sungai Way-Apu agar tidak terjadinya banjir pada semua daerah irigasi, khususnya sebagian besar wilayah Kecamatan Waeapo maupun wilayah Kecamatan Waelata serta kecamatan lainnya pada umumnya. Letak geografis Bendungan Way-Apu dapat dilihat pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2 Lokasi Bendungan Way-Apu
(Google Earth, 2022)

Data rekam historis kegempaan yang mempengaruhi Pulau Buru, meliputi gempa pada bulan Juli tahun 2019 dengan magnitudo 7,2 dan pada bulan september tahun 2019 dengan magnitudo 6,2 yang menyebabkan kerusakan terhadap bangunan serta infrastruktur pada Kota Ambon, Kabupaten Buru, dan Kabupaten Halmahera selatan, oleh karena itu, evaluasi terhadap infrastruktur harus mempertimbangkan adanya resiko bahaya kegempaan yang tinggi.

Metode yang akan digunakan untuk menganalisis bahaya kegempaan adalah *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dan metode stabilitas dinamik bendungan dengan menggunakan metode dinamik dengan *time history*. Penentuan metode tersebut ditentukan dalam peraturan perencanaan yang berlaku di Indonesia, yaitu SNI 8064:2016 dan Pd-T 14-2004-A untuk analisis bendungan urugan terhadap beban gempa.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut ini.

1. Bagaimana stabilitas statik lereng bendungan pada kondisi tanpa beban gempa, OBE (*Operational Basis earthquake*) dan MDE (*Maximum Design Earthquake*) baik pada bagian hulu dan hilir dengan beberapa variasi muka air waduk ?
2. Bagaimana stabilitas dinamik lereng bendungan pada kondisi MDE (*Maximum Design Earthquake*) baik pada bagian hulu dan hilir dengan beberapa variasi muka air waduk ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Way-Apu Terhadap Beban Gempa adalah sebagai berikut.

1. Memperoleh stabilitas statik lereng bendungan pada kondisi tanpa beban gempa, OBE (*Operational Basis earthquake*) dan MDE (*Maximum Design Earthquake*) baik pada bagian hulu dan hilir dengan beberapa variasi muka air waduk
2. Memperoleh stabilitas dinamik lereng bendungan pada kondisi MDE (*Maximum Design Earthquake*) baik pada bagian hulu dan hilir dengan beberapa variasi muka air waduk

1.4 Manfaat Penelitian

Harapan dengan dilaksanakannya penelitian ini adalah memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Manfaat Akademisi

Untuk memperluas pengetahuan di bidang teknik sipil terutama dalam analisis stabilitas tubuh bendungan terhadap beban gempa, serta memberikan pemahaman mengenai pengaruh kegempaan terhadap bendungan.

2. Manfaat Praktis

Sebagai pertimbangan dan rekomendasi bagi instansi pengelola Bendungan Way-Apu terhadap evaluasi keamanan Bendungan terhadap beban gempa terbaru tahun 2022.

1.5 Batasan Masalah

Adapun agar tugas akhir ini tidak meluas permasalahannya dan dapat terarah dengan baik sesuai tujuan awal penelitian, maka perlu ditetapkan batasan penelitian. Batasan-batasan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Bendungan tinjauan adalah bendungan Way-Apu yang berada pada wilayah administratif berada di wilayah Kecamatan Waepo, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku.
2. Bendungan Way-Apu merupakan bendungan urugan tipe zonal dengan inti tegak.
3. Data parameter material bendungan yang digunakan adalah data sekunder, yang meliputi data material tubuh bendungan dan batuan dasar.
4. Data rekam gempa yang digunakan diperoleh dari katalog gempa USGS dan ISC dari tahun 1900-2018 dengan radius 500 km dan kedalaman 300 km dari lokasi bendungan tinjauan.
5. Standar yang digunakan dalam analisis adalah SNI 8064:2016, Pd-T 14-2004-A, Analisa Dinamik Bendungan Urugan (PU Balai Bendungan), serta peta gempa tahun 2017.
6. Abakus liquifaksi dan penurunan akibat gempa tidak dilakukan
7. Kondisi air diasumsikan statik saat kondisi gempa.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi-referensi penelitian yang berkaitan dengan subyek dan objek penelitian. Penelitian penelitian terdahulu yang membahas tentang stabilitas bendungan yang dijadikan sebagai acuan untuk penelitian tugas akhir ini antara lain adalah sebagai berikut:

2.1.1 Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Tipe Urugan Zonal Inti Tegak dengan Perkuatan Timbunan terhadap Beban Gempa

Ibrahim (2017) dalam penelitian tugas akhirnya yang berjudul “Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Tipe Urugan Zonal Inti Tegak dengan Perkuatan Timbunan terhadap Beban Gempa” merupakan penelitian tentang stabilitas bendungan urugan tipe zonal inti tegak terhadap perkuatan timbunan terhadap beban gempa dengan bendungan tinjauan berlokasi pada Jawa Barat.

Dalam analisis yang dilakukan, peneliti menggunakan *software GeoStudio* untuk menganalisis stabilitas tubuh bendungan menggunakan metode analisis statik, pseudostatik, dan analisis dinamik yang dilakukan pada bagian hulu dan hilir bendungan dengan kondisi dengan dan tanpa perkuatan timbunan, dengan variasi muka air waduk meliputi waduk kosong (elevasi +180 m), *intermediate* (elevasi +260 m), normal (elevasi +260 m), dan banjir (elevasi +262 m), dengan input beban gempa yang digunakan berupa beban gempa *time history* dengan kala ulang 100 tahun dan kala ulang 10.000 tahun (Ibrahim, 2017).

Hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Ibrahim adalah angka *safety factor*, percepatan maksimum dengan kala ulang 500 tahun, 2500 tahun, dan 10000 tahun, serta nilai displacement bendungan terhadap tiap kondisi muka air waduk (Ibrahim, 2017).

2.1.2 Analisis Stabilitas dan Respon Dinamik terhadap Displacement selama Gempa pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak

Aulawi (2018) pada penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis Stabilitas dan Respon Dinamik terhadap *Displacement* selama Gempa pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak” merupakan penelitian tentang stabilitas bendungan urugan zonal inti tegak terhadap *displacement* selama gempa dengan objek penelitian tersebut adalah Bendungan Sutami, yang terletak pada Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur.

Dari hasil analisis yang dilakukannya, dengan bantuan *software GeoStudio* 2018, untuk pemodelan analisis stabilitas bendungan, *ArcGIS* untuk pemodelan sumber area kejadian gempa, serta *Microsoft Excel* untuk membantu dalam pengolahan data gempa dan perhitungan input parameter material tubuh dan pondasi bendungan, dengan analisis stabilitas bendungan dilakukan menggunakan metode statik dan dinamik, dan analisis beban gempa menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) (Aulawi, 2018).

Hasil penelitian yang dilakukan Aulawi (2018) ditemukan nilai *safety factor* pada bagian hulu dan hilir pada saat kondisi muka air waduk kosong yaitu, 2,156 dan 1,802, pada kondisi muka air normal 2,147 dan 2,147, serta pada kondisi muka air banjir yaitu sebesar 2,088 dan 1,825.

2.1.3 Analisis Stabilitas Statik dan Stabilitas Dinamik menggunakan Parameter *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak

Dewi (2018) pada penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis Stabilitas Statik dan Stabilitas Dinamik menggunakan Parameter *Safety Evaluation Earthquake* (SEE) Pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak” merupakan penelitian tentang analisis stabilitas bendungan urugan zonal inti tegak, menggunakan metode statik dan dinamik dengan parameter *Safety Evaluation Earthquake* (SEE), dengan objek penelitian merupakan Bendungan Kedung Ombo, yang berlokasi di Desa Rambat, Kecamatan Geyer, Kabupaten Grobongan, Provinsi Jawa Tengah.

Dalam analisis yang dilakukannya, dengan menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) untuk mencari beban gempa, serta metode statik, dan dinamik untuk mengetahui stabilitas bendungan, diketahui bahwa pada elevasi

muka air waduk kosong (elevasi +60 m), elevasi muka air waduk normal (elevasi +90 m), dan elevasi muka air waduk saat banjir (elevasi +95 m) (Dewi, 2018).

Hasil dari penelitian ini menunjukkan nilai *safety factor* pada bagian hulu dan hilir bendungan adalah masing masing, 1,895, dan 1,877; 1,690 dan 1,822; 1,619 dan 1,886 dimana angka tersebut melebihi faktor keamanan minimum yaitu, 1,5 pada saat elevasi muka air waduk kosong, 1,3 pada saat elevasi muka air normal, dan 1,5 pada saat elevasi muka air waduk saat banjir, dan percepatan gempa maksimum (*peak ground acceleration*) pada kala ulang 500 tahun adalah 0,11 g; kala ulang 2500 tahun adalah 0,302 g; serta pada kala ulang 10000 tahun adalah sebesar 0,44 g (Dewi, 2018).

2.1.4 Analisis Stabilitas Bendungan menggunakan Metode Bishop dan Perhitungan Rembesan dengan Pendekatan Metode Cassagrande

Sandi (2020) pada penelitian tugas akhir yang berjudul “Analisis Stabilitas Bendungan menggunakan Metode Bishop dan Perhitungan Rembesan dengan Pendekatan Metode Cassagrande” merupakan penelitian tentang stabilitas bendungan serta rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan, dimana bendungan yang dijadikan tinjauan dalam penelitian tersebut adalah Bendungan Pondok, yang terletak di daerah Desa Dero, Kecamatan Beringin, Kabupaten Ngawi, Provinsi Jawa Timur.

Sandi (2020) dalam analisis yang dilakukan pada penelitiannya, dia menggunakan *software GeoStudio* untuk mengetahui gaya gaya yang bekerja pada tubuh bendungan, dimana hasil simulasi tersebut akan dibandingkan dengan perhitungan menggunakan metode bishop.

Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah nilai *safety factor* dari bendungan tanpa adanya beban gempa yaitu 2,479 pada kondisi elevasi muka air waduk kosong, 1,511 pada elevasi muka air waduk normal, dan 1,084 kondisi muka air banjir (Sandi, 2020).

2.2 Keaslian Penelitian

Tugas akhir ini dikerjakan dengan tujuan untuk menganalisis stabilitas bendungan dengan menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) untuk mengetahui beban gempa, serta analisis statik dan dinamik untuk mengetahui stabilitas tubuh bendungan, serta dengan bantuan *software GeoStudio*.

Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui nilai *safety factor* dari bendungan tinjauan terhadap beban gempa pada saat elevasi muka air waduk kosong, elevasi muka air waduk normal, dan elevasi muka air waduk saat banjir, yang dimana bendungan tinjauan tersebut adalah Bendungan Way-Apu yang berada di daerah Kecamatan Waepo, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku. Adapun terdapat Persamaan dan perbedaan antara tugas akhir ini dan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Hal tersebut tertera pada Tabel 2.1.



Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian

No	Peneliti	Judul	Metode	Tujuan	Persamaan	Perbedaan
1	Pradana (2012)	Analisis Struktur Bendungan Krenceng Terhadap Gempa	Pseudostatik dan dinamik	<i>Nilai safety factor</i>	Tujuan	Metode dan Objek Penelitian
2	Ilham (2015)	Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan pada Bendungan Utama Tugu Kabupaten Trenggalek	Pseudostatik	<i>Nilai safety factor</i>	Tujuan	Metode dan Objek Penelitian
3	Ibrahim (2017)	Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Tipe Zonal Inti Tegak dengan Perkuatan Timbunan Terhadap Beban Gempa	Statik, pseudostatik, dan dinamik	<i>Nilai safety factor</i>	Tujuan	Objek Penelitian
4	Aulawi (2018)	Analisis Stabilitas Statik dan Respon Dinamik Terhadap <i>Displacement</i> pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak	Statik, dan Dinamik	<i>Nilai safety factor</i>	Metode dan Tujuan	Objek Penelitian
5	Dewi (2018)	Analisis Stabilitas Statik dan Stabilitas Dinamik Menggunakan Parameter <i>Safety Evaluation Earthquake</i> (SEE) pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak	Statik, dan Dinamik	<i>Nilai safety factor</i>	Metode dan Tujuan	Objek Penelitian
6	Paransa (2023)	Analisis Stabilitas Tubuh Bendungan Way-Apu Terhadap Beban Gempa	Statik dan Dinamik	<i>Nilai safety factor</i>		

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Bendungan Urugan

Bendungan urugan adalah bendungan yang dibangun dari timbunan bahan-bahan seperti batu, krakal, kerikil, pasir serta tanah ada komposisi tertentu berfungsi sebagai pengangkat permukaan air yang terdapat dalam waduk (Sosrodarsono, 1977). Secara garis besar tubuh bendungan dapat digolongkan menjadi tiga golongan, yaitu bendungan urugan homogen, bendungan urugan zonal, bendungan urugan bersekat.

Bendungan tipe urugan zonal adalah bendungan yang memiliki gradasi butiran tanah penyusun yang berbeda masing-masing lapisan tertentu. Pada bendungan dengan tipe zonal, material penyangga bendungan dibebankan pada urugan yang mampu meloloskan air. Sedangkan material kedap air digunakan sebagai urugan yang menahan air. Berdasarkan pada letak dan kedudukan dari zona kedap airnya, bendungan tipe zonal dibagi menjadi tiga, yaitu sebagai berikut ini.

1. Bendungan urugan zonal dengan tirai kedap air, dimana zona kedap air membentuk lereng udik bendungan tersebut.
2. Bendungan urugan zonal dengan inti kedap air miring, dimana zona kedap airnya terletak didalam tubuh bendungan dan berkedudukan miring ke arah hilir
3. Bendungan dengan urugan zonal dengan inti kedap air tegak, dimana zona kedap airnya terletak didalam tubuh bendungan dengan kedudukan vertikal. Biasanya inti dari tubuh bendungan terletak pada bagian tengah. Ilustrasi dari masing masing klasifikasi bendungan urugan dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Type:	Skema Umum	Keterangan
Bendungan Homogen		Apabila 80% dari seluruh bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang bergradasi hampir sama.
Bendungan Zonal	Bendungan Tirai 	Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan tirai kedap air di udiknya.
	Bendungan Inti miring 	Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.
	Bendungan Inti vertikal 	Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.
Bendungan Sekat		Apabila bahan pembentuk tubuh bendungan terdiri dari bahan yang lulus air, tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lulus air di lereng udiknya, yang biasanya terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, dll. nya.

Gambar 3.1 Klasifikasi Umum Bendungan Urugan
(Sumber: Sosrodarsono, 1977)

Parameter bahan urugan diperkirakan berdasarkan dari data geologi lokal dan hasil uji laboratorium serta pengalaman. Bahan urugan dapat berupa batu, pasir kerikilan dan tanah lempungan yang dianjurkan berasal dari lokasi rencana bendungan. Pada dasarnya bahan dari konstruksi bendungan dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu sebagai berikut ini.

1. Batuan.

Batu digunakan sebagai pengisi lapisan lulus air atau semi lulus air pada bendungan zonal sekaligus sebagai lapisan pelindung (*rip rap*) pada lereng udik.

2. Pasir dan kerikil

Pasir dan kerikil digunakan sebagai bahan urugan bendungan sekaligus berfungsi sebagai lapisan filter dan lapisan transisi bendungan.

3. Tanah lempung

Tanah lempungan merupakan bahan utama bendungan urugan sebagai bahan dengan kededapan yang tinggi. Tanah lempungan digunakan

sebagai bahan utama bendungan dengan tipe urugan tanah homogin maupun bendungan zonal.

Sebagai acuan parameter material bendungan urugan digunakan standar SNI 8264:2016 yang didasarkan pada klasifikasi “*Unified Soil Classification System*” (USCS). Parameter tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Parameter Bendungan Urugan

Kelas USCS	Tipe Tanah	<i>MDD</i> (t/m ³)	<i>OMC</i> (%)	ϕ' (°)	c' (t/m ²)
GW	Kerikil gradasi baik, campuran kerikil pasiran	>1,91	<13,3	>38	-
GP	Kerikil gradasi buruk, campuran kerikil pasiran	>1,76	<12,4	>37	-
GM	Kerikil lanau, kerikil pasiran lanauan gradasi buruk	>1,83	<14,5	>34	-
GC	Kerikil lempungan kerikil pasiran lempungan gradasi buruk	>1,84	<14,7	>31	-
SW	Pasir gradasi baik, campuran pasir kerikilan	1,91± 0,08	13,3±2,5	38±1	-
SP	Pasir gradasi buruk, campuran pasir kerikilan	1,76±0,03	12,4±1,0	37±1	-
SM	Pasir lanauan, pasir lanau gradasi buruk	1,83±0,02	14,5±0,4	34±1	2,01±0,67
SM-SC	Pasir lanuan lempungan plastisitas rendah	1,91±0,02	12,8±0,5	33±3	1,44±0,57
SC	Pasir lempungan campuran pasir lempungan gradasi buruk	1,84±0,02	14,7±0,4	31±3	1,15±0,57
ML	Lanau anorganik dan lanau lempungan	1,65±0,02	19,2±0,7	32±2	0,86
ML-CL	Campuran lanau anorganik dan lempung	1,75±0,03	16,8±0,7	32±2	2,20
CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai medium	1,73±0,02	17,3±3,0	28±2	1,34±0,19
OL	Lanau organik dan lanau lempungan dengan plastisitas rendah	-	-	-	-
MH	Lanau lempungan anorganik, lanau elastis	1,31±0,06	36,3±3,2	25±3	2,01±0,86

Kelas USCS	Tipe Tanah	MDD (t/m ³)	OMC (%)	ϕ' (°)	c' (t/m ²)
CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi	1,51±0,03	25,5±1,2	19±5	1,15±0,57
OH	Lempung dan lempung lanauan organik	-	-	-	-
Pt	Tanah menganndung gambut dan organik	-	-	-	-

(Sumber: SNI 8064:2016)

Untuk mendapatkan parameter lain berupa *specific grafity*, angka pori (e), dan berat volume tanah, digunakan rumus persamaan dan tabel korelasi yang disajikan yang pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Berat Jenis Tanah

Jenis Tanah	Specific Gravity
Kerikil	2,65-2,68
Pasir	2,65-2,68
Lanau Anorganik	2,62-2,68
Lempung Organik	2,58-2,62
Lempung Anorganik	2,68-2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25-1,8

(sumber : Hardiyatmo, 2010)

Untuk mendapatkan parameter tanah angka pori dan berat volume tanah digunakan Persamaan sebagai berikut:

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (3.1)$$

$$\gamma_b = \frac{G_s \cdot \gamma_w \cdot (1+w)}{1+e} \quad (3.2)$$

$$\gamma_b = \frac{\gamma_w \cdot (G_s+e)}{1+e} \quad (3.3)$$

Dengan :

- e : Angka pori
 G_s : *Specific gravity*
 W : Kadar Air (%)
 γ_b : Berat volume basah (kN/m^3)
 γ_b : Berat volume jenuh (kN/m^3)

Klasifikasi kelas batuan untuk konstruksi bendungan dan batuan dasar digunakan acuan *Indonesia National Committee On Large Dam* (INACOLD, 2017). Parameter kelas batuan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Parameter Kelas Batuan

Kelas Batuan	Modulus elastisitas (kgf/cm^2)	Kuat Geser		Kecepatan gelombang geser (m/sec)
		Kohesi (kgf/cm^2)	Sudut geser dalam ($^\circ$)	
CH	60000	20	45	2500
CM	24000	10	35	1800
CL	12000	8	30	1500
D	6000	5	28	1200

(Sumber: Inacold, 2017)

3.2 Gempa Bumi

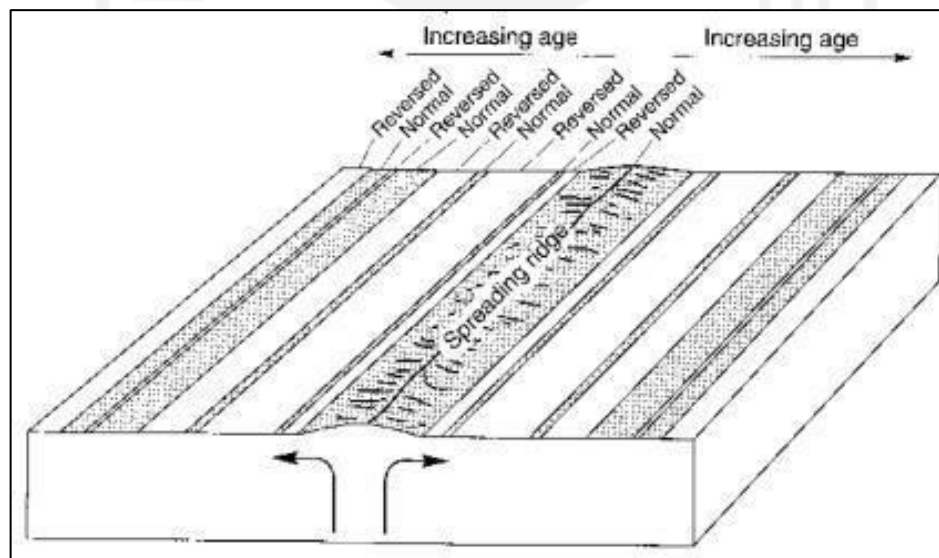
Gempa bumi merupakan peristiwa pelepasan energi secara tiba-tiba yang mengakibatkan bergetarnya bumi. Gempa bumi biasanya ditandai dengan adanya patahan suatu lapisan batuan pada kerak bumi ditempat titik pusat gempa. Energi yang dilepaskan merupakan hasil dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik yang dipancarkan kesegala arah berupa gelombang (Chopra, 1995).

Teori yang terkenal dalam menjelaskan tentang terjadinya gempa bumi adalah teori lempeng tektonik. Teori tersebut menjelaskan bahwa lapisan terluar dari bumi terdiri dari *litosfer* dan *antenosfer*. *Litosfer* adalah lapisan padat dan kaku yang membentuk kerak dan bagian luar matel bagian atas yang berada di atas lapisan *antenosfer*. Lapisan *antenosfer* adalah lapisan yang berada dibawah *litosfer* yang bersifat plastis dan berwujud seperti cairan. Lempengan-lempengan *litosfer* akan bergerak satu sama lain yang mengakibatkan deformasi pada zona

batas pertemuan antar lempeng. Deformasi terjadi pada zona batas antara lempeng, maka titik gempa akan terpusat di dekat batas lempeng (Kramer, 1996).

Pergerakan lempeng terbagi menjadi tiga jenis pergerakan berdasarkan pada karakteristik dari lempeng yaitu pergerakan lempeng yang saling menjauh (*Spreading*), pergerakan lempeng yang saling mendekat membentuk zona subduksi, dan saling bergesekan (*transform*).

Pergerakan lempeng saling menjauh (*spreading*) terjadi ketika magma dari bagian bawah mantel bergerak perlahan ke permukaan akibat dari aktivitas seismik, saat magma tersebut mencapai permukaan dan dingin akan menjadi bagian dari *spreading*. Peristiwa ini biasanya terjadi apabila terdapat gugusan aktivitas vulkanis seperti yang terjadi di Islandia dimana terdapat gugusan aktivitas vulkanis yang *continous*. Lapisan magma yang mendingin tersebut mencapai permukaan akan mengandung sifat magnet dengan polaritas tergantung pada arah medan magnet dari bumi pada saat itu. Hal ini dikarenakan medan magnet bumi secara geologis berubah dan berbalik arah dengan interval waktu yang tidak menentu. Peristiwa *spreading* di ilustrasikan pada Gambar 3.2.

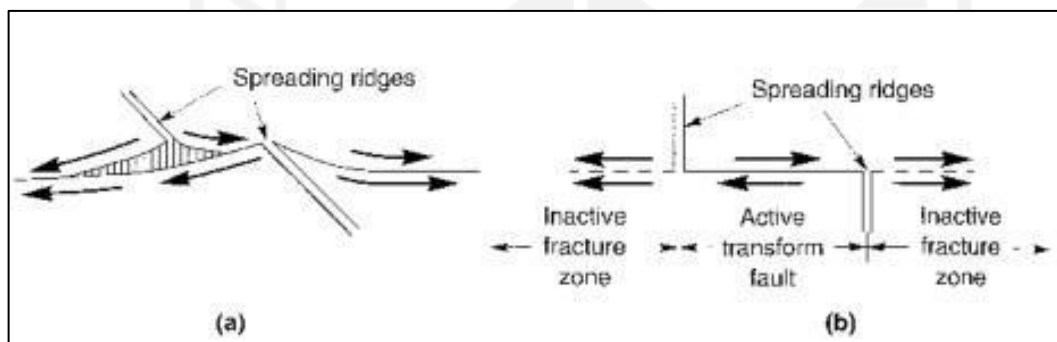


Gambar 3.2 Ilustrasi Peristiwa *Spreading*
(Sumber: Kramer, 1996)

Zona subduksi sering ditemukan pada pertemuan antara dua lempeng

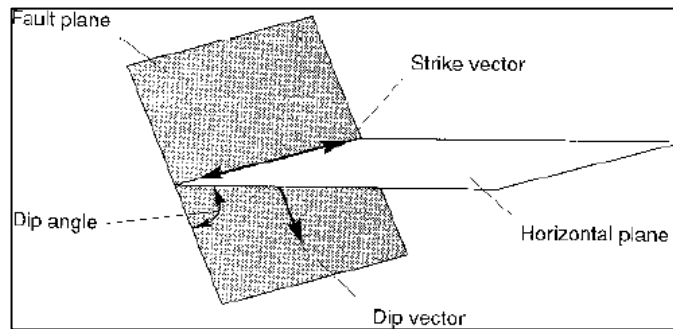
besar. Karena lempeng samudra biasanya padat mengakibatkan lempeng mengalami penurunan karena berat sendiri dibawah lempeng besar lain yang lebih ringan. Lempeng yang mengalami subduksi menjadi *ductile* dan sangat berpotensi mengakibatkan gempa bumi (Kramer,1996).

Lempeng yang saling bergesekan terjadi saat lempeng bergerak cepat satu sama lain tanpa memunculkan lempeng baru atau merusak lempeng yang sudah ada. Bagian lempeng dimana terjadi gesekan biasanya terdapat anomali medan magnet yang menimbulkan celah yang disebut *fracture zone* dengan panjang mencapai ribuan kilometer. Kedua lempeng yang bergesekan bergerak searah pada kedua sisi dari *fracture zone* dengan pergerakan yang bermacam-macam. Pergerakan lempeng di ilustrasikan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Ilustrasi Gesekan Antara Dua Lempeng (a) Oblique (b) Tampak
(Sumber: Kramer, 1996)

Patahan (*fault*) dapat mengakibatkan gempa bumi. Patahan dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan geometri dan pergerakannya. Penggambaran orientasi sebuah patahan digunakan istilah tunjaman (*dip*) dan tabrakan (*strike*). Tabrakan merupakan garis horizontal yang terbentuk akibat dari interseksi dari bidang patahan dan bidang horizontal. Garis vertikal kebawah akibat interseksi antara bidang patahan dengan bidang horizontal disebut tunjaman. Sudut yang terbentuk antara bidang patahan dengan bidang horizontal yang diukur tegak lurus dari tabrakan disebut *dip angle*. Notasi geometris untuk menggambarkan interseksi bidang patahan di ilustrasikan pada Gambar 3.4.

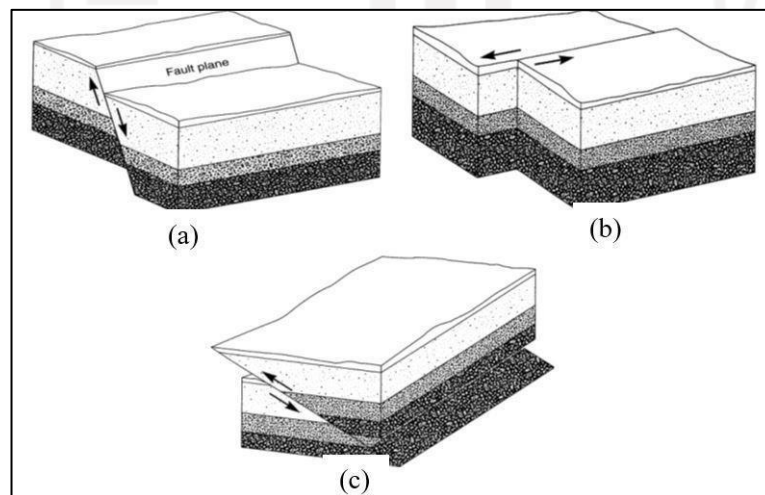


Gambar 3.4 Notasi Geometris untuk Menggambarkan Interseksi Bidang Patahan
(Sumber: Kramer, 1996)

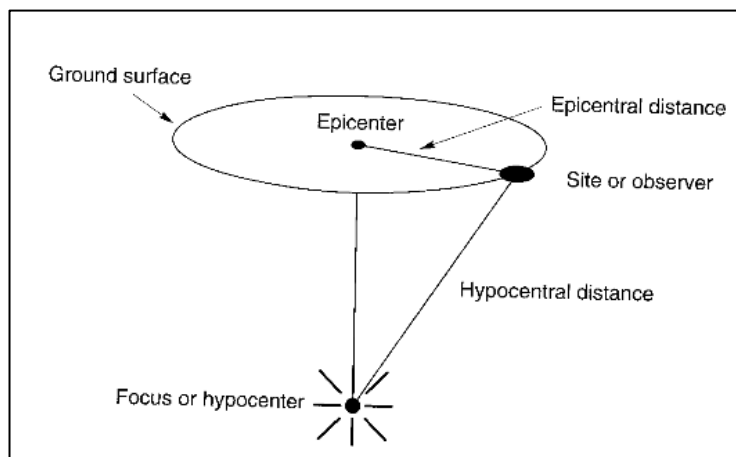
Pergerakan dip yang terjadi dapat dibedakan menjadi 2 jenis berdasarkan arah pergerakan dan *dip angle*, yaitu:

1. *Normal Fault*, terjadi jika komponen horizontal dari kemiringan diperpanjang dan material di atas bidang patahan yang bergerak turun relatif terhadap material dibawah patahan.
2. *Reverse Fault*, terjadi bila komponen horizontal dari kemiringan diperpendek dan material di atas bidang patahan bergerak naik relatif terhadap material dibawah bidang patahan.

Ilustrasi dari jenis patahan *normal fault*, *reverse fault*, dan *strike slip* dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Ilustrasi Jenis Patahan (a) *Normal Fault*, (b) *Strike Slip*, (c) *Reverse Fault*
(Sumber: Kramer, 1996)



Gambar 3.6 Ilustrasi Perambatan Gelombang Gempa
(Sumber: Kramer, 1996)

Gempa bumi yang terjadi akan mengakibatkan pelepasan energi, energi yang dilepaskan akan merambat dalam bentuk gelombang. Gelombang rambatan yang terjadi menyebabkan getaran pada suatu tempat. Berikut ilustrasi proses perambatan gelombang gempa bumi dapat dilihat pada Gambar 3.6.

3.3 Magnitudo Gempa

Magnitudo gempa merupakan ukuran secara kuantitatif dan objektif terhadap gempa untuk mengukur gerakan tanah selama gempa bumi. Besaran yang diukur akan bernilai sama walaupun pengukuran atau penghitungan dilakukan pada tempat yang berbeda. Pada umumnya magnitudo diukur berdasarkan periode fase gelombang dan amplitudo tertentu. Ada beberapa jenis magnitudo gempa bumi antara lain:

3.3.1 Magnitudo Lokal (M_L)

Magnitudo lokal digunakan untuk mengukur gempa-gempa lokal dengan jarak episenter kurang dari 600 km yang menggunakan fase gelombang-P. konsep tentang magnitudo local pertama diperkenalkan oleh Charles Richter (1935) untuk mengukur magnitudo gempa di California selatan. Nilai amplitudo yang digunakan untuk menghitung magnitudo lokal adalah logaritma (basis 10) dari amplitudo maksimum gerakan tanah (dalam mikron). Amplitudo maksimum

dicatat oleh *seismograph* torsi Wood-Anderson yang mempunyai periode natural 0,8 detik dengan perbesaran 2800 dan faktor redaman 0,8. Formula untuk menghitung magnitudo lokal tidak dapat digunakan di luar California dan data amplitudo yang dipakai hanya yang tercatat pada mesin *seismograph* di lokasi tinjauan.

3.3.2 Magnitudo Gelombang Permukaan (M_s)

Magnitudo gelombang permukaan merupakan satuan magnitudo yang dapat digunakan di seluruh dunia menggunakan basis amplitudo dari gelombang Rayleigh dengan periode 20 detik. Konsep magnitudo gelombang permukaan diperkenalkan oleh Guttenberg dan Richter (1936). Magnitudo gelombang permukaan menggunakan basis besaran perpindahan maksimum amplitudo dari tanah sehingga dapat ditentukan dari semua jenis *seismograph*. Satuan magnitudo gelombang permukaan hanya dapat digunakan untuk gempa dengan kedalaman dangkal (tidak lebih dari 70 km).

3.3.3 Magnitudo Gelombang Badan (M_b)

Magnitudo gelombang badan merupakan magnitudo gempa yang diperoleh dari *amplitudo* gelombang badan yang primer maupun sekunder yang tidak terpengaruh kedalaman fokus gempa. Amplitudo yang dipakai adalah amplitudo gerakan tanah maksimum (dalam mikron) yang diukur pada 3 gelombang yang pertama dari gelombang-P dan periode gelombang yang mempunyai amplitudo maksimum tersebut (Yulianti, 2012).

3.3.4 Momen Magnitudo (M_w)

Gempa besar mempunyai karakteristik guncangan tanah kurang sensitif terhadap besarnya gempa dibandingkan gempa yang lebih kecil. Fenomena ini dikenal sebagai kejenuhan gelombang badan dan Richter local magnitudo menjadi jenuh pada magnitudo 6 sampai 7 dan magnitudo permukaan menjadi jenuh pada $M_s = 8$. Skala momen magnitudo yang dikembangkan Kanamori (1977) digunakan untuk mendeskripsikan ukuran gempa yang besar, karena skala momen

magnitudo didasarkan pada momen gempa. Sehingga tidak tergantung pada tingkat guncangan tanah dan kejenuhan gelombang. Skala momen magnitudo diperoleh dengan melakukan pengukuran langsung dari faktor keruntuhan sepanjang patahan.

Untuk melakukan analisis resiko kegempaan menggunakan skala magnitudo yang seragam untuk semua data rekam gempa. Untuk menyeragamkan skala magnitudo dari semua data rekam gempa digunakan Persamaan korelasi yang diusulkan oleh Asrurifak et al (2010) untuk data rekam gempa di wilayah Indonesia. Persamaan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Korelasi Konversi Skala Magnitudo di Indonesia

Korelasi konversi	Range Data	Kesesuaian (R ²)
$M_w = 0,143 M_s^2 - 1,051 M_s + 7,285$	$4,5 \leq M_s \leq 8,6$	93,9 %
$M_w = 0,114 M_b^2 - 0,556 M_b + 5,560$	$4,9 \leq M_b \leq 8,2$	72,0 %
$M_w = 0,787 M_E + 1,537$	$5,2 \leq M_E \leq 7,3$	71,2 %
$M_b = 0,125 M_L - 0,389 M_L + 7,285$	$4,5 \leq M_L \leq 8,6$	56,1 %
$M_L = 0,717 M_D + 1,003$	$4,5 \leq M_D \leq 8,6$	29,1 %

(sumber : Asrurifak et al, 2010)

3.4 Analisis Bahaya Gempa/ *Seismic Hazard Analysis*

Metode dalam analisis bahaya gempa atau *seismic hazard analysis* terdapat dua metode yang dapat digunakan yaitu *Deterministic Seismic Hazard Analysis* dan *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. Dalam melakukan analisis digunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) dipilih karena dapat memperkirakan kemungkinan besar probabilitas gempa itu akan terjadi. Kelebihan dari metode PSHA tidak dapat diakomodasi oleh DSHA, walaupun dalam memperkirakan scenario terburuk kejadian gempa di suatu wilayah lebih sederhana dibandingkan dengan PSHA. *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA) menyediakan kerangka kerja yang dapat mengidentifikasi ketidakpastian tentang ukuran, lokasi dan tingkat kejadian dari gempa bumi.

Pada dasarnya, metode PSHA adalah analisis yang dikembangkan oleh

Mc. Guire (1976) berdasarkan konsep probabilitas dari Cornell (1968). Metode ini menggunakan variasi scenario yang melibatkan frekuensi *ground motion*, dengan mengasumsikan kejadian gempa magnitudo M dan jarak hiposenter R adalah variabel acak independen yang kontinyu. Variasi skenario juga melibatkan sifat acak gempa bumi seperti lokasi pusat gempa, besarnya gempa, dan tingkat kejadian gempa.

Perhitungan PGA dengan metode PSHA dapat dapat dinyatakan dalam Persamaan (3.4) sebagai berikut (Kramer, 1996):

$$\lambda(a > a^*) = \sum_{i=1}^{n_s} v(M_i > m_0) \sum_{k=1}^{n_r} P[m_j r_k] P[M_i = m_j] P[r_i = r_k] \quad (3.4)$$

dengan :

$\lambda(a > a^*)$: rate of exceeding PGA terlampaui

v : annual exceedence rate

$P[M_i = m_j]$: fungsi distribusi magnitudo

$P[R_i = r_k]$: fungsi distribusi jarak

$P[a > a^* | m_j r_k]$: probabilitas bersyarat dari nilai percepatan tanah maksimum PGA yang melampaui nilai PGA pada lokasi yang ditinjau untuk kejadian gempa dengan magnitudo m dan jarak r .

Fungsi ditribusi dari variabel magnitudo dan jarak dapat ditentukan dengan membagi masing-masing variabel menjadi 10 kelas interval (Kramer,1996). Perhitungan distribusi magnitudo dilakukan dengan menggunakan Persamaan (3.5) sebagai berikut:

$$P[M_i = m_j] = \frac{\sum_i^j N m(j)}{\sum_i^j N m} \quad (3.5)$$

Dengan;

$\sum N m(j)$: Jumlah kejadian gempa dengan magnitudo j

$\sum N m$: Jumlah kejadian gempa total

Perhitungan fungsi distribusi jarak dilakukan dengan menggunakan Persamaan (3.6) sebagai berikut:

$$P [R_i = r_k] = \frac{\sum_i^k N r (k)}{\sum_i^k N r} \quad (3.6)$$

Perhitungan Probabilitas PGA melampaui angka tertentu dilakukan dengan menggunakan Persamaan (3.7) dan (3.8) sebagai berikut:

$$z = \frac{\ln a - \ln \ln PGA}{\sigma} \quad (3.7)$$

$$P(M = m, R = r) = f_z(Z^*) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\sigma \ln \ln PGA} \exp \exp \left(\frac{-z^2}{2\sigma^2} \right) \quad (3.8)$$

Dengan:

$f_z(z^*)$: fungsi kerapatan probabilitas

$\ln a$: percepatan tanah maksimum yang ditinjau

σ : standar deviasi dari $\ln PGA$

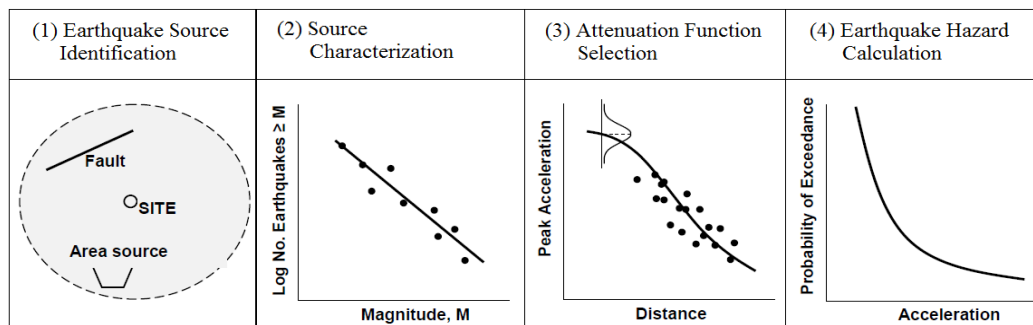
Metode PSHA dapat dideskripsikan dalam empat langkah prosedur sebagai berikut:

1. Langkah pertama merupakan identifikasi dan karakterisasi sumber gempa, yang identik dengan langkah pertama DSHA. Probabilitas dari lokasi *rupture* yang berpotensi dalam sumber gempa juga di karakterisasi. Dalam kebanyakan kasus, diterapkan distribusi probabilitas seragam untuk masing-masing zona sumber gempa. Distribusi ini dikombinasikan dengan bentuk geometri dari sumber gempa untuk mendapatkan distribusi probabilitas yang sesuai dengan jarak sumber ke lokasi.
2. Langkah selanjutnya, seismisitas atau distribusi sementara dari perulangan kejadian gempa di karakterisasi. Hubungan perulangan kejadian gempa yang menunjukkan kecepatan rata-rata dari suatu gempa dengan besar yang berbeda akan terlampaui digunakan untuk mengkarakterisasikan seismisitas dari masing - masing zona sumber gempa. Hubungan empiris ini dapat mengakomodasi besarnya magnitudo maksimum dari gempa.

Tetapi tidak dilakukan pembatasan pertimbangan untuk gempa yang terjadi.

3. Gerakan tanah yang terjadi akibat adanya gempa besaran tertentu dan lokasi tertentu harus ditentukan menggunakan hubungan prediksi menggunakan fungsi atenuasi. Ketidakpastian dari fungsi atenuasi juga diperhitungkan.
4. Ketidakpastian dari lokasi gempa, besarnya gempa dan prediksi parameter guncangan tanah (percepatan gempa), dikombinasikan untuk mendapatkan probabilitas terlampauinya suatu parameter guncangan tanah selama suatu periode waktu.

Ilustrasi yang dapat menjelaskan seluruh langkah tersebut dapat dilihat tahapan seperti pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Tahapan Analisis Bahaya Gempa dengan Metode PSHA
(Sumber: Kramer, 1996)

Dalam melakukan perhitungan kemungkinan periode ulang gempa ada suatu periode digunakan persamaan (3.9) sebagai berikut:

$$P [N > 1] = 1 - e^{-Ra \cdot T} \quad (3.9)$$

Dengan :

Ra : Angka kejadian terlampaui (g)

T : Periode kala ulang (tahun)

3.5 Katalog Gempa

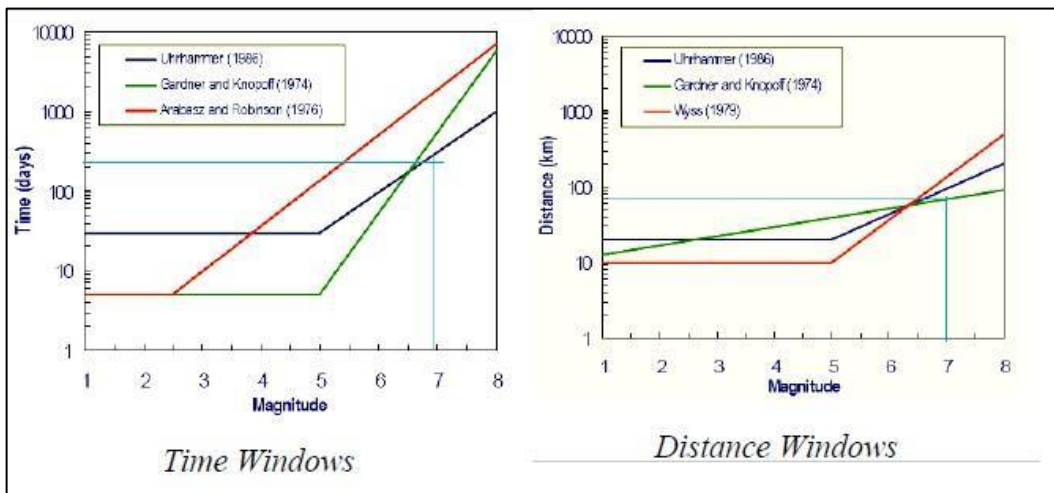
Katalog gempa adalah salah satu elemen penting dalam analisis resiko kegempaan. Katalog data gempa merupakan sumber utama dalam menentukan parameter seismik yang akan menjadi input dalam proses analisis resiko gempa. Data yang didapat dari katalog gempa harus dipersiapkan sebelum dapat dianalisis. Adapun tahapan persiapan data gempa itu akan dibahas pada bagian berikut ini.

3.5.1 Penyeragaman Magnitudo Gempa

Data rekam gempa yang diperoleh dalam tahap pengumpulan data dari katalog gempa. Data yang diperoleh diseragamkan skala magnitudo untuk dibuat katalog gempa yang akan di analisis. Data awal rekam gempa tersebut memiliki berbagai macam skala magnitudo seperti *moment magnitude* (MW), *surface wave magnitude* (MS), *body wave magnitude* (Mb) dan *Richter local magnitude* (ML). Penyeragaman skala magnitudo dilakukan konversi ke skala *moment magnitude* (MW) menggunakan Persamaan korelasi konversi skala magnitudo yang diusulkan Asrurifak et al. (2010) pada Tabel 3.3.

3.5.2 *Declustering* Data Gempa

Katalog data gempa yang digunakan dalam proses analisis seismik resiko gempa harus merupakan data rekam gempa independen (*mainshock*). *Declustering* merupakan proses identifikasi dan pemisahan data gempa dependen yaitu gempa rintisan (*foreshock*) dan susulan (*aftershock*) terhadap gempa utama (*mainshock*). Kriteria empiris untuk memisahkan gempa dependen tersebut diusulkan oleh Arabasz & Robinson (1976), Gardner & Knopoff (1974) dan Uhammer (1986). Kriteria ini dikembangkan berdasarkan rentang waktu dan jarak tertentu dari satu kejadian gempa besar. Gambar 3.8. berikut adalah kriteria window dalam proses *declustering* data gempa.



Gambar 3.8 Kriteria *Time* dan *Distance Windows* untuk *Declustering*
(Sumber: Irsyam dkk., 2007)

Kriteria ini dikembangkan berdasarkan rentang waktu dan jarak tertentu dari satu kejadian gempa besar. Suatu rangkaian gempa dikatakan gempa dependen jika gempa tersebut berada dalam rentang waktu (*time windows*) dan jarak (*distance windows*) yang dihitung menurut kriteria empiris dari magnitudo gempa utama.

3.5.3 Analisis Kelengkapan Data Gempa

Asrurifak et. al (2010) menyatakan ketidaklengkapan data gempa akan mengakibatkan parameter resiko gempa yang dihasilkan menjadi *overestimated* atau *underestimated*. Stepp (1973) mengusulkan suatu kriteria untuk menguji kelengkapan data rekam gempa. Untuk mengetahui periode dimana suatu katalog gempa yang digunakan cukup lengkap, frekuensi kejadian gempa independen untuk beberapa rentang magnitudo diplotkan terhadap waktu yang dihitung dari waktu pengamatan terakhir kebelakang. Frekuensi kejadian gempa (λ) didefinisikan sebagai jumlah kejadian gempa (N) selama selang waktu tertentu (T) dibagi dengan T , dengan asumsi bahwa *seismic rate* konstan untuk rentang periode yang lama sewaktu dimana frekuensi kejadian gempa mulai menurun secara signifikan menyatakan suatu batas waktu dimana katalog gempa sebelumnya tidak lengkap. Langkah untuk menganalisa kelengkapan data gempa

yang diusulkan oleh Stepp (1973) adalah sebagai berikut:

1. Waktu pengamatan beberapa interval waktu dihitung dari pengamatan terakhir ke belakang.
2. Setiap interval waktu dari data gempa dibagi menjadi beberapa rentang magnitudo dan dihitung untuk kejadian gempa pada setiap rentang magnitudo.
3. Frekuensi kejadian gempa (*rate*) untuk setiap rentang magnitudo dihitung dengan Persamaan (3.10).

$$\lambda = \frac{\sum N}{T} \quad (3.10)$$

Dengan:

- λ : frekuensi kejadian gempa (*rate*)
 N : jumlah kejadian gempa
 T : interval waktu pengamat

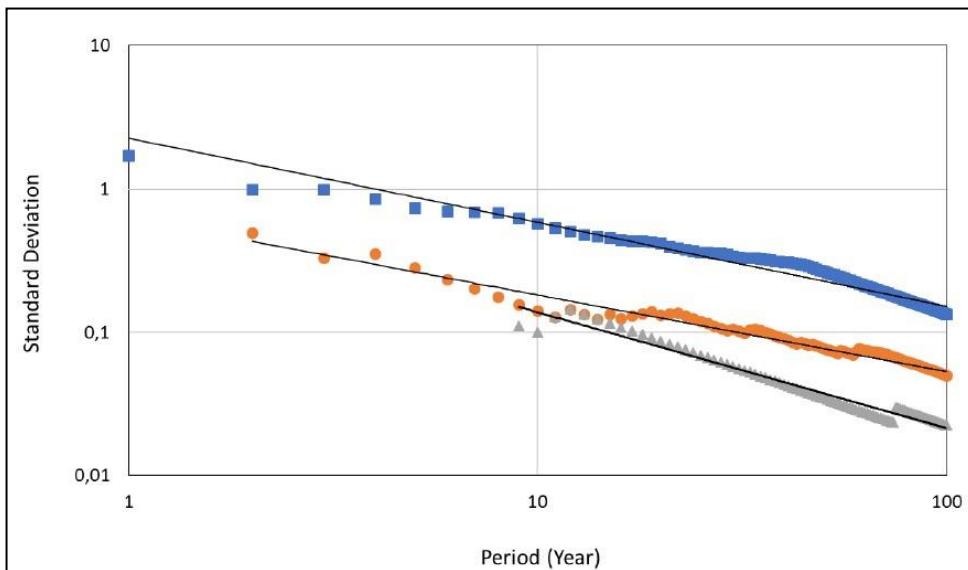
4. Standar deviasi dihitung menggunakan Persamaan (3.11) sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}} \quad (3.11)$$

Dengan:

- σ : standar deviasi
 λ : frekuensi kejadian gempa (*rate*)
 T : interval waktu pengamat

Kelengkapan data pada periode waktu tertentu dapat dilihat dari gradien kecenderungan data yang berubah. Rentang waktu dimana standar deviasi menunjukkan perubahan dan menjadi lebih curam menunjukkan data gempa yang tidak lengkap. Contoh hasil analisis kelengkapan data gempa interval waktu 100 tahun untuk Jatigede seperti ditampilkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Hasil Analisis Kelengkapan Data Gempa Interval 100 Tahun Jatigede
(Sumber: Ibrahim, 2017)

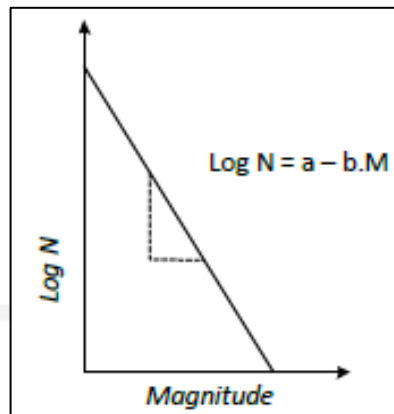
3.6 *Earthquake Recurrence Parameter*

Data rekam kegempaan suatu daerah diperoleh dari rekaman di masa lalu dapat digunakan untuk mengetahui resiko tercapainya atau terlampauinya suatu intensitas gerakan tanah setempat di masa yang akan datang. Perhitungan resiko gempa dilakukan dengan dasar informasi kegempaan dari suatu daerah, diantaranya:

1. Pencatatan gempa yang pernah ada pada lokasi tinjauan
2. Sejarah kejadian gempa pada daerah yang dalam radius lokasi tinjauan
3. Data geologi berupa zona potensi sumber gempa daerah yang ditinjau

Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) memerlukan suatu model perulangan gempa dengan magnitudo yang bervariasi. Model kemunculan gempa (*Earthquake Recurrence Model*) yang diberikan oleh beberapa peneliti digunakan untuk memperkirakan besarnya resiko kemunculan suatu kejadian gempa pada suatu periode perulangan tertentu. *Earthquake Recurrence Model* yang sering digunakan dalam analisis PSHA merupakan *Least Square Method* (Gutenberg & Richter, 1954), yaitu pemodelan hubungan magnitudo versus frekuensi seperti

yang disajikan dalam Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Earthquake Recurrence Model*

(Sumber: Gutenberg & Richter, 1954)

Menurut Gutenberg-Richter (1954), frekuensi terjadinya gempa dengan magnitudo $M \geq m$ persatuan waktu, menurun secara ekponensial dengan meningkatnya magnitudo gempa, dan dapat dinyatakan dengan Persamaan berikut:

$$\text{Log } N = a - b M \quad (3.12)$$

Dengan:

- N : frekuensi terjadinya gempa dengan magnitudo M lebih besar atau sama dengan m per satuan waktu (ditentukan dengan memakai metode penyesuaian kuadrat terkecil terhadap data pengamatan yang tersebar).
- M : Magnitudo gempa.
- a : konstanta karakteristik daerah gempa yang tergantung waktu pengamatan (T_0) dan tingkat kegempaan daerah sumbernya.
- b : konstanta karaktersitik daerah gempa yang merupakan kemiringan garis pada grafik $\text{Log } N$ versus m , menyatakan penyebaran relatif dari magnitudo gempa pada sembarang sumber titik pada daerah sumber gempa. Nilai b yang lebih besar menunjukkan terjadinya gempa dengan magnitudo besar yang lebih langka.

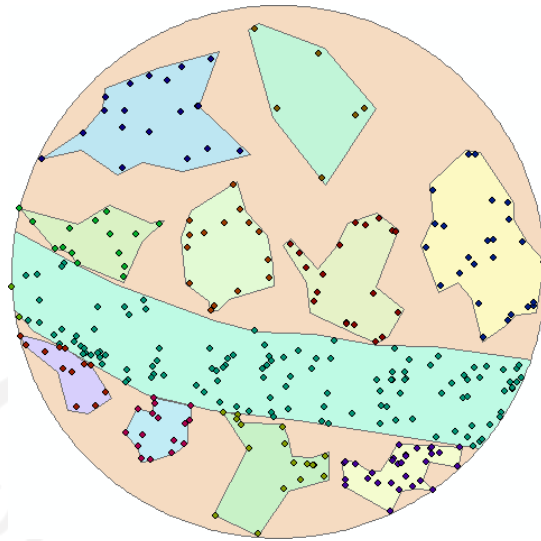
3.7 Permodelan Sumber Gempa

3.7.1 *Area Source*

Pemodelan sumber gempa didasarkan pada interpretasi data gempa kedalam area yang berisi data gempa yang telah dikelompokkan (Aguilar, 2017). Pengelompokan data gempa akan menghasilkan tingkat seismisitas dan data geometri dari tiap area. Gabungan dari data seismisitas dan geometri akan menghasilkan *area source* yang akan menjadi *input* dalam analisis PSHA menggunakan R-CRISIS 20.0.

Pengelompokan data gempa dibagi berdasarkan kedalaman ke dalam interval kedalaman. Pemisahan data gempa kedalam tiga interval bertujuan untuk mengelompokkan data gempa berdasarkan sumbernya mencakup gempa *Shallow crustal* yang meliputi subduksi dan patahan. Interval yang lebih dalam bertujuan mengelompokkan gempa kedalam *deep background*. Tiap interval kedalaman data gempa akan diambil nilai tengahnya untuk dijadikan satu kedalaman pada tiap interval kedalaman.

Data gempa pada tiap kedalaman akan dikelompokkan untuk dijadikan *area source* berdasarkan gempa yang saling berdekatan. *Area source* akan dibentuk menjadi beberapa *polygon* sebagai *input* geometri untuk analisis kegempaan. Gempa yang memiliki jarak yang berjauhan dan atau tidak bisa dikelompokkan akan dijadikan satu *area source* untuk gempa *background*. Kedalaman gempa subduksi mengikuti geometri dari subduksi dengan kedalaman bagian atas subduksi 5 km dan bagian bawah 50 km. Geometri dari area subduksi diambil dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Gempa yang masuk ke dalam area subduksi dianggap sebagai gempa yang bersumber dari subduksi. Ilustrasi pengelompokan ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Ilustrasi Pengelompokan Data Rekam Gempa
(Sumber: Pengolahan Data, 2022)

3.7.2 *Geometry Source*

Geometry source merupakan *polygon* yang terbentuk akibat pengelompokan data gempa. *Polygon* yang terbentuk berbentuk beraturan atau tidak beraturan tergantung pada persebaran data gempa yang dikelompokkan. Persebaran data gempa mempengaruhi luasan *polygon* yang terbentuk. Jarak antar titik gempa yang saling berjauhan akan menghasilkan *polygon* yang memiliki luasan yang besar, sementara jika jarak antar titik gempa semakin berdekatan maka akan menghasilkan *polygon* yang memiliki luasan lebih kecil.

3.7.3 *Seismicity Source*

Seismicity source merupakan sifat seismik dari *geometry source* berupa nilai lamda, beta, dan magnitudo. Nilai seismik dari suatu geometri berkaitan dengan jumlah dari data gempa yang dicakup dalam sebuah *polygon*. Perhitungan masing-masing parameter seismik dalam input seismisitas dapat menggunakan Persamaan (3.13) hingga Persamaan (3.17) sebagai berikut.

$$rate = \frac{jumlah\ data\ gempa}{waktu\ interval\ gempa} \quad (3.13)$$

$$a = \frac{\sum x + \sum y}{\sum z} \quad (3.14)$$

$$b = \frac{\sum z \cdot \sum xy - \sum x \cdot \sum y}{\sum z \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3.15)$$

Dengan:

Z : Jumlah interval magnitudo

x : median interval magnitudo

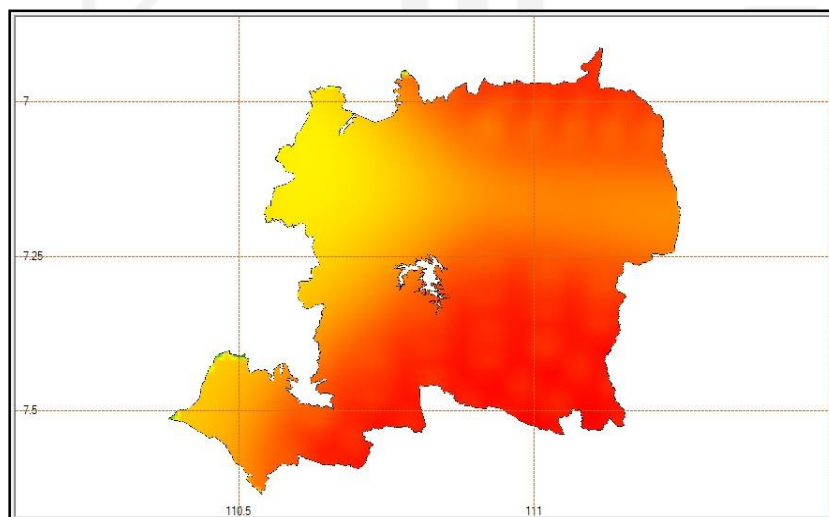
y : *log-rate* kumulatif

$$\beta = b \cdot \ln \ln 10 \quad (3.16)$$

$$\lambda = 10^{(a-b \cdot \text{mean})} \quad (3.17)$$

3.8 Hazard Maps

Hazard maps merupakan input peta dengan format *shapefile* (.shp) dalam analisis kegempaan menggunakan *software* R-CRISIS 20.0. Analisis kegempaan yang dilakukan mencakup satu wilayah, hal ini dikarenakan R-CRISIS 20.0 tidak dapat menganalisis kegempaan pada satu titik tinjauan. Peta wilayah yang digunakan adalah peta wilayah daerah administratif dalam lingkup kabupaten. Peta yang menjadi input dalam analisis adalah peta Kabupaten Buru. Contoh hasil analisis kegempaan berupa *hazard maps* ditunjukkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Ilustrasi Hasil *Hazard Maps*
(Sumber: Pengolahan Data, 2022)

3.9 *Exceedance Probability*

Exceedance Probability untuk *hazard maps* adalah tetapan *exceedance probability* untuk keseluruhan peta *hazard* yang akan memunculkan hasil intensitas yang berkaitan dengan *exceedance probability* yang menjadi masukan. Perhitungan *exceedance probability* untuk masing-masing kala ulang kejadian gempa menggunakan Persamaan (3.18) sebagai berikut.

$$\text{Exceedence probability} = 1 - \exp\left(\frac{\text{time frame}}{\text{kala ulang kejadian}}\right) \quad (3.18)$$

Dengan:

Time frame : tetapan *time frame* yang digunakan

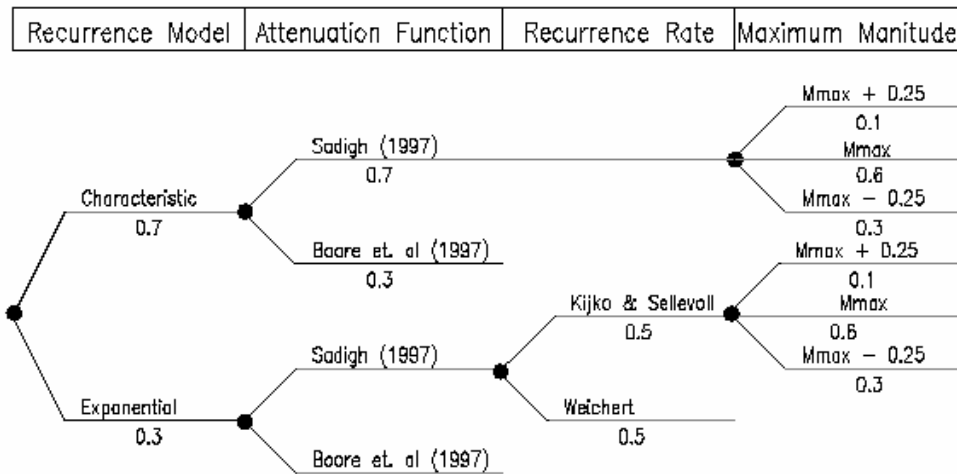
Kala ulang kejadian : kala ulang kejadian yang dianalisis

3.10 *Fungsi Atenuasi dan Logic Tree*

Fungsi atenuasi merupakan fungsi yang menggambarkan hubungan antara magnitudo (M), intensitas (i) gerakan tanah setempat, dan jarak (R) dari sumber daerah pusat gempa. Perkiraan fungsi atenuasi untuk gerakan tanah akibat gempa, telah menjadi subjek yang menarik dalam penelitian bidang kegempaan. Fungsi atenuasi merupakan alat yang penting dalam mengaplikasikan resiko kegempaan dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Penggunaan fungsi atenuasi untuk perhitungan PGA memiliki faktor yang mempengaruhi fungsi atenuasi yang digunakan, antara lain mekanisme gempa, jarak episenter dan kondisi tanah lokal.

Logic tree adalah suatu kerangka kerja untuk mengatasi nilai ketidakpastian parameter yang dipakai pada saat perhitungan analisa resiko gempa dengan menggunakan metode PSHA. Nilai ketidakpastian parameter didapat dari Persamaan atenuasi, parameter resiko gempa dan magnitudo maksimum. Pendekatan *logic tree* memungkinkan penggunaan beberapa alternatif metode atau model dalam analisis, dimana tiap model yang digunakan untuk suatu parameter akan dikalikan dengan suatu faktor bobot yang merepresentasikan keakuratan relatif suatu model terhadap model lainnya (Irsyam et.al, 2010). Jumlah faktor bobot dari semua alternatif metoda untuk parameter yang sama harus sama dengan satu. Salah satu contoh *logic tree* yang digunakan dalam analisis resiko

gempa dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13 Contoh Logic Tree dalam Analisis Resiko Gempa
(Sumber: Kramer, 1996)

Analisis PSHA yang dilakukan menggunakan fungsi atenuasi merujuk pada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Tahun Indonesia 2017 dan pembobotan dari *logic tree* merujuk pada Irsyam et al (2010). Fungsi atenuasi yang dimaksud disajikan pada Tabel 3.5 sebagai berikut.

Tabel 3.5 Korelasi Konversi Skala Magnitudo di Indonesia

Gempa	Fungsi Atenuasi	Bobot
Patahan	Boore-Atkinson NGA (Boore dan Atkinson, 2014)	1/3
	Campbell-Bozorgnia NGA (Campbell dan Bozorgnia, 2014)	1/3
	Chiou-Youngs NGA (Chiou dan Youngs, 2014)	1/3
Subduksi <i>Interace</i>	BCHYDRO (Abraham dkk 2012)	1/4
	Atkinson-Boore BC <i>rock and global source subduction</i> (Atkinson dan Boore, 2003)	1/4
	Zhao dkk, <i>with variable Vs30</i> (Zhao dkk,2006)	1/2
<i>Deep Background (deep Interslab)</i>	AB <i>interslab seismicity Cascadia region BC-rock condition</i> (Atkinson-Boore, Cascadia 2003)	1/3
	<i>Geomatrix slab seismicity rock</i> (Youngs dkk, 1997)	1/3
	AB 2003 <i>interslab seismicity world wide data region BC-rock condition</i> (Atkinson Boore, worldwide 2003)	1/3

3.11 Deagregasi

Metode PSHA pada dasarnya adalah metode yang digunakan untuk menghitung ancaman gempa, berdasarkan dari kumpulan hasil semua kejadian gempa yang mungkin dapat terjadi di masa datang. Kejadian gempa yang mungkin akan datang tidak dapat terlihat jelas dalam PSHA. Kondisi ini menjadikan PSHA menjadi kurang lengkap memberikan informasi tentang parameter gempa yaitu M dan R yang dominan dalam desain gempa. Sebagai pelengkap metode PSHA maka diperlukan deagregasi terhadap setiap sumber gempa yang dimodelkan.

Deagregasi diperlukan dalam pemilihan data *ground motion*/ akselerogram yang sesuai dengan karakteristik gempa di wilayah tinjauan. Deagregasi menghasilkan *controlling magnitudo* ($M_{controlling}$) dan *controlling distance* ($R_{controlling}$) gempa yang memberikan kontribusi terbesar dalam PSHA. *controlling magnitudo* ($M_{controlling}$) dan *controlling distance* yang diperoleh berdasarkan titik berat dari kurva deagregasi (Riza, 2010).

3.12 Amplifikasi

Kelas situs perlu diidentifikasi untuk merumuskan kriteria desain seismik suatu bangunan di permukaan tanah untuk menentukan amplifikasi besaran percepatan gempa puncak dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk suatu situs. Profil tanah di situs harus diklasifikasikan berdasarkan profil tanah lapisan 30 m paling atas sesuai dengan aturan SNI 1726-2012 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung yang disajikan pada Tabel 3.6. sebagai berikut.

Tabel 3.6 Klasifikasi Situs

Kelas situs	V_s (m/s)	N	S_u (Kpa)
SA	>1500	N/A	N/A
SB	750-1500	N/A	N/A
SC	350-750	>50	>100
SD	175-350	15-50	50-100
SE	<150	<15	<50

(sumber : SNI 1726, 2012)

Nilai PGA terkoreksi (PGA_M) didapatkan dengan mengalikan faktor amplifikasi dengan nilai PGA seperti pada Persamaan (3.19). Nilai faktor amplifikasi ditentukan berdasarkan kelas situs seperti yang disajikan pada Tabel 3.7.

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA \quad (3.19)$$

Dengan:

PGAM : nilai PGA terkoreksi

FPGA : koefisien situs

Tabel 3.7 Koefisien Situs F_{PGA}

Kelas Situs	PGA 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA = 0,5
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
SC	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
SE	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9

(sumber : SNI 1726, 2012)

3.13 *Time History*

Peak ground acceleration merupakan percepatan tanah maksimum yang dapat dihitung dengan menggunakan metode model empiris berdasarkan data historis gempa maupun menggunakan fungsi atenuasi berdasarkan jenis sumber gempa yang terjadi. Nilai percepatan tanah dasar tersebut akan digunakan dalam penentuan *ground motion*.

Riwayat waktu gempa rencana yang disetujui untuk dipakai di Indonesia belum ada. Salah satu pemecahan yang dapat diambil adalah memodifikasi rekaman riwayat waktu gempa yang sesungguhnya. Modifikasi tersebut dilakukan dengan menskalakan *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan periode dominan riwayat waktu tersebut dengan PGA dan periode dominan batuan dasar dari wilayah tinjauan.

Rekaman riwayat gempa yang diambil harus memiliki magnitudo, jarak

patahan dan mekanisme sumber gempa yang konsisten dengan hal-hal yang mengontrol ketentuan gempa maksimum yang dipertimbangkan. Analisis riwayat waktu harus menggunakan paling sedikit dibutuhkan tiga ragam gerak tanah (*strong ground motion*) yang berbeda, seperti yang diatur dalam Pasal 11.1.3 dalam SNI 1726- 2012. Penskalaan *strong ground motion* dilakukan dengan metode superposisi yang dicetuskan oleh Seed-Idriss (1969).

Metode superposisi ialah cara sederhana untuk memperoleh rekaman akselerogram buatan dengan durasi getar, percepatan gempa puncak dan interval waktu akselerogram tertentu. Langkah-langkah pembuatan aselerogram desain dengan metode superposisi ialah sebagai berikut:

1. Menghitung percepatan gempa maksimum desain (a_d). Percepatan gempa maksimum desain dapat diperoleh melalui analisis deterministik, probabilistik, maupun pendekatan dengan peta gempa.
2. Menentukan periode dominan T_p dari batuan dasar menggunakan Persamaan (3.20) sebagai berikut.

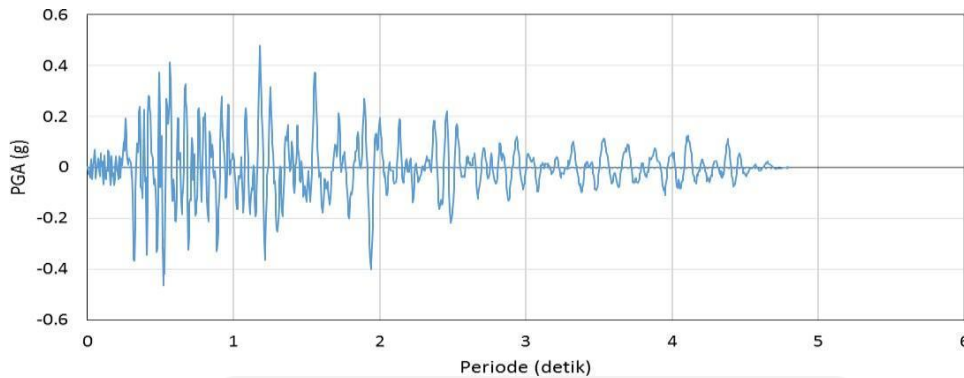
$$T_p = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{V_{s_i}} \quad (3.20)$$

3. Memilih aselerogram dengan karakteristik yang mendekati lokasi tinjauan
4. Mengubah interval waktu aselerogram yang ada sehingga periode dominan (T_1) sama dengan periode dominan batuan dasar setempat (T_p) menggunakan Persamaan (3.21) berikut.

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \times \frac{T_p}{T_1} \quad (3.21)$$

5. Mengubah percepatan gempa maksimum (a_{max}) dari aselerogram yang dipilih, yaitu dengan mengalikannya dengan faktor koreksi a_d/a_{max}

Contoh dari aselerogram pemodelan sumber gempa ditunjukkan pada Gambar 3.14 sebagai berikut.



Gambar 3.14 Aselogram Pemodelan Sumber Gempa *Megathrust*
(Sumber: Ibrahim, 2017)

3.14 Analisis Stabilitas Bendungan Urugan

3.14.1 Analisis Statik

Panglar (1985) menyatakan analisis kestabilan bendungan tipe urugan memiliki cara yang sama dengan analisis kestabilan lereng. Perhitungan kestabilan lereng melalui rumus empiris dengan metode *limit equilibrium* seperti metode *Fellinius (Ordinary)*, *Modified Bishop*, *Janbu*, *Morgenstern and Price* dan *Spencer*. Metode kedua dengan *Finite Element Method (stress deformation analysis)* dimana pada metode tersebut memperhitungkan tegangan regangan tanah dan batuan, sehingga dapat memprediksikan pergerakan pada bendungan. *Finite Element Method (FEM)* biasanya digunakan pada geometri bendungan yang tidak beraturan, *nonlinear stress*, dan *complex boundary conditions*.

Analisis stabilitas statik bendungan ini menggunakan metode FEM, dimana tidak dilakukan asumsi bidang longsor. Faktor keamanan didapatkan dengan cara mengurangi nilai kohesi c , dan sudut geser dama tanah (ϕ) secara bertahap hingga tanah mengalami keruntuhan. Nilai faktor keamanan, kemudian dihitung dengan Persamaan (3.22) sebagai berikut:

$$\Sigma \quad MSF = \frac{c}{c_{reduced}} = \frac{\tan}{\tan reduced} \quad (3.22)$$

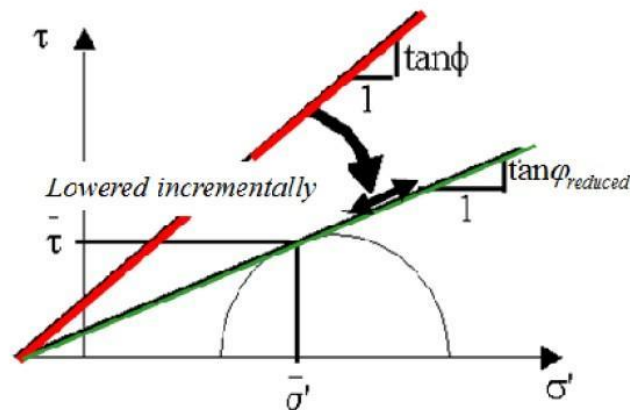
Dimana:

ΣMSF : Faktor keamanan

c : Kohesi sepanjang bidang gelincir (kN/m²)

ϕ : Sudut geser dalam tanah ($^{\circ}$)

Proses perhitungan tersebut dalam diagram keruntuhan Mohr Coloumb yang diilustrasikan pada Gambar 3.15. berikut.



Gambar 3.15 Proses Perhitungan Faktor Keamanan dalam FEM
(Sumber: Liong, 2012)

Kondisi pembebanan pada analisa statik dilakukan pada tiga kondisi yaitu saat waduk selesai konstruksi (muka air waduk kosong), saat operasional (muka air waduk normal), dan saat kritis (muka air waduk banjir). Nilai *safety factor* minimum yang disyaratkan untuk analisis stabilitas statik lereng bendungan tipe urugan yang diatur dalam SNI 8064:2016 disajikan dalam Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Nilai *Safety Factor* Minimum

No	Kondisi	Muka air waduk	Faktor Keamanan Minimum
1	Selesai Konstruksi	Muka Air Waduk Kosong	1,3
2	Saat Operasional	Muka Air Waduk Normal	1,5
3	Kondisi Kritis	Muka Air Waduk Banjir	1,3

(sumber : SNI 8064, 2016)

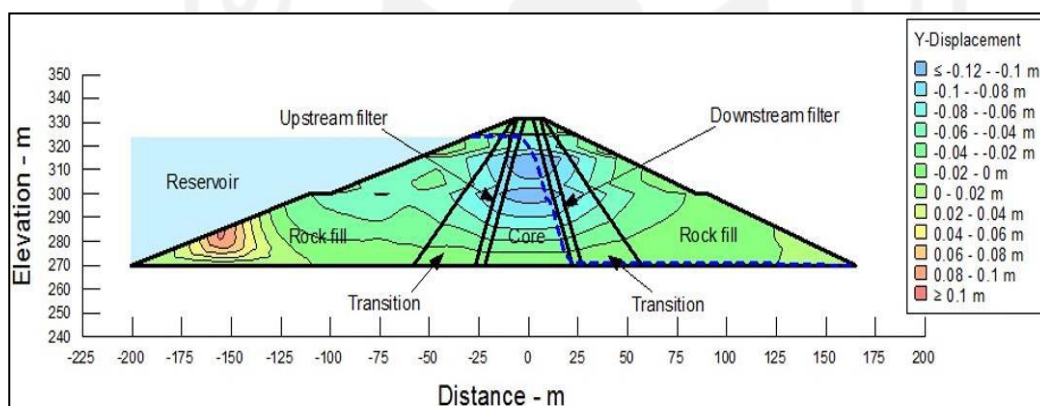
3.14.2 Analisis Dinamik

Metode dinamik adalah analisis terhadap beban gempa yang besarnya (intensitasnya) berubah-ubah menurut waktu. Beban gempa tersebut

menghasilkan tegangan normal dinamik dan tegangan geser sepanjang daerah yang berpotensi longsor. Hasil dari perhitungan metode dinamik adalah *displacement*.

Displacement adalah besaran perubahan posisi dan dimensi dari suatu benda. *Displacement* dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Dikatakan titik bergerak absolut apabila dikaji dari perilaku gerakan titik itu sendiri dan dikatakan relatif apabila gerakan itu dikaji dari titik yang lain. Perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada umumnya mengacu kepada suatu sistem kerangka referensi (absolut atau relatif).

Kriteria *displacement* maksimum terutama pada puncak bendungan, berbeda beda untuk negara negara di dunia. Contoh dari hasil analisis *displacement* pada bendungan ditunjukkan pada **Gambar 3.16** sebagai berikut.



Gambar 3.16 Displacement pada Bendungan Tigadihaji
(Sumber: Didiek Djarwadi, 2017)

Di Indonesia aturan yang digunakan saat ini adalah *displacement* maksimum puncak bendungan adalah setengah tinggi jagaan, yaitu setengah antara elevasi mercu pelimpah dengan puncak bendungan.

3.14.3 Analisis Beban Gempa

Penelitian ini dilakukan menggunakan beberapa paramter beban gempa. Beban gempa yang akan digunakan untuk desain bendungan baru atau evaluasi

keamanan bangunan yang ada tergantung pada kondisinya. Bendungan dapat dievaluasi terhadap satu atau beberapa beban gempa. Analisis stabilitas bendungan urugan akibat beban gempa, beban gempa yang digunakan adalah *Safety Evaluation Earthquake (SEE)*. *Safety Evaluation Earthquake* merupakan nama pengganti dari MDE (*Maximum Design Earthquake*) (ICOLD, 2016). SEE merupakan gempa maksimum yang mungkin terjadi, yang memberikan pengaruh terhadap bendungan tanpa terjadi keruntuhan. Kerusakan boleh terjadi, dan sifatnya dapat diperbaiki secepatnya dan tidak boleh terjadi pelepasan air dari bendungan yang tidak terkontrol. Gempa SEE dinyatakan sebagai gempa dengan periode ulang 10.000 tahun apabila dihitung dengan cara PSHA dan 84 *persentile* apabila dihitung dengan DSHA.

Faktor-faktor yang dibutuhkan untuk evaluasi keamanan bendungan terhadap gempa menurut KepMen Permukiman dan Prasarana Wilayah 360/KPTS/M/2004 tentang analisis stabilitas bendungan urugan akibat beban gempa antara lain:

1. Tingkat bencana gempa di lokasi bendungan
2. Tipe bendungan
3. Kebutuhan fungsional
4. Tingkat risiko bendungan dan waduk yang telah selesai
5. Konsekuensi perkiraan risiko.

Hal-hal yang perlu diperhatikan berkaitan dengan pengaruh tingkat risiko bangunan, meliputi klasifikasi kelas risiko dan kriteria beban gempa untuk desain bendungan urugan. Kelas risiko beban gempa yang harus digunakan dalam desain ditentukan oleh tingkat risiko bangunan, seperti yang disajikan pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Kriteria Faktor Risiko Evaluasi Keamanan Bendungan

Faktor Risiko	Angka bobot dalam kurung			
	Esktrem	Moderat	Tinggi	Rendah
Kapasitas (FR_k) (10^6 m^3)	> 100 (6)	100-1,25 (4)	1-0,125 (2)	<0,125 (0)
Tinggi (FR_t) (m)	45 (6)	45-30 (4)	30-15 (2)	<15 (0)

Faktor Resiko	Angka bobot dalam kurung			
	Esktrem	Moderat	Tinggi	Rendah
Kebutuhan evakuasi (FRe) (jumlah orang)	>1000 (12)	1000-100(8)	100-1 (4)	0 (0)
Tingkat Kerusakan hilir (FRh)	Sangat tinggi (12)	Tinggi (10) Agak Tinggi (8)	Moderat (4)	Tidak ada (0)

(sumber : KepMen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004)

Nilai faktor risiko total dapat dihitung dengan Persamaan (3.32):

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (3.23)$$

Menurut faktor risiko total, kelas risiko untuk desain seperti diuraikan dalam Tabel 3.10 terbagi atas kelas I (rendah), kelas II (moderat), kelas III (tinggi), dan kelas IV (ekstrem). Kriteria beban gempa ditinjau berdasarkan Tabel 3.10. dan ditentukan menurut kelas risiko. Analisis dilakukan dengan dua tingkat gempa, seperti yang disajikan pada Tabel 3.11.

Tabel 3.10 Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air

Faktor Resiko Total	Kelas Risiko	Keterangan
(0-6)	I	Rendah
(7-18)	II	Moderat
(19-30)	III	Tinggi
(31-36)	IV	Ekstrem

(sumber : KepMen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004)

Tabel 3.11 Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan

Kelas risiko dengan massa guna	Persyaratan tanpa kerusakan (OBE)		Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan (MDE)	
	T (tahun)	Metode analisis	T (tahun)	Metode analisis
IV	100-200 $ad \geq 0,1 g$	Pseudostatik	10000	Pseudostatik (Koef gempa) dan dinamik
III	50-100 $ad \geq 0,1 g$	Pseudostatik	5000	Pseudostatik (Koef gempa) dan dinamik
II	50-100	Pseudostatik	3000	Pseudostatik (Koef gempa) dan dinamik

Kelas risiko dengan massa guna	Persyaratan tanpa kerusakan (OBE)		Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan (MDE)	
	T (tahun)	Metode analisis	T (tahun)	Metode analisis
	$a_d \geq 0,1 g$			
I	50-100 $a_d \geq 0,1 g$	Pseudostatik	1000	Pseudostatik (Koef gempa) dan dinamik

(sumber : KepMen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004)

Beberapa parameter masukan perlu diidentifikasi untuk melakukan analisis metode dinamik. Parameter masukan yang dibutuhkan meliputi E (Modulus elastisitas), ν (*poisson ratio*), D (rasio redaman), G_{max} (Modulus geser maksimum) dan rasio penormalan modulus geser (G/G_{max}).

Nilai parameter Modulus elastisitas untuk berbagai jenis tanah dapat diketahui dengan menggunakan pendekatan yang disarankan oleh Bowles (1978) yang disajikan pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Jenis Tanah	E (Mpa)
1. Lempung	
a. Lunak	5 - 25
b. Sedang	15 - 40
c. Keras	50 - 100
d. Berpasir	25 - 250
2. Pasir	
a. Berlanau	5 - 20
b. Tidak padat	10 - 25
c. Padat	50 - 80
3. Pasir dan Kerikil	
a. Tidak padat	100-200
b. Padat	50-150
4. Lanau	2-20
5. Loses	15-60
6. Cadas	140-1400

(sumber : Bowles, 1978)

Nilai parameter masukan *Poisson ratio* (ν) dengan menggunakan pendekatan yang diciptakan oleh Bowles, yang disajikan pada Tabel 3.13.

Tabel 3.13 Nilai *Poisson Ratio* untuk Berbagai Jenis Tanah

Jenis tanah	Angka Poisson
Lempung jenuh	0,4-0,5
Lempung tak jenuh	0,1-0,3
Lempung berpasir	0,2-0,3
Lanau	0,3-0,35
Pasir	0,1-1,0
Batuan	0,1-0,4
Tanah (umum)	0,3-0,4

(sumber : Bowles, 1978)

Nilai modulus geser menyatakan respon suatu bahan terhadap tegangan geser. Modulus geser tanah dapat dianalisis berdasarkan teori teknik perambatan gelombang (Das, 1993). G_{max} dari pengukuran lapangan berbasis metode seismik dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.24) hingga Persamaan (3.26).

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (3.24)$$

$$v_s = \frac{\sqrt{G}}{\rho} \quad (3.25)$$

$$G_{max} = \rho \times v_s^2 \quad (3.26)$$

Dengan

ρ : Rapat massa (kN/m^3)

V_s : Kecepatan Gelombang Geser (m/s)

γ : Berat jenis tanah (kN/m^3)

g : Konstanta gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Beberapa peneliti berusaha memperoleh Persamaan empiris untuk menentukan nilai modulus geser maksimum (G_{max}), karena mahal dan sulitnya melakukan uji lapangan dan laboratorium, salah satunya dengan cara menemukan korelasi antara G_{max} dan angka pori (e) melalui uji laboratorium dengan memperhitungkan tegangan efektif rata-rata melalui Persamaan (3.27). Penelitian tersebut menghasilkan fungsi angka pori seperti pada Persamaan (3.28).

$$\sigma' m = 1 \cdot 3 [\sigma v + 2 \cdot \sigma v (1 - \sin \phi)] \quad (3.27)$$

$$G_{max} = A \times F(e) \times (\sigma m') n \quad (3.28)$$

Dengan

e : Angka pori

A,n : Konstanta

$\sigma' v$: Tegangan vertikal efektif (kN/m²)

ϕ : Sudut geser dalam (°)

$\sigma' m$: Tegangan efektif rata-rata, (kN/m²)

Persamaan fungsi angka pori yang digunakan pada penelitian ini dirangkum pada Tabel 3.14.

Tabel 3.14 Rangkuman Persamaan Gmax dan Angka Pori

Peneliti	A	F (e)	n	Jenis Tanah yang Digunakan
Hardin-Black (1968)	3270	$(2,97-e)^2 / (1+e)$	0,6	Kaolinite
Hardin-Richart (1963)	7000	$(2,17-e)^2 / (1+e)$	0,5	Pasir ottawa butir bulat
Kokusho-Esashi (1981)	13000	$(2,17-e)^2 / (1+e)$	0,55	Batu pecah

(sumber : KepMen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004)

Energi dari beban dinamik (misalnya, perambatan gelombang seismik) jika diberikan pada media tanah, maka sebagian energinya akan terabsorpsi (teredam) yang menghasilkan pengurangan terhadap amplitudo gelombangnya. Perilaku pengurangan tersebut memberikan informasi mengenai nilai rasio redaman (D) tanah (Richart, 1970).

Rollins (1998) melakukan penelitian dari bahan berbutir kasar yang diuji di laboratorium dengan menggunakan triaxial siklik. Hasilnya berupa Persamaan (2.29) dan Persamaan (2.30) mengenai empirik hubungan antara G/ Gmax dan D dengan regangan geser (γ).

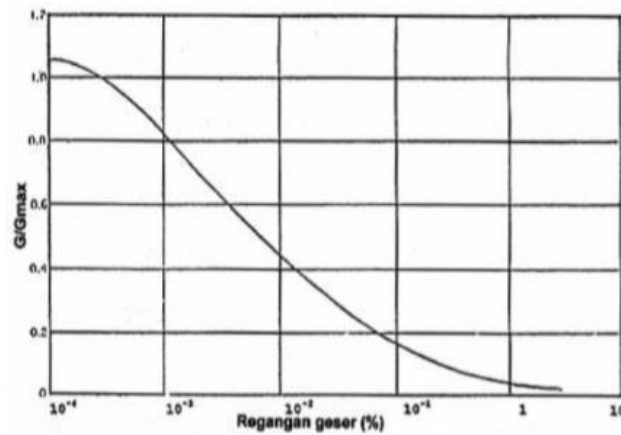
$$G/G_{max} = \frac{1}{(1.2+16(1+10^{-20\gamma}))} \quad (3.29)$$

$$D = 0.8 + 18 (1 + 0.15\gamma^{-0.9})^{-0.75} \quad (3.30)$$

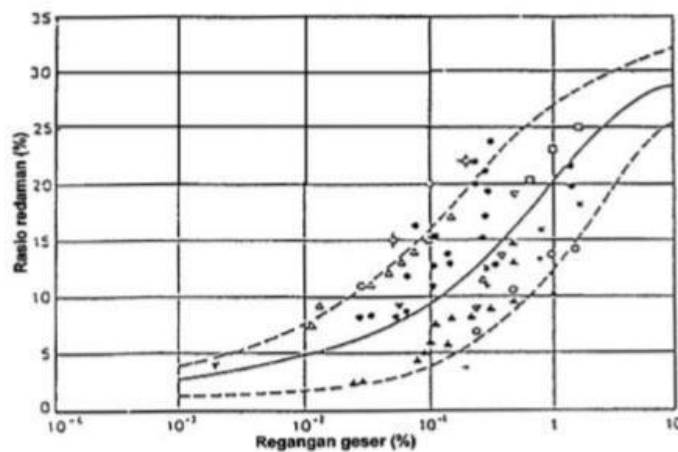
Dengan:

- D : Rasio redaman (%)
 G/G_{\max} : Modulus Geser Penormalan
 γ : Berat jenis tanah (kN/m^3)

Besaran nilai dari D dan G/G_{\max} dari tanah berbutir halus diperkirakan menggunakan metode Seed dan Idriss (1970). Grafik hubungan antara D dan G/G_{\max} dengan regangan geser γ (%) seperti terlihat pada Gambar 3.17. dan Gambar 3.18.



Gambar 3.17 Grafik Hubungan antara G/G_{\max} dan Regangan Geser Tanah Berbutir Halus
(sumber : Seed dan Idriss, 1970)



Gambar 3.18 Grafik Hubungan Antara Rasio Redaman dan Regangan Geser untuk Tanah Berbutir Halus
(sumber : Seed dan Idriss, 1970)

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Dalam suatu proses penelitian membutuhkan analisis yang teliti. Untuk dapat melakukan analisis yang baik, konsep dasar, informasi, serta alat bantu yang memadai. Selain itu metodologi juga sangat penting demi kelancaran menjawab permasalahan yang telah dirumuskan pada BAB sebelumnya.

Informasi penting yang diperlukan dalam penelitian ini mencakup data teknis bendungan serta gambar kerja (*shop drawing*). Data dikumpulkan menggunakan pengumpulan data sekunder dari pihak yang terkait. Data teknis bendungan dan gambar kerja dari bendungan tinjauan diperoleh dengan mengajukan permohonan data kepada Badan Wilayah Sungai (BWS) Provinsi Maluku.

Analisis stabilitas bendungan dilakukan dengan bantuan *software GeoStudio* untuk pemodelan bendungan untuk analisis stabilitas statik dan dinamik, *software R-Crisis 20.0* untuk analisis *seismic hazard* menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Hasil dari analisis dengan *GeoStudio* merupakan nilai *safety factor* dan deformasi bendungan. Pada akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan dari hasil analisis terhadap nilai *safety factor* dan deformasi minimum yang apakah sudah memenuhi syarat keamanan.

4.2 Data Bendungan

Data yang dibutuhkan untuk melakukan analisis stabilitas bendungan metode statik dan dinamik adalah sebagai berikut:

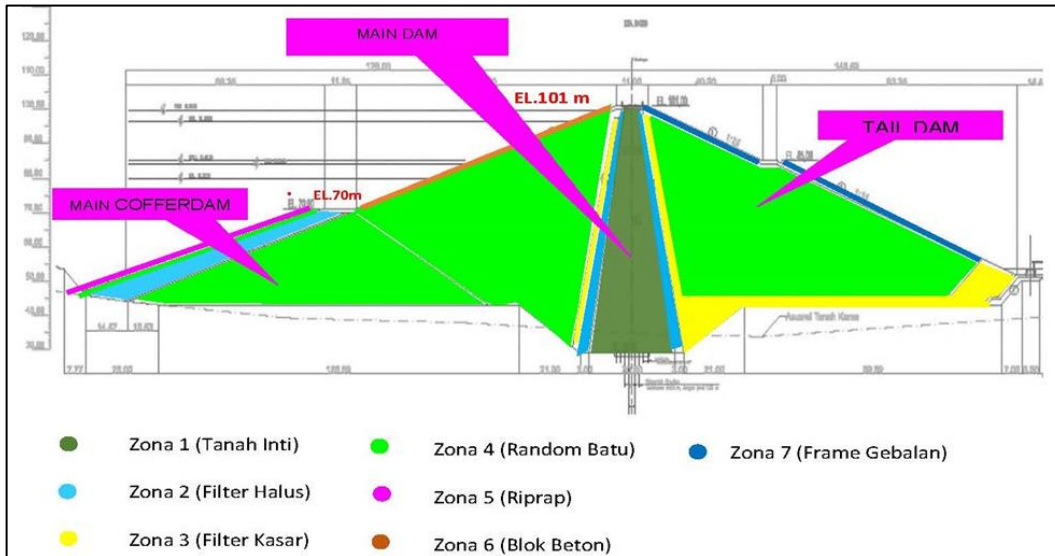
4.2.1 Material Bendungan

Bendungan Way - Apu termasuk tipe bendungan urugan dengan random batu. Disebut demikian karena material yang dipakai sebagai pembentuk bendungan sebagian besar adalah urugan tanah dan pada zona-zona tertentu

diurug dengan bebatuan. Ditinjau dari penempatan dan susunan bahan yang membentuk tubuh bendungan maka Bendungan Way - Apu termasuk golongan bendungan urugan zonal tipe bendungan inti vertikal (DR. Suyonososrodarsono, Kensaku Takeda, Bendungan tipe Urugan). Data input bendungan digunakan sebagai pemodelan bendungan. Data tersebut merupakan data sekunder berupa parameter material tubuh dan fondasi bendungan. Secara rinci data material bendungan disajikan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Parameter Desain Material Timbunan Bendungan Way - Apu

No	Material	Parameter				
		Berat Isi Kering	Berat Isi Basah	Berat Isi Jenuh	Sudut Geser Dalam	
					Total	Efektif
$\gamma\delta$ (t/m ³)	$\gamma\tau$ (t/m ³)	$\gamma\sigma$ (t/m ³)	Φ	Φ		
1	Inti	1,66	1,95	2,04	16,45	23,27
2	Filter Halus	1,66	1,70	2,05	31,72	-
3	Filter kasar	1,77	1,84	2,13	36,88	-
4	Random Batu	1,71	1,82	2,07	35,43	-
5	Rip-rap	1,30	1,35	1,80	40,00	-
6	Pondasi Aluvial	1,92	1,98	2,21	35,65	-
7	Pondasi Shale-CL	1,70	1,93	2,06	25,25	-
8	Pondasi Sekis-CM	1,78	2,00	2,05	37,00	-



Gambar 4.1 Zona Material Pembentuk Bendungan Way - Apu

4.2.2 Data Teknis Bendungan

Berikut ini adalah data teknis terkait dengan Bendungan Way - Apu:

1. Sungai : Way – Apu.
2. Luas daerah aliran : 450 km²
3. Elevasi muka air normal : + 96,50 m
4. Elevasi muka air banjir : + 99,75 m
5. Elevasi muka air rendah : + 84,88 m
6. Debit masuk rata-rata : 14,80 m³ /det
7. Debit PMF : 3.248 m³ /det
8. Tipe : Zona inti tegak dengan timbunan batu
9. Tinggi dari dasar sungai : 51,00 meter
10. Elevasi mercu : +101,1 meter
11. Panjang mercu : 463 meter

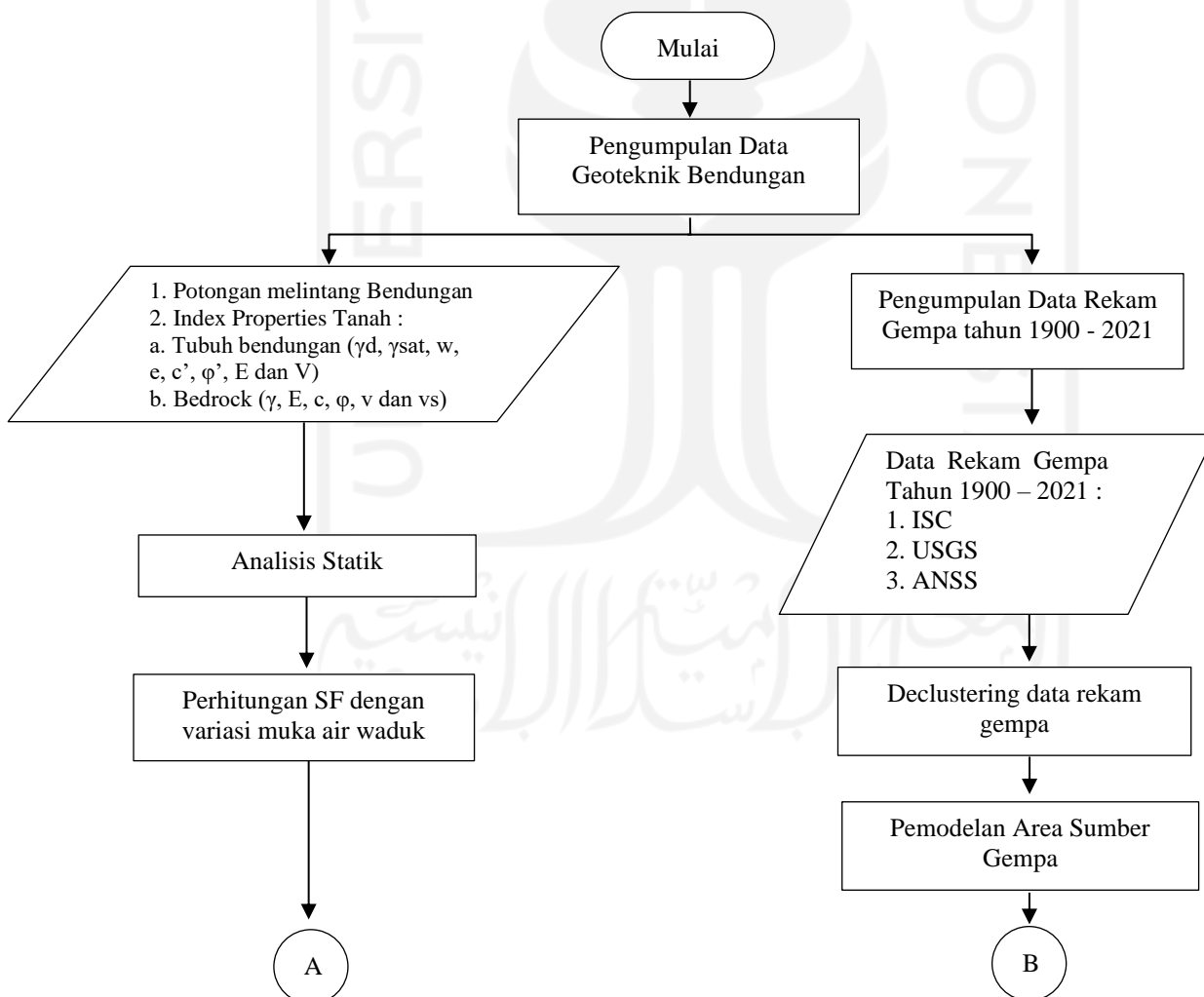
4.3 Peralatan Penelitian

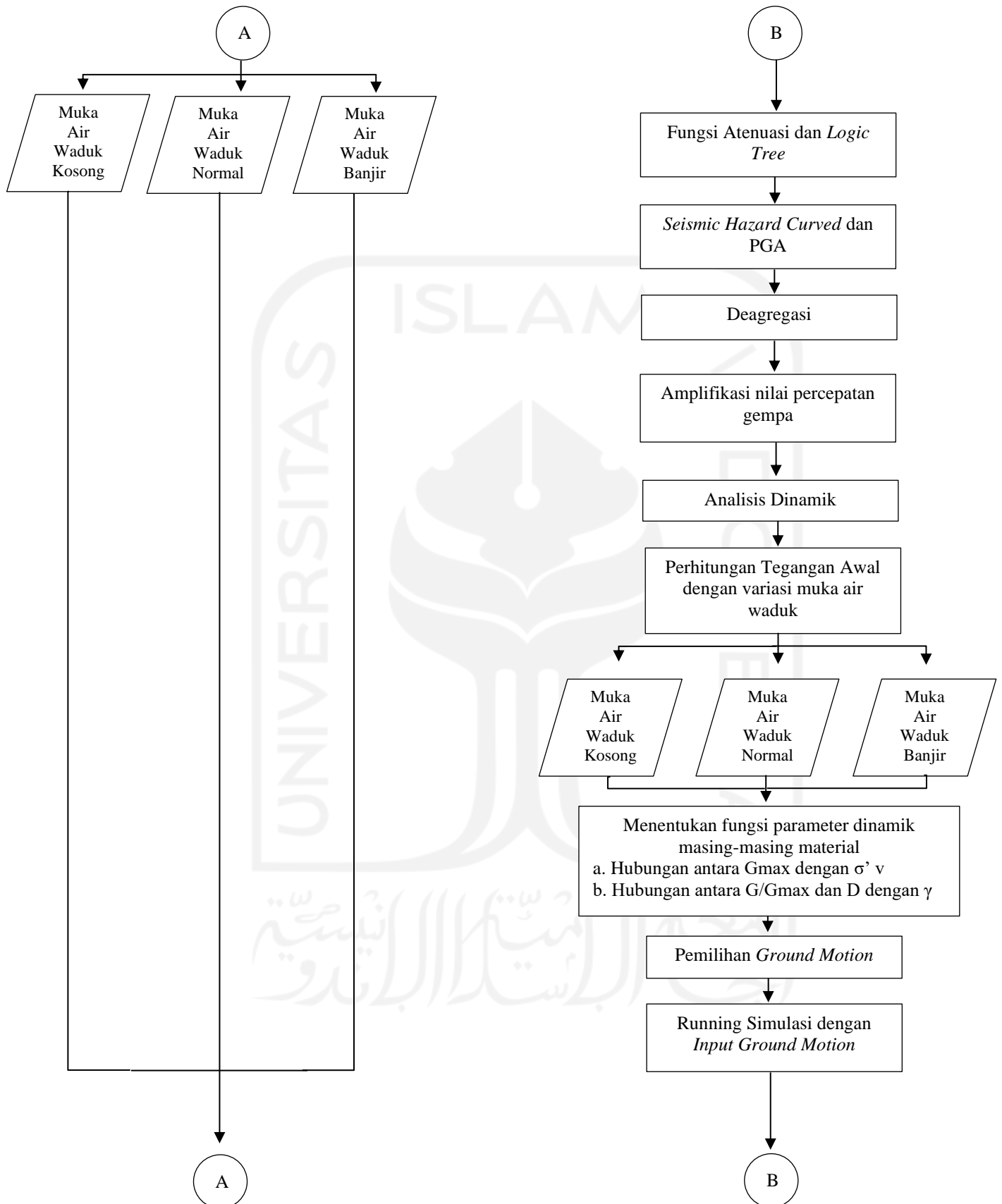
Untuk mempermudah dalam proses analisis data maka peneliti menggunakan beberapa *software*, antara lain:

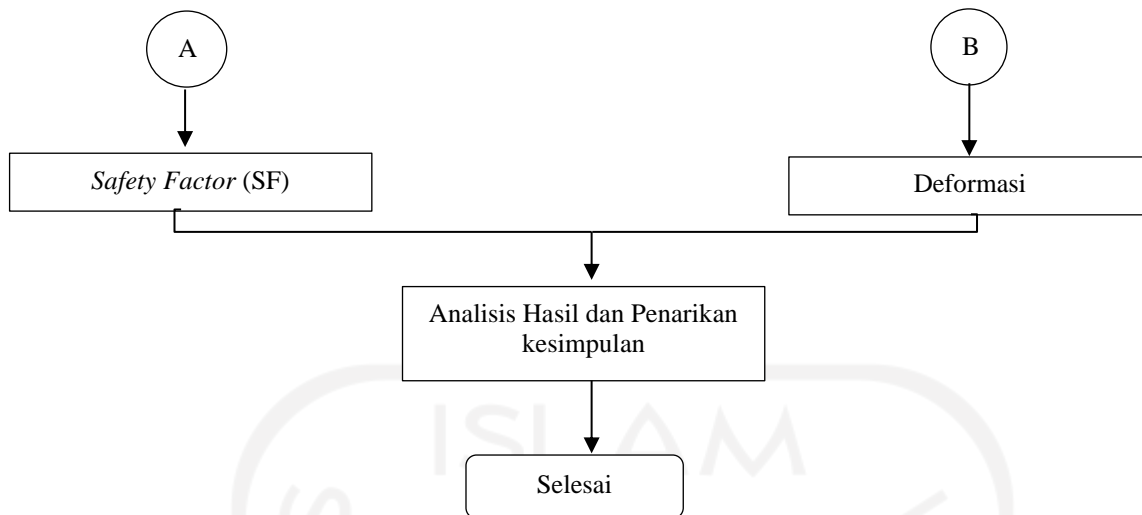
1. *Microsoft Office Excel*, untuk membantu dalam pengolahan data gempa dan perhitungan *input* parameter material tubuh dan fondasi bendungan.
2. *Z map6.0*, untuk declustering data rekam gempa.
3. *ArGIS*, untuk pemodelan sumber area kejadian gempa.
4. *R-Crisis 20.0*, untuk analisis resiko gempa dengan PSHA dan disaggregation.
5. *GeoStudio 2018*, untuk pemodelan analisis stabilitas bendungan.

4.4 Diagram Alir Penelitian

Tahapan yang akan diambil dalam penelitian ini akan mengikuti diagram alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.







Gambar 4.2 Diagram Alir Penelitian

4.5 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu:

4.5.1 Pengumpulan Data Parameter Geoteknik Bandungan

Input parameter tubuh bendungan yang digunakan untuk analisis stabilitas bendungan didapat berdasarkan data sekunder. Ketidaklengkapan data yang tersedia menjadikan sulit dalam pemodelan, sehingga diperlukan adanya korelasi. Beberapa nilai parameter tanah dengan bantuan korelasi menggunakan acuan SNI 8064:2016 pada **Tabel 3.1**, antara lain kadar air (w), berat jenis tanah (G_s), modulus elastisitas (E), dan *poisson ratio* (ν). Nilai parameter tanah yang lain juga dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (3.1) hingga Persamaan (3.3) yaitu nilai angka pori (e), berat isi basah (γ_b) dan berat isi jenuh (γ_{sat}).

4.5.2 Analisis Beban Gempa/ *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*

Tahapan proses analisis beban gempa (*probabilistic seismic hazard analysis*) adalah sebagai berikut:

1. Pencarian Data Rekam Gempa.

Data rekam gempa diperoleh dari katalog gempa dengan pusat titik lokasi

bendungan pada rentang kejadian dari tahun 1900 sampai 2020. Data diperoleh melalui arsip dari website USGS, ANSS dan ISC. Data tersebut digunakan untuk menghitung percepatan tanah maksimum. Data input pencarian katalog gempa adalah sebagai berikut:

- a. Latitude : -3,5533918
- b. Longitude : 126,8357941
- c. Magnitudo : 4,0 – 9,0
- d. Radius : 500 km
- e. Kedalaman : 0-300 km.

2. Penyeragaman Magnitudo.

Data katalog kejadian gempa yang dikumpulkan dari berbagai sumber katalog masih menggunakan jenis skala magnitudo yang berbeda, sehingga diperlukan penyeragaman skala *magnitudo* menjadi momen magnitudo (MW) menggunakan Persamaan yang berada pada **Tabel 3.5**

3. *Declustering*.

Proses pemisahan kejadian gempa utama dan gempa susulan. Proses *declustering* menggunakan bantuan *software* Z.MAP 6.0 menggunakan metode Gardner dan Knopoff (1974).

4. Analisis Kelengkapan Data Gempa.

Data gempa yang kurang lengkap akan menyebabkan *underestimated* atau *overestimated* pada hasil analisis PSHA, sehingga perlu dilakukan pemisahan data kelengkapan gempa dari hasil *decluster*. Metode analisis kelengkapan data gempa menggunakan metode Stepp (1973). Pengambilan data yang lengkap didasarkan dengan pengamatan visual terhadap hasil grafik. Data yang dianggap lengkap adalah data yang memiliki kemiringan yang konstan, jika terjadi perubahan kemiringan garis maka dianggap perubahan kemiringan garis tersebut batas kelengkapan data. Perubahan kemiringan dari grafik menandakan adanya perubahan nilai deviasi dari data.

5. Pemodelan Area Sumber Gempa.

Data hasil analisis kelengkapan di modelkan dalam setiap area. Pemodelan area sumber gempa menggunakan bantuan *software ArcGIS*. Kejadian gempa dibagi menjadi beberapa interval kedalaman, yaitu 0 sampai 50 km untuk gempa *Shallow Crustal* termasuk subduksi dan patahan. Gempa *Deep Background* dimasukkan kedalam interval kedalaman 51 sampai 175 km dan 176 sampai 300 km.

Tiap interval kedalaman data gempa akan diambil nilai tengahnya untuk dijadikan satu kedalaman untuk tiap interval. Nilai kedalaman yang diambil untuk interval 0 sampai 50 km adalah 25 km, 112.5 km untuk interval 50 sampai 175 km, dan 237,5 km untuk interval kedalaman 175 sampai 300 km. Data gempa pada tiap kedalaman akan dikelompokkan untuk dijadikan *area source* berdasarkan gempa yang saling berdekatan. *Area source* akan dibentuk menjadi beberapa *polygon* sebagai input geometri untuk analisis kegempaan. Untuk gempa yang memiliki jarak yang berjauhan dan atau tidak bisa dikelompokkan akan dijadikan satu *area source* untuk gempa *deep background*. Kedalaman gempa area subduksi dimasukan kedalam interval kedalaman 0 sampai 50 km, akan tetapi kedalaman yang diambil tidak ditetapkan 25 km seperti gempa patahan. Kedalaman gempa subduksi mengikuti geometri dari subduksi dengan kedalaman bagian atas subduksi 5 km dan bagian bawah 50 km. Geometri dari area subduksi diambil dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Gempa yang masuk kedalam area subduksi dianggap sebagai gempa yang bersumber dari subduksi, sehingga tidak dilakukan pengelompokan. Data setiap *polygon* tersebut diambil koordinatnya untuk dimodelkan dalam *R-CRISIS 20.0* untuk analisis PSHA.

6. Perhitungan Parameter Seismik Gempa.

Data gempa yang masuk kedalam suatu *area source* akan dihitung untuk mendapatkan nilai masukan dalam *source seismicity* berupa beta, lamda dan magnitudo maksimum. Bentuk *polygon* dari hasil pengelompokan

akan menjadi *input geometry source*. Perhitungan yang dilakukan untuk mengetahui nilai beta menggunakan Persamaan (3.16) dan lamda menggunakan Persamaan (3.17). Hasil tersebut akan menjadi input dalam R-CRISIS 20.0.

7. Penentuan Fungsi Atenuasi dan *Logic-Tree*.

Penelitian ini menggunakan fungsi atenuasi *Next Ground Attenuation* (NGA) sesuai peta gempa 2017. Fungsi atenuasi NGA dipilih karena telah menyesuaikan dengan data rekam gempa seluruh dunia. *Logic tree* digunakan untuk memberikan faktor pembobot yang diintegrasikan sebagai kemungkinan relatif dari setiap model. Pemakaian model disesuaikan dengan model sumber gempa yang digunakan. Gempa *shallow crustal* digunakan fungsi atenuasi patahan dan subduksi sementara untuk gempa *deep background* menggunakan fungsi atenuasi *interslab*.

8. Percepatan Gempa Maksimum dan *Seismic Hazard Curved*.

Analisis resiko gempa (PSHA) pada penelitian ini menggunakan bantuan *software R-CRISIS 20.0*. Pemodelan ini dibantu dengan memasukkan area sumber gempa, parameter seismik, fungsi atenuasi, dan *logic tree*. Hasil PSHA ini adalah percepatan maksimum batuan dasar/ *bedrock (amaks)*. Percepatan gempa akan ditampilkan dengan grafik spektra yang menggambarkan hubungan percepatan gempa dengan waktu. *Seismic Hazard Curved* juga dimunculkan untuk mengetahui nilai probabilitas terlampauinya suatu intensitas atau percepatan gempa ada nilai tertentu.

9. Deagregasi.

Analisis deagregasi dilakukan untuk mengetahui kontribusi relatif gempa yang berpengaruh terhadap bendungan yang ditinjau. Tahap analisis ini merupakan salah satu hasil dari R-CRISIS 20.0. Hasil deagregasi ini memberikan nilai magnitudo dan jarak yang paling berpengaruh dari lokasi tinjauan. Proses deagregasi memungkinkan memunculkan beberapa

nilai yang memberikan kontribusi terhadap lokasi tinjauan, tetapi dipilih nilai yang memiliki kontribusi terbesar.

10. Penentuan *Ground Motion*.

Penentuan *ground motion* berdasarkan riwayat waktu yang diambil dari *website PEER (Pacific Earthquake Engineering Research)*. Nilai magnitudo dan jarak dari hasil deagregasi digunakan sebagai input dalam penentuan *ground motion*. Hasil pencarian akan memunculkan beberapa *ground motion* yang memiliki kriteria yang mirip dengan lokasi tinjauan. *Ground motion* yang disajikan dari hasil pencarian kemudian akan dipilih satu untuk dijadikan input aselerogram pada pemodelan dinamik.

11. Amplifikasi Nilai Percepatan Gempa.

Perhitungan percepatan gempa pada permukaan tanah dengan mengalikan hasil PGA dari *R-CRISIS 20.0* dengan faktor pengali hasil amplifikasi. Faktor amplifikasi ditentukan berdasarkan *site class* lokasi tinjauan berdasarkan nilai kecepatan rata-rata gelombang geser (v_s). Klasifikasi tanah yang digunakan adalah SB dengan asumsi dasar bahwa letak tubuh bendungan terletak di atas lapisan tanah yang baik. sehingga didapat *ground motion* pada permukaan tanah sebagai input pada analisis stabilitas bendungan selanjutnya.

4.5.3 Analisis Stabilitas Bendungan

Analisis yang digunakan untuk stabilitas tubuh bendungan menggunakan metode statik dan dinamik. Tahap pemodelan analisis ini dilakukan dengan bantuan program *GeoStudio 2018*. Analisa stabilitas statik dan dinamik dilakukan pada kondisi 3 muka air waduk sesuai pada SNI 8064:2016 yaitu sebagai berikut:

1. Muka air waduk kosong dengan elevasi + 84.88 m.
2. Muka air waduk normal dengan elevasi + 96.50 m.
3. Muka air waduk banjir dengan elevasi +99.75 m.

4.5.4 Analisis Statik

Analisis statik merupakan pemodelan bendungan tanpa adanya beban gempa. Tahap analisis ini menggunakan Sigma/W dan Slope/W dalam *Geosudio* 2012. Faktor keamanan minimum (*safety factor*) menggunakan acuan SNI 8064:2016. Nilai minimum keamanan lereng untuk bendungan urugan disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Nilai Faktor Keamanan (FK) Minimum untuk Bendungan Urugan

No	Kondisi muka air waduk	Elevasi (m)	FK Minimum
1	Muka Air Waduk Kosong	+ 84.88	1,5
2	Muka Air Waduk Normal	+ 96.50	1,3
3	Muka Air Waduk Banjir	+ 99.75	1,5

4.5.5 Analisis Dinamik

Analisis dinamik merupakan pemodelan bendungan menggunakan beban gempa. Tahap analisis ini menggunakan gabungan Sigma/W dan Quake/W dalam *GeoStudio* 2018. Analisa Dinamik dilakukan beban SEE mengacu pada aturan Pd-T-14-2004- A.

Hasil analisis dinamik adalah nilai *displacement* bendungan akibat gempa. Angka aman adanya *displacement* pada bendungan adalah setengah dari tinggi jagaan, dimana tinggi jagaan pada bendungan yang ditinjau sebesar 3 m.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Tahapan Penelitian

Software R-CRISIS 20.0 digunakan untuk melakukan analisis probabilitas bahaya gempa. *R-CRISIS* adalah versi terbaru dari *CRISIS*, merupakan solusi yang mendunia dan terkenal untuk melakukan analisis bahaya seismik probabilistik (PSHA). Program ini adalah hasil dari lebih dari 30 tahun inovasi, pengembangan dan peningkatan berkelanjutan, menyediakan perangkat lunak yang paling komprehensif, namun mudah digunakan, cocok untuk penggunaan akademik dan komersial.

5.1.1 Pengumpulan Data Parameter Geoteknik Bandungan

Penelitian ini menggunakan data rekam gempa dari 3 (tiga) sumber katalog yang berbeda, yaitu:

1. United States Geological Survey (USGS),
2. Advanced National Seismic System (ANSS),
3. International Seismological Survey (ISC),

Rekaman data gempa terbatas pada radius 500 km dari titik pusat Bandungan Way - Apu, dengan magnitudo 4 sampai dengan 9 yang terjadi pada 1 Januari 1990 hingga 31 Desember 2021. Batasan yang digunakan dalam seleksi data gempa yang digunakan untuk penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Parameter Bendungan Urugan

Parameter	Value
<i>Latitude</i>	-3,5533918
<i>Longitude</i>	126,8357941
Magnitudo	4,0 – 9,0
<i>Radius</i>	500 km

Parameter	Value
<i>Depth</i>	0 - 300 km
<i>Time frame</i>	1 Januari 1900 - 31 December 2021

Hasil unduhan data gempa kemudian digabungkan dan dilakukan seleksi terhadap gempa yang sama. Rekapitulasi rekaman data gempa yang diunduh dari 3 (tiga) sumber katalog gempa dan gabungannya tampak pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Data Rekam Seismik

Source	No Data	M _S	M _B	M _D	M _L	M _W	M _E
ISC	14,866	302	13841	53	669	1	0
USGS	10,533	31	10082	0	3	417	0
ANSS	11,017	36	10,325	0	4	636	16
<i>Combined</i>	36,416	352	32,320	53	676	914	16

5.1.2 Penyeragaman Magnitudo Gempa

Mengingat rekaman gempa yang diperoleh dari katalog gempa tersebut menggunakan jenis magnitudo yang berbeda - beda, diantaranya *magnitude momen* (M_w), *magnitude surface* (M_s), *magnitude body* (M_b) dan *magnitude local* (M_L) sehingga perlu diseragamkan menjadi *magnitude momen* (M_w).

Konversi skala magnitudo menggunakan bantuan *software Microsoft Excel* dengan Persamaan korelasi konversi antara beberapa skala magnitudo untuk wilayah Indonesia (Irsyam, 2010). Konversi skala magnitudo tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.3.

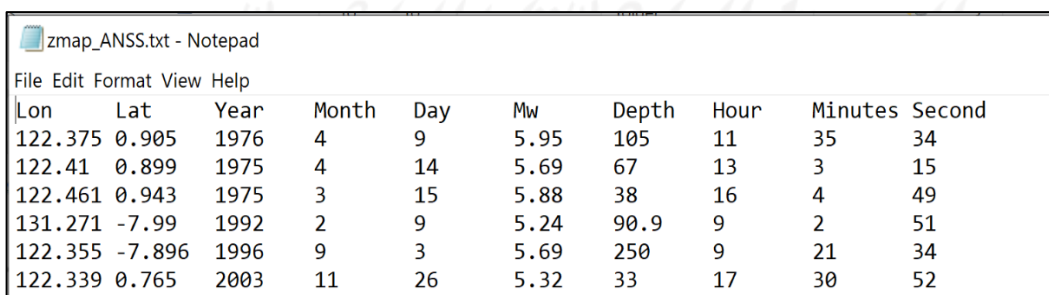
Tabel 5.3 Konversi Skala Magnitudo

Persamaan Konversi	Range Data
$M_w = 0.143M_s^2 - 1.051 M_s + 7.285$	$4.5 \leq M_s \leq 8.6$
$M_w = 0.114M_b^2 - 0.556 M_b + 5.56$	$4.9 \leq M_b \leq 8.2$
$M_w = 0.787M_E + 1.537$	$5.2 \leq M_E \leq 7.3$
$M_b = 0.125M_L^2 - 0.389M_L + 3.513$	$3.0 \leq M_L \leq 6.2$
$M_L = 0.717M_d + 1.003$	$3.0 \leq M_L \leq 5.8$

5.1.3 Declustering Data

Data gempa perlu dibersihkan dari pengaruh gempa susulan (Sunardi, 2009). Proses *declustering* bertujuan untuk memisahkan gempa utama (*mainshock*) dari gempa – gempa susulan dan *background* (*foreshock* dan *aftershock*). Penggunaan data gempa susulan baik *foreshock* maupun *aftershock* menyebabkan hasil kurang sesuai (Makrup, 2013). Proses *declustering* menggunakan bantuan *software zMap* dengan algoritma Gardner dan Knopoff (Gardner dan Knopoff, 1974).

Sebelum memproses data dengan *zMap*, katalog gempa perlu diformat sesuai dengan ketentuan *input zMap*: *Lon; Lat; Year; Month; Day; Mw; Depth; Hour; Minutes; Second*. Rincian penjelasan tersebut dapat dilihat pada gambar tangkapan layar/ *screenshot* yang tampak pada Gambar 5.1.

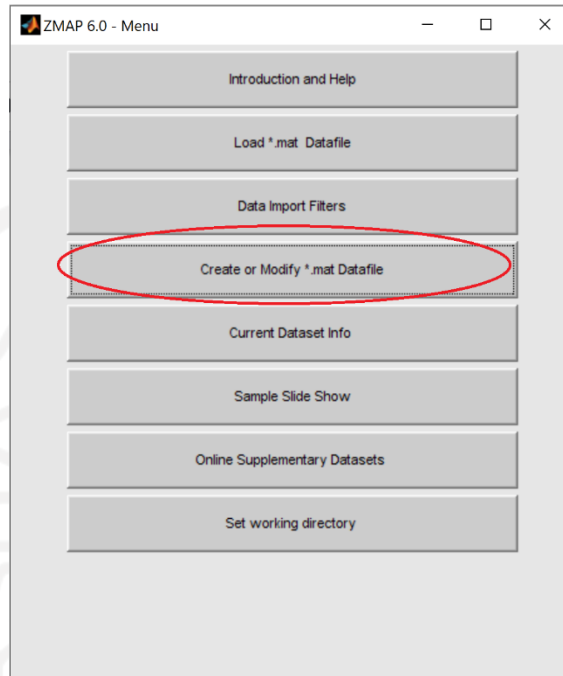


Lon	Lat	Year	Month	Day	Mw	Depth	Hour	Minutes	Second
122.375	0.905	1976	4	9	5.95	105	11	35	34
122.41	0.899	1975	4	14	5.69	67	13	3	15
122.461	0.943	1975	3	15	5.88	38	16	4	49
131.271	-7.99	1992	2	9	5.24	90.9	9	2	51
122.355	-7.896	1996	9	3	5.69	250	9	21	34
122.339	0.765	2003	11	26	5.32	33	17	30	52

Gambar 5.1 Format Ketentuan *Input zMap*

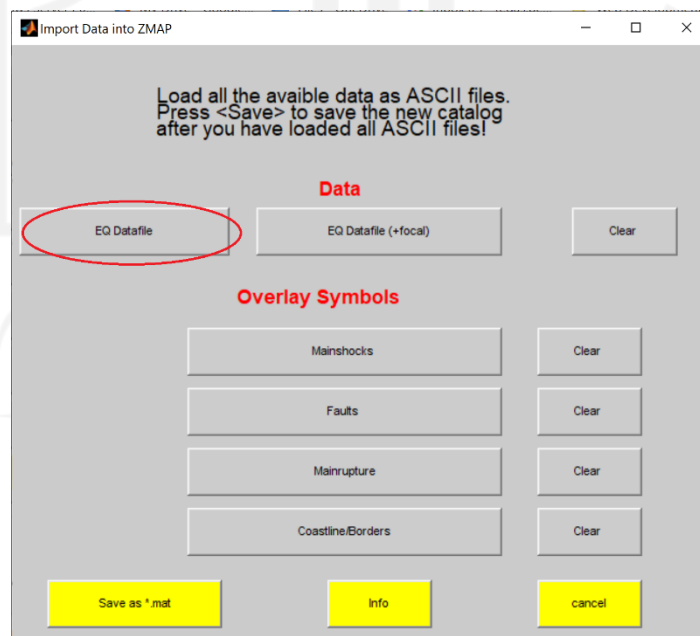
Proses *declustering* dilakukan dengan menggunakan *software zMap* dan dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada menu utama *zMap v6.0*, klik pada “*Create or modify *.mat Datafile*”.



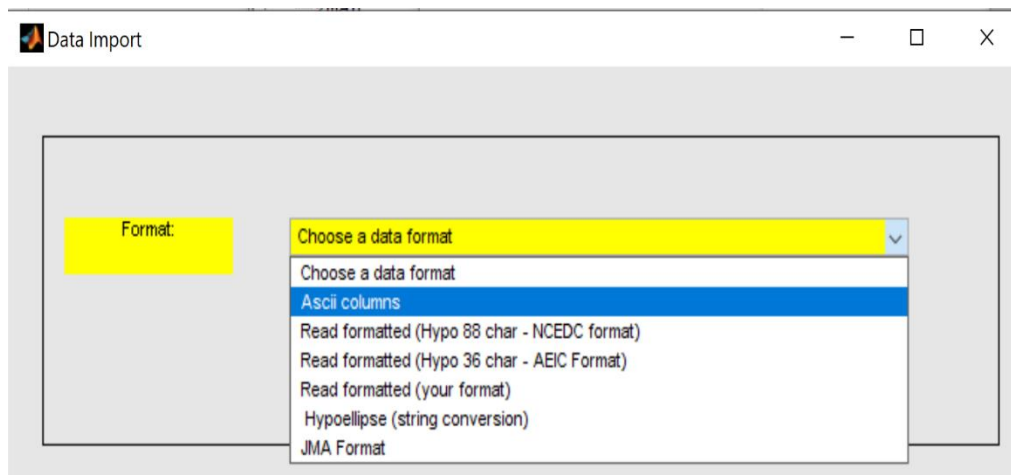
Gambar 5.2 Menu Utama *zMap v6.0*

2. Pada jendela *import datafile*, pilih “*EQ datafile*”.



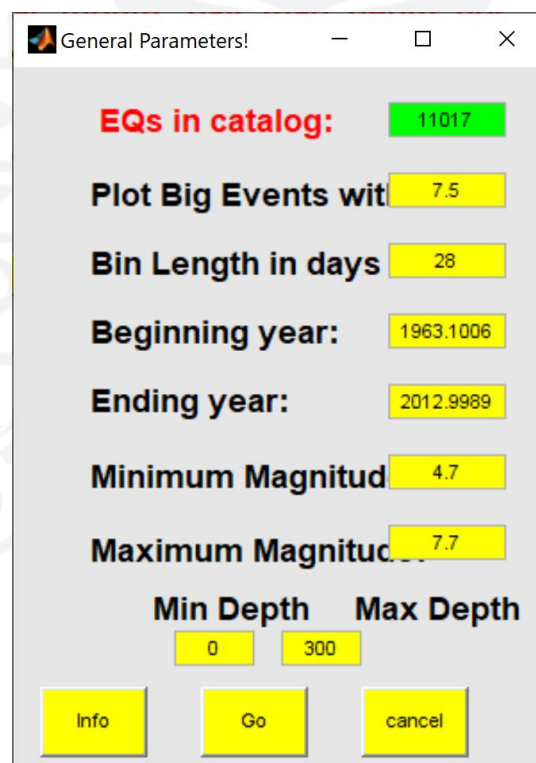
Gambar 5.3 Jendela *Import Datafile* pada *zMap*.

3. Pilih “ASCII column” pada jendela *Data import*.



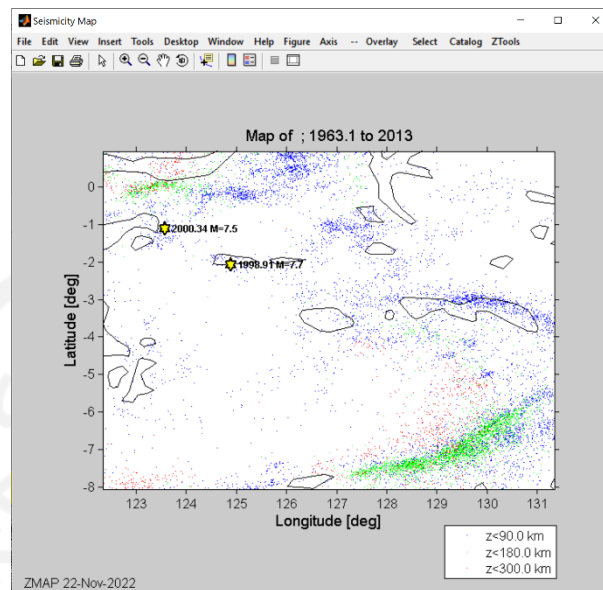
Gambar 5.4 Jendela *Data Import* pada *zMap*.

4. Muat *datafile* yang sudah disimpan sebelumnya dengan format yang sesuai dengan format yang diminta oleh aplikasi *zMap v6.0*.



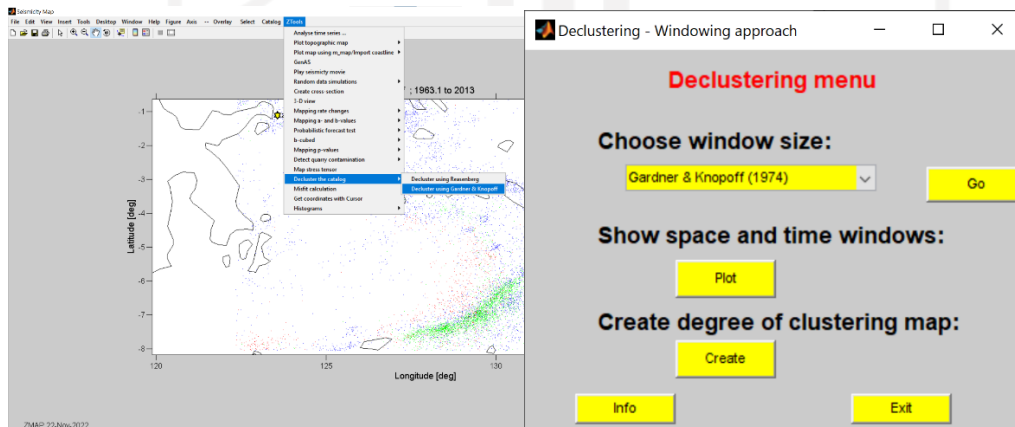
Gambar 5.5 Jendela *General Parameter* pada *zMap*.

5. Muat *coast map* pada *zMap* untuk menampilkan peta.



Gambar 5.6 Jendela *Seismicity Map* pada *zMap*.

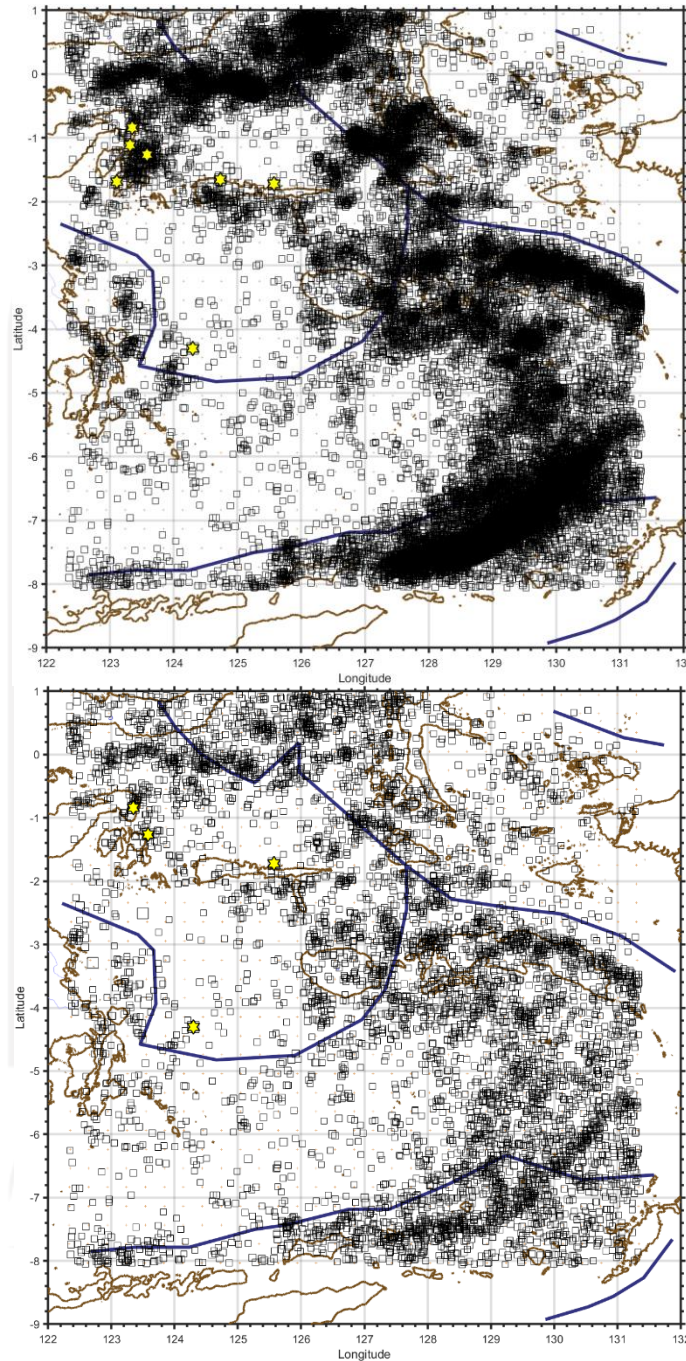
6. Untuk melakukan *declustering*, pilih *Ztools* → *Deccluster the catalog* → *Decluster using Gardner & Knopoff* → *Go*.



Gambar 5.7 *Decluster using Gardner & Knopoff* pada *zMap*.

Rekam data seismik yang telah berhasil dikumpulkan, selanjutnya dilakukan *plotting* pada peta menggunakan *software zMap*. Hasil *plotting* data rekam seismik ditunjukkan oleh Gambar 5.8. Pada Gambar tersebut, bagian atas

merupakan hasil *plotting* rekam data seismik sebelum dilakukan *declustering*, sedangkan sebelah kanan merupakan hasil *plotting* peta setelah dilakukan proses *declustering*.



Gambar 5.8 Peta *Plotting* Rekam Data Seismik (atas: sebelum dan bawah: sesudah *decluster*)

Plot katalog gempa pada peta menunjukkan kluster gempa yang sangat padat dan masih bercampur dengan gempa gempa *aftershock* dan *foreshock*. Setelah dilakukan proses *declustering*, terlihat bahwa data gempa berkurang secara signifikan dan hanya menyisakan *mainshock* saja. Dengan katalog gempa yang menyisakan gempa *mainshock* saja, hasil pada PSHA akan lebih akurat. Lebih *detail* mengenai *data plot* tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Perbandingan Katalog Seismik setelah *Declustering*

Sumber	Data Number sebelum <i>Declustering</i>	Data Number setelah <i>Declustering</i>	<i>Mainshock</i>	<i>Background</i>
ISC	14,866	4463	1132	3331
USGS	10,533	3628	875	2753
ANSS	11,017	3846	908	2938
<i>Combined</i>	36,416	7023	2062	4961

5.1.4 *Completeness Analysis*

Setelah proses *declustering* data rekam gempa, proses selanjutnya adalah analisis kelengkapan atau *completeness analysis*. Dalam melakukan analisis PSHA, diperlukan data rekam gempa yang lengkap agar hasil analisa PSHA tidak *overestimate* ataupun *underestimate*. Ketidaklengkapan data rekam gempa disebabkan oleh ketidakseragaman jaringan stasiun pemantauan gempa.

Completeness analysis dilakukan dengan menggunakan metode yang diusulkan oleh Stepp (Stepp, 1972). Untuk melakukan analisis kelengkapan, *model G-R* (Gutenberg & Richter, 1944) diterapkan pada *Frequency Magnitudo Distribution* (FMD) dengan Persamaan (lihat Persamaan 3.12):

$$\log_{10}N = a - b.M$$

Dengan N adalah jumlah kumulatif dari gempa yang lebih besar atau sama dengan magnitudo M, a dan b adalah konstanta yang menggambarkan aktivitas

gempa. Konstanta *a-value* menunjukkan banyak gempa yang lebih besar dari magnitudo 0 dan *b-value* menunjukkan rasio gempa dengan *magnitudo* kecil ke besar.

Dalam metode analisis yang diusulkan Stepp, data rekam gempa dikelompokkan menjadi beberapa rentang magnitudo. Dalam penelitian ini digunakan 5 (lima) kelas rentang magnitudo yang ditunjukkan oleh Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Rentang Magnitudo Seismik

<i>Magnitudo Range</i>
$4 \leq M_w \leq 5$
$5 \leq M_w \leq 6$
$6 \leq M_w \leq 7$
$7 \leq M_w \leq 8$
$M_w \geq 8$

Selain data dikelompokkan menurut rentang *magnitudo*, data gempa juga dikelompokkan berdasarkan rentang waktu dari yang terbaru. Dalam penelitian ini digunakan interval 10 tahun untuk setiap rentang waktu seperti tampak pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Interval Waktu Seismik

Rentang tahun	Interval
2015-2020	5
2010-2020	10
2005-2020	15
2000-2020	20
1990-2020	30
1980-2020	40
1970-2020	50

Rentang tahun	Interval
1960-2020	60
1950-2020	70
1940-2020	80
1930-2020	90
1920-2020	100
1910-2020	110
1900-2020	120

Rate of occurrence untuk masing masing range magnitudo dan interval waktu berbeda, dimana N merupakan jumlah gempa kumulatif untuk tiap interval waktu dan *magnitudo* dan λ adalah *Rate of occurrence*; N/T.

Tabel 5.7 Perhitungan Magnitudo setiap Durasi Tahun

Year Duration	T	Magnitudo in Mw									
		4 - 5		5 - 6		6 - 7		7 - 8		> 8	
		N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ
2015-2020	5	0	0	292	58.4	20	4	1	0.2	0	0
2010-2020	10	1	0.1	548	54.8	44	4.4	2	0.2	0	0
2005-2020	15	1	0.07	790	52.67	75	5	4	0.27	0	0
2000-2020	20	1	0.05	1039	51.95	99	4.95	4	0.2	5	0.25
1990-2020	30	1	0.03	1473	49.1	153	5.1	6	0.2	8	0.27
1980-2020	40	1	0.03	1733	43.33	214	5.35	9	0.23	8	0.2
1970-2020	50	1	0.02	1847	36.94	292	5.84	10	0.2	8	0.16
1960-2020	60	1	0.02	1933	32.22	334	5.57	12	0.2	10	0.17
1950-2020	70	1	0.01	1937	27.67	349	4.99	16	0.23	10	0.14
1940-2020	80	1	0.01	1939	24.24	356	4.45	17	0.21	10	0.13
1930-2020	90	1	0.01	1947	21.63	379	4.21	20	0.22	10	0.11

Year Duration	T	Magnitudo in M_w									
		4 - 5		5 - 6		6 - 7		7 - 8		> 8	
		N	λ	N	λ	N	λ	N	λ	N	λ
1920-2020	100	1	0.01	1950	19.5	395	3.95	22	0.22	10	0.1
1910-2020	110	1	0.01	1950	17.73	399	3.63	25	0.23	10	0.09
1900-2020	120	1	0.01	1950	16.25	401	3.34	26	0.22	10	0.08

Kemudian dihitung standar deviasi dari λ untuk masing-masing interval tahun dan *magnitudo* dengan Persamaan:

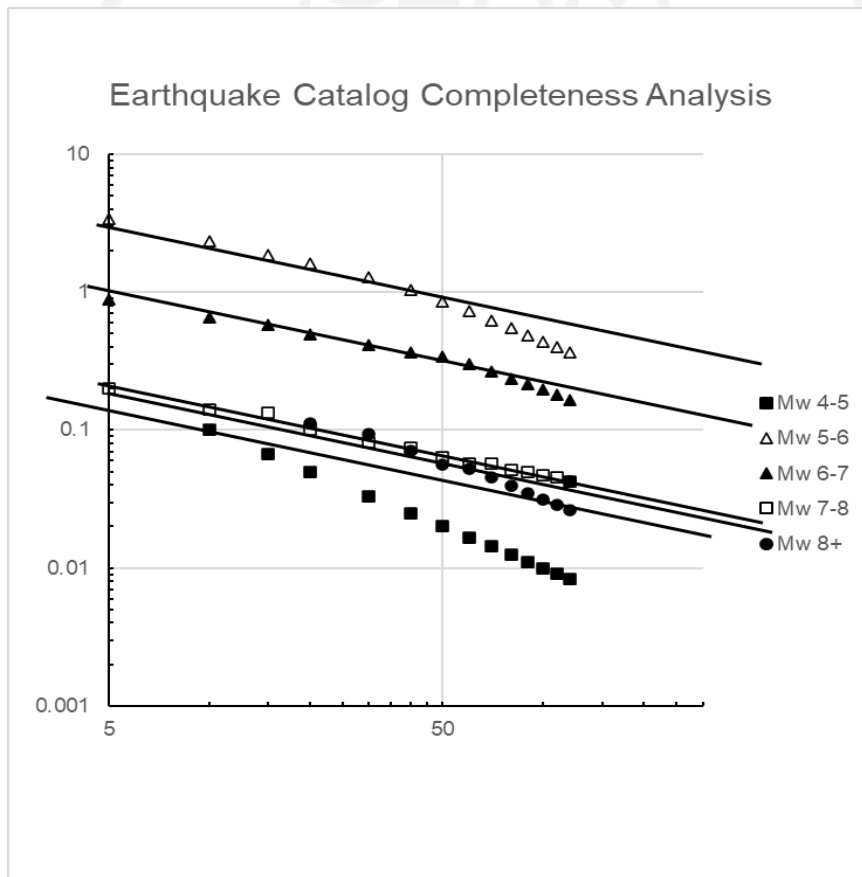
$$\sigma_\lambda = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{T}}$$

Tabel 5.8 Perhitungan Magnitudo pada Interval Waktu

Time interval	Magnitudo in M_w									
	4 - 5		5 - 6		6 - 7		7 - 8		> 8	
	λ	σ_λ	λ	σ_λ	λ	σ_λ	λ	σ_λ	λ	σ_λ
5	0	0	58.4	3.42	4	0.89	0.2	0.2	0	0
10	0.1	0.1	54.8	2.34	4.4	0.66	0.2	0.14	0	0
15	0.07	0.07	52.67	1.87	5	0.58	0.27	0.13	0	0
20	0.05	0.05	51.95	1.61	4.95	0.5	0.2	0.1	0.25	0.11
30	0.03	0.03	49.1	1.28	5.1	0.41	0.2	0.08	0.27	0.09
40	0.03	0.03	43.33	1.04	5.35	0.37	0.23	0.08	0.2	0.07
50	0.02	0.02	36.94	0.86	5.84	0.34	0.2	0.06	0.16	0.06
60	0.02	0.02	32.22	0.73	5.57	0.3	0.2	0.06	0.17	0.05
70	0.01	0.01	27.67	0.63	4.99	0.27	0.23	0.06	0.14	0.05
80	0.01	0.01	24.24	0.55	4.45	0.24	0.21	0.05	0.13	0.04
90	0.01	0.01	21.63	0.49	4.21	0.22	0.22	0.05	0.11	0.04
100	0.01	0.01	19.5	0.44	3.95	0.2	0.22	0.05	0.1	0.03
110	0.01	0.01	17.73	0.4	3.63	0.18	0.23	0.05	0.09	0.03

Time interval	Magnitudo in M_w									
	4 - 5		5 - 6		6 - 7		7 - 8		> 8	
	λ	σ_λ	λ	σ_λ	λ	σ_λ	λ	σ_λ	λ	σ_λ
120	0.01	0.01	16.25	0.37	3.34	0.17	0.22	0.04	0.08	0.03

Berdasarkan pada perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 5.8, hasil perhitungan tersebut di-plot ke dalam grafik kurva σ_λ terhadap interval waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Kurva σ_λ terhadap interval waktu T

Menurut metode Stepp, kurva σ_λ vs T untuk rekam data yang lengkap diasumsikan mendekati $slope \frac{1}{\sqrt{T}}$. Sehingga dapat ditentukan bahwa titik persinggungan antara kurva σ_λ vs T dengan $\frac{1}{\sqrt{T}}$ merupakan batas interval katalog gempa dianggap lengkap, hasilnya seperti tampak pada Tabel 5.8.

Tabel 5.9 Interval *Completeness* dari Data Gempa

<i>Magnitudo Range</i>	<i>Completeness Period (year)</i>
$4 \leq M_W < 5$	0
$5 \leq M_W < 6$	60
$6 \leq M_W < 7$	70
$7 \leq M_W < 8$	30
$M_W \geq 8$	60

Setelah mendapatkan periode yang komplit untuk masing-masing rentang *magnitudo*, dilakukan seleksi pada data rekam gempa yang akan digunakan dalam PSHA sesuai dengan periode lengkapnya.

5.1.5 Penentuan Zona Sumber Gempa

Sebagai salah satu input dalam analisis PSHA, selain data rekaman gempa, pemodelan sumber gempa harus dilakukan. Model sumber gempa dibutuhkan dalam analisis PSHA sebagai hubungan antara gempa dan model perhitungan yang digunakan untuk menentukan tingkat resiko gempa. Zona sumber gempa didefinisikan sebagai area yang mempunyai derajat gempa yang sama dan setiap titik pada zona tersebut mempunyai tingkat kemungkinan terjadinya gempa di masa mendatang yang sama.

Pada penelitian ini digunakan 3 (tiga) model sumber gempa, yaitu:

1. Zona Subduksi

Zona Subduksi adalah zona dari kejadian gempa yang disebabkan oleh *thrust fault*, *normal fault*, *reverse slip* dan *strike slip* yang terjadi di sepanjang pertemuan lempeng. Informasi zona subduksi diperoleh dari peta sumber gempa yang diterbitkan oleh PusGen. Zona gempa subduksi dibatasi untuk gempa dengan kedalaman <50 km. Untuk gempa <50 km di luar zona subduksi masuk ke dalam zona gempa *shallow background*.

2. Zona *Fault*

Zona *Fault* adalah model sumber gempa untuk gempa yang berada di zona patahan. Zona patahan ini diperoleh dari Peta Sumber Gempa.

3. Zona *Background*

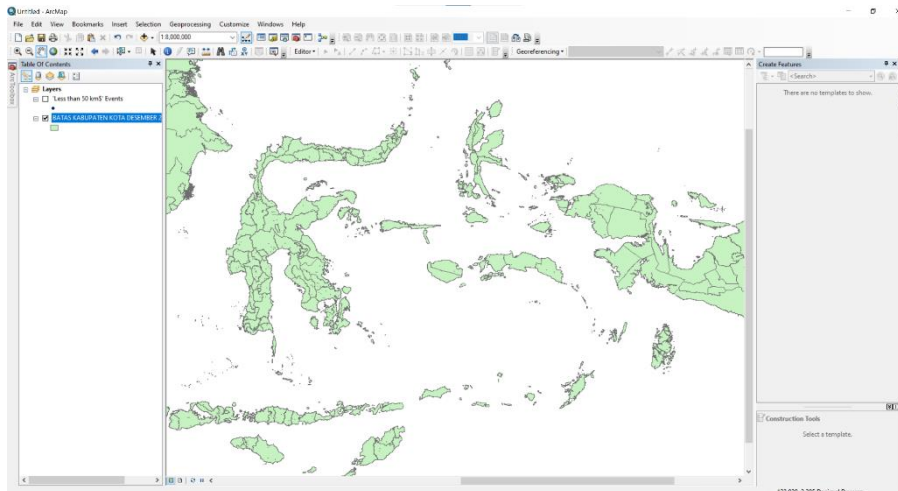
Zona *Background* adalah zona untuk gempa-gempa pada zona yang belum teridentifikasi patahannya dengan jelas tetapi pada zona tersebut terdapat kluster gempa. Dalam penelitian ini zona *background* dibagi menjadi *shallow background* untuk kedalaman <50 km, dan *deep background* untuk kedalaman 50 - 100, 100 -150, 150-200 dan 200-300 km.

Dalam aplikasi R-*CRISIS* yang digunakan untuk melakukan analisis PSHA, model sumber gempa merupakan salah satu input untuk melakukan perhitungan. Dalam aplikasi ini input sumber gempa berupa *shapefile* zona gempa dan parameter gempa untuk masing-masing zona. Pembuatan *shapefile* zona sumber gempa pada penelitian ini menggunakan bantuan aplikasi *ArcMap* dan peta sumber gempa dari PusGeN. Data rekaman gempa yang sudah lengkap di-*plot* pada peta lokasi dan kemudian di-*overlay* dengan peta sumber gempa untuk memudahkan melakukan digitasi zona sumber gempa.

Dalam menentukan zona sumber gempa menggunakan *software ArcMap* mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

1. Memuat peta kepulauan Indonesia sebagai *basemap*, *shapefile* Peta Kepulauan Indonesia diperoleh dari data batas wilayah kabupaten/kota 2019 dukcapil.

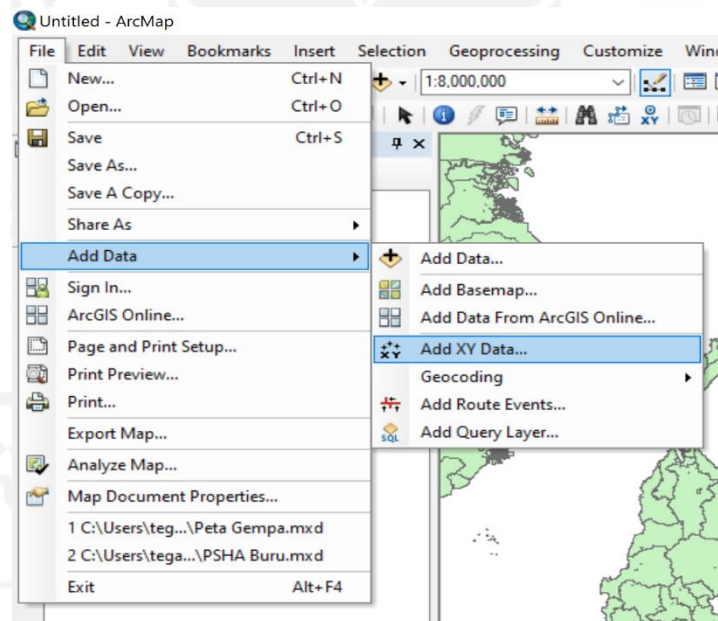
Klik *File* → *Add Data* → *Add Data* → *Pilih shapefile*.



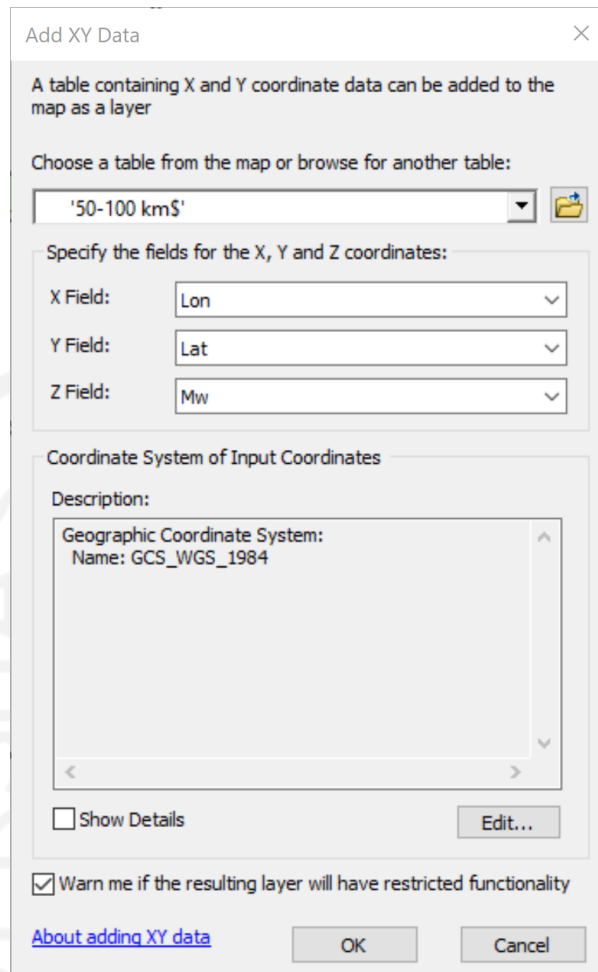
Gambar 5.10 Pengambilan Data Peta pada *Software ArcMap*

2. Memuat data gempa yang sudah dipisah berdasarkan kedalaman gempa untuk memudahkan proses pemilahan sumber gempa.

Klik *File* → *Add Data* → *Add XY Data* → Pilih file data gempa.



Gambar 5.11 Pengambilan Data Peta pada *Software ArcMap*

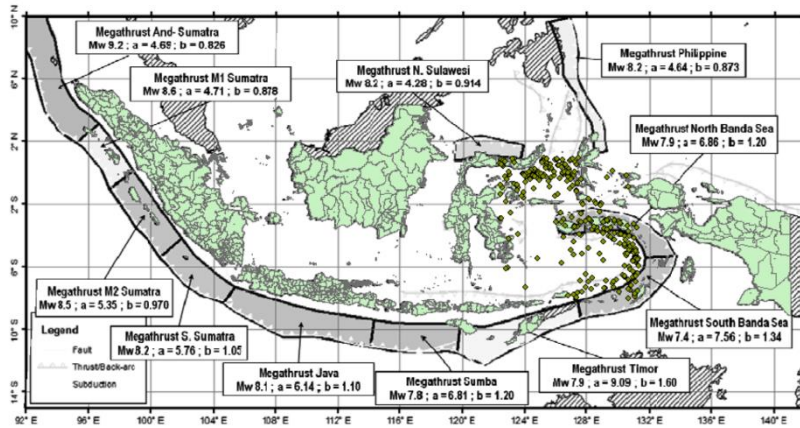


Gambar 5.12 Proses *add XY Data* pada *Software ArcMap*

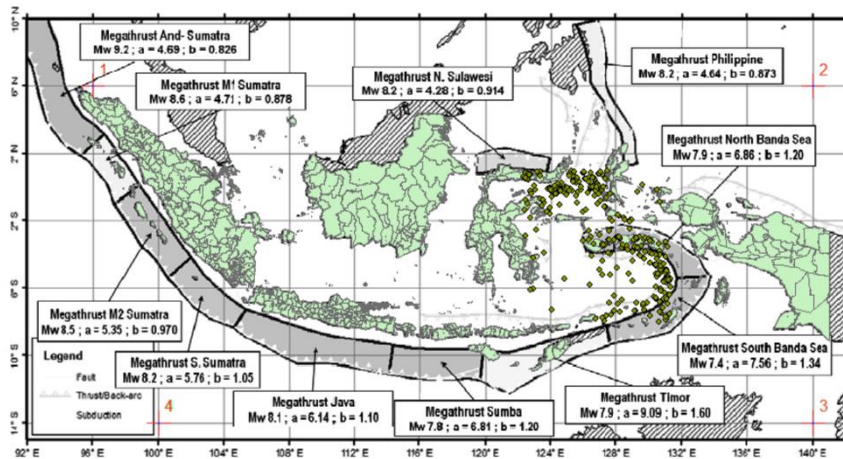
Pada jendela “*Add XY Data*”, pilih *file* data gempa dan kemudian pilih *Lon* untuk *X Field*, *Lat* untuk *Y Field* dan *Mw* untuk *Z Field*. Untuk *geographic coordinate system* menggunakan WGS 1984 sesuai dengan sistem koordinat yang digunakan pada katalog gempa.

3. Membuat *shapefile geometry* dari sumber gempa, digunakan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 terbitan PuSGen sebagai acuan.

Untuk memuat peta sumber gempa klik *File* → *Add Data* → *Add Data* → pilih *shapefile*. Peta sumber gempa ini kemudian di-*overlay* dalam peta yang sudah dimuat sebelumnya.



Gambar 5.13 Hasil *Overlay Map* pada *Software ArcMap*

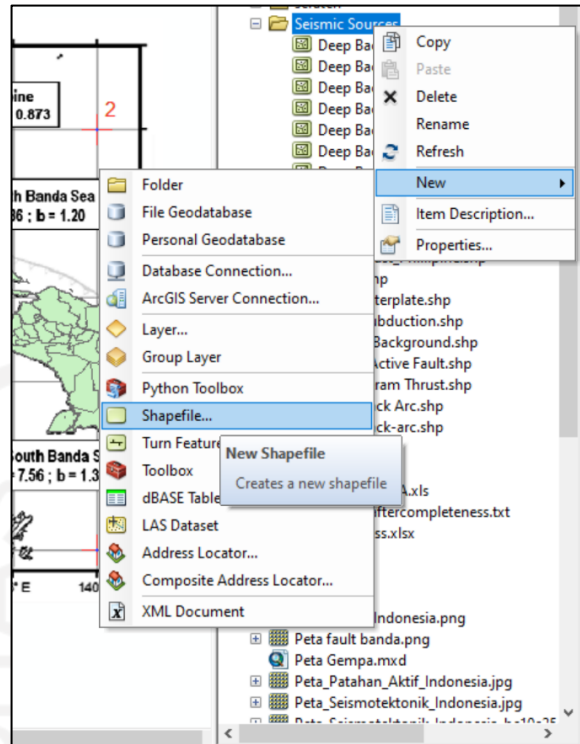


Gambar 5.14 Hasil *Georeferencing* pada *Software ArcMap*

Agar peta sumber gempa dapat posisi *overlay* peta sumber gempa sesuai dengan peta dasar, perlu dilakukan *Georeferencing* dengan cara menentukan 4 (empat) titik kontrol pada peta sumber gempa dan peta dasar sebagai referensi.

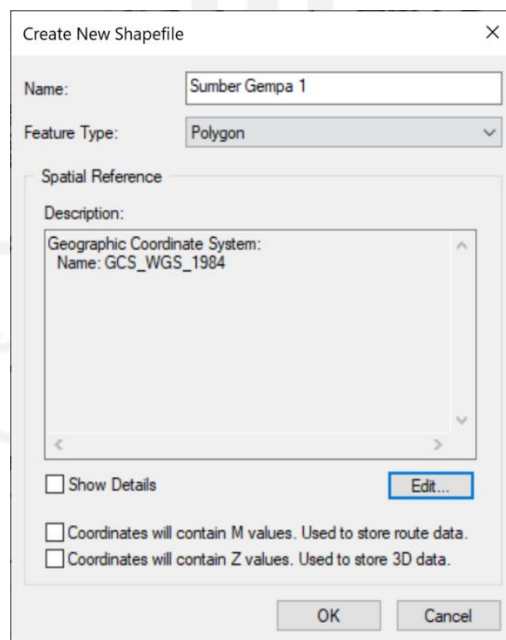
4. Membuat *shapefile* dengan cara digitasi zona sumber gempa pada peta sumber gempa menjadi vektor.

Klik *ArcCatalog* → klik kanan pada *folder* → *New* → *Shapefile*



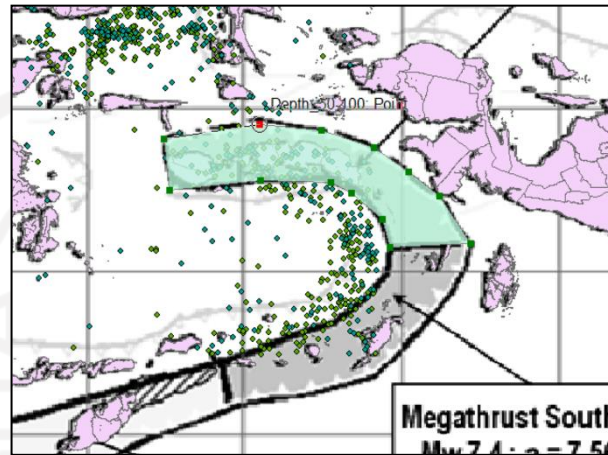
Gambar 5.15 Proses Digitasi Zona Sumber Gempa pada ArcMap

Pada jendela *Create New Shapefile*, beri nama *shapefile* yang baru dibuat, *Feature type Polygon* dan *geographic coordinate system WGS 1984*.



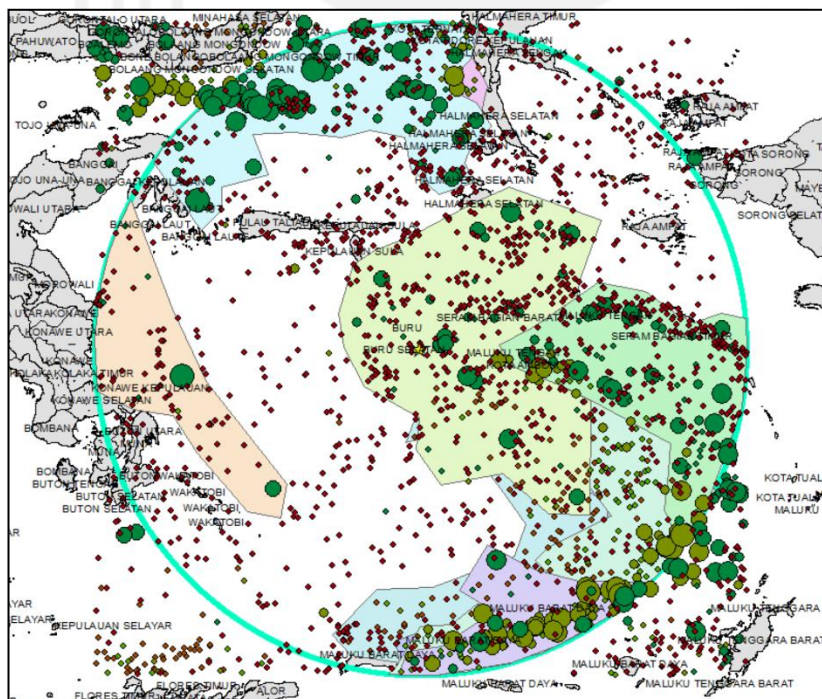
Gambar 5.16 Proses *Create New Shapefile* pada ArcMap

Kemudian melakukan digitasi zona sumber gempa dengan *polygon tools*. Klik *Create Features* kemudian pilih *polygon* pada *construction tools*, kemudian membuat vektor mengikuti zona gempa pada peta sumber gempa. *Shapefile* untuk zona sumber gempa ini akan digunakan sebagai *Source Geometry* pada aplikasi R-CRISIS.



Gambar 5.17 *Shapefile* yang Digunakan Sebagai *Source Geometry*

Zona sumber gempa yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada peta yang tampak pada Gambar 5.18.



Gambar 5.18 Peta Zona Sumber Gempa Bendungan Way - Apu

5.1.6 Penentuan Parameter Gempa pada Zona Sumber Gempa

Setelah memperoleh geometri dari zona sumber gempa berupa *shapefile*, langkah berikutnya adalah penentuan parameter gempa dari setiap zona gempa. Untuk menentukan parameter gempa, terlebih dahulu data rekam gempa dipilah dan dikelompokkan sesuai dengan sumber gempanya.

Dalam penelitian ini sumber gempa dibagi menjadi 3 (tiga):

1. Zona Subduksi
2. Zona *fault*
3. Zona *background*: *shallow background* dan *deep background*

Adapun zona subduksi, *fault* dan *shallow background* adalah untuk gempa yang mempunyai kedalaman kurang dari 50 km. Yang membedakan adalah zona gempa untuk subduksi dan *fault* diperoleh dari patahan dan zona *megathrust* yang sudah teridentifikasi berdasarkan peta sumber gempa PuSGeN, sedangkan *shallow background* merupakan gempa untuk wilayah yang patahan dan zona subduksinya belum teridentifikasi.

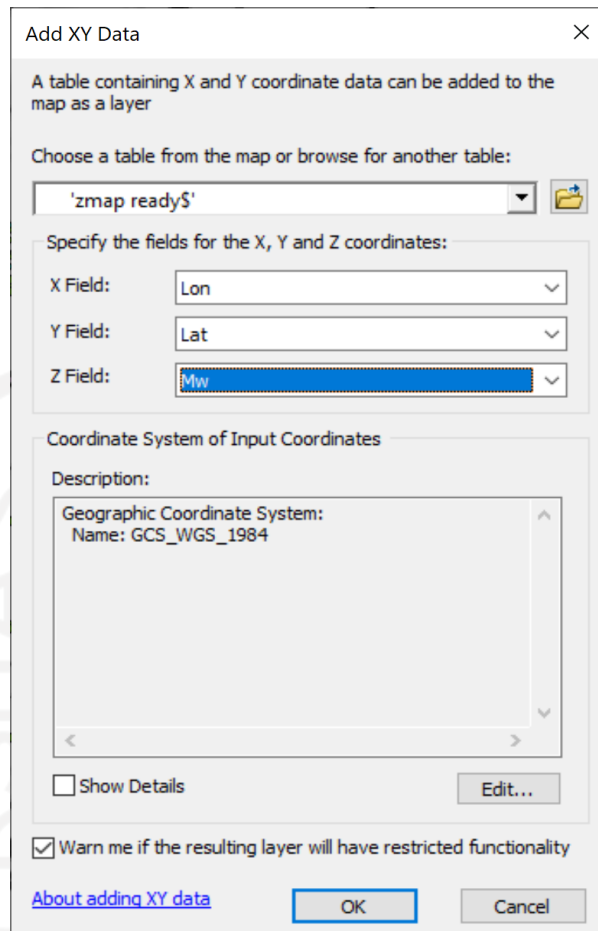
Zona *background* dibagi berdasarkan kedalamannya, dalam penelitian ini zona *background* dibagi menjadi *shallow background* untuk gempa dengan kedalaman kurang dari 50 km, *deep background* untuk kedalaman 50-100 km, *deep background* untuk kedalaman 100-150 km, *deep background* untuk kedalaman 150-200 km dan *deep background* untuk kedalaman 200-300 km.

Pemisahan data rekam gempa berdasarkan zona gempa ini dilakukan dengan bantuan aplikasi *ArcMap*. Langkah - langkah yang dilakukan untuk melakukan pemilahan data rekam gempa:

1. Memuat data rekam gempa gabungan yang telah dilakukan analisis kelengkapan.

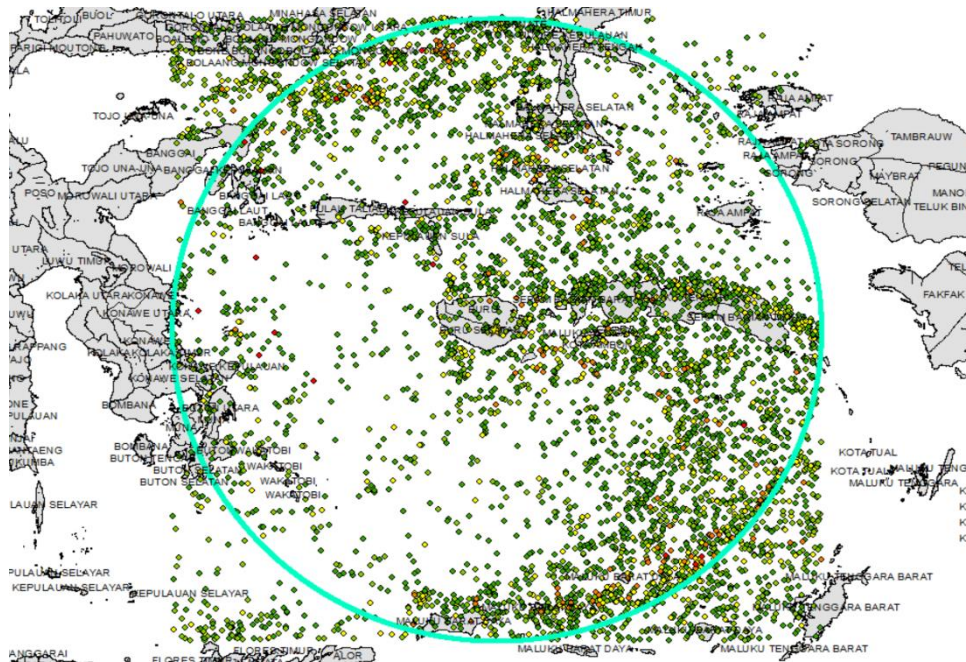
Klik *File* → *Add Data* → *Add XY Data*.

Pada jendela *Add XY Data* pilih *Lon* untuk *X Field*, *Lat* untuk *Y Field* dan *Mw* untuk *Z Field*.



Gambar 5.19 Proses *Add XY Data*

Setelah dimuat, data rekam gempa ini kemudian di-*export* menjadi *shapefile* untuk memudahkan dalam pengolahan datanya. Data rekam gempa yang berhasil di-*plot* pada Peta Regional Maluku ditunjukkan pada Gambar 5.20.



Gambar 5.20 Hasil *Plot Data* Rekam Gempa pada Peta Regional Maluku

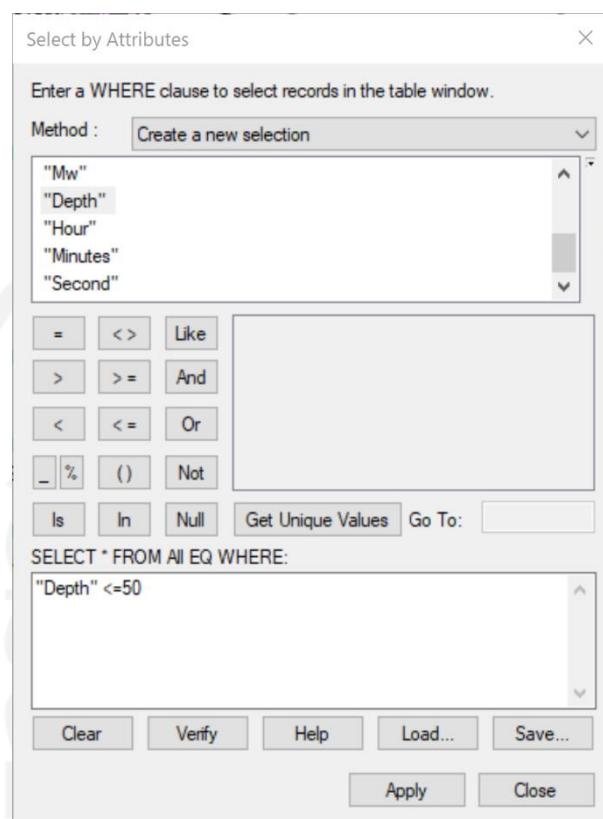
2. Melakukan seleksi data rekam gempa sesuai dengan kedalaman gempa:
 - a. Gempa dengan kedalaman kurang dari 50 km.
 - b. Gempa dengan kedalaman 50 sampai dengan 100 km.
 - c. Gempa dengan kedalaman 100 sampai dengan 150 km.
 - d. Gempa dengan kedalaman 150 sampai dengan 200 km.
 - e. Gempa dengan kedalaman 200 sampai dengan 300 km.

Klik kanan pada data rekam gempa → *Open Attribute Table*.

FID	Shape*	Lon	Lat	Year	Month	Day	Mw	Depth
0	Point ZM	130.82	-6.436	2001	3	8	5	48.5
1	Point ZM	128.747	0.503	2003	5	29	5	39.7
2	Point ZM	127.315	-0.44	2004	5	31	5	90.9
3	Point ZM	122.431	-5.384	2004	7	5	4.8	10
4	Point ZM	126.858	-0.332	2004	7	15	4.9	35.8
5	Point ZM	122.971	-0.117	2004	9	25	5	130.8
6	Point ZM	122.884	0.755	2004	11	9	4.8	67.2
7	Point ZM	126.712	0.129	2005	5	25	4.8	123.1
8	Point ZM	131.147	6.805	2005	6	1	4.0	45.8

Gambar 5.21 *Table Menu*

Setelah itu *klik* pada *Select by Attribute* dan menuliskan parameter yang digunakan untuk memilah data rekam gempa.



Gambar 5.22 *Select by Attribute*

3. Setelah seleksi data rekam gempa dilakukan berdasarkan kelompok rentang kedalamannya, seleksi data tersebut di-*export* menjadi *shapefile* baru untuk kemudian diolah dengan aplikasi *zMap* untuk memperoleh parameter gempa yang dibutuhkan dalam proses analisis PSHA dengan aplikasi *R-CRISIS*.
4. Setelah dilakukan *clipping* terhadap data gempa untuk setiap zona sumber gempa, kembali dilakukan pengolahan data menggunakan *zMap* untuk memperoleh parameter gempa untuk setiap zona sumber gempa. Adapun parameter yang diperlukan untuk analisis PSHA dengan aplikasi *R-CRISIS* adalah: *MMax*, *b-value*, *a-value*, *a-value annual*, *standar deviasi a-value*, jumlah data gempa, *Mmin*, dan *Mc*. Parameter ini akan menjadi *input* pada

R-CRISIS sebagai *Source Seismicity* bersama dengan *shapefile* yang dibuat menggunakan *ArcMap* sebagai *Source Geometry*.

Untuk wilayah Pulau Buru, sesuai dengan Peta Sumber Gempa 2017 PuSGeN dan melihat sebaran gempa, ada 14 area sumber gempa yang digunakan untuk analisa PSHA ini. Area sumber gempa ini kemudian dijadikan sebagai *area source* untuk analisa PSHA seperti pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10 Sumber Gempa di sekitar Pulau Buru yang digunakan dalam analisis PSHA

Sumber Gempa	M_{\max}	b-value	a-value	a-value annual	σ b-value	Jumlah gempa	M_{\min}	M_c
<i>Megathrust Philippine</i>	6,7	1,11	7,78	8,5	0,14	58	5,2	5,6
<i>Sorong active fault</i>	6,6	1,27	8,4	6,65	0,1	63	5,2	5,2
<i>Megathrust North Banda Sea</i>	6,8	1,46	10,3	8,5	0,08	321	5,2	5,5
<i>South Seram Thrust</i>	6,8	1,58	10,3	8,56	0,2	60	5,2	5,5
<i>Seram Interplate</i>	8,2	1,33	9,05	7,2	0,2	96	5,2	5,4
<i>Wetar back-arc</i>	7,0	0,819	5,9	4,09	0,1	36	5,2	5,4
<i>Deep background 1 (50-100)</i>	8,5	1,07	7,83	6,08	0,2	109	5,2	5,6
<i>Deep background 2 (50-100)</i>	6,4	1,03	6,81	5,1	0,2	17	5,4	5,4
<i>Deep background 3 (50-100)</i>	6,3	1,31	8,71	9,68	0,2	57	5,2	5,4
<i>Deep background 4 (50-100)</i>	6,5	1,03	6,95	5,19	0,1	41	5,2	5,2
<i>Deep background 5 (100-150)</i>	8,1	0,965	7,29	5,55	0,1	92	5,1	5,6
<i>Deep background 6 (100-150)</i>	6,4	1,53	9,51	7,75	0,5	21	5,2	5,5
<i>Deep background 7 (150-200)</i>	7,3	1,08	7,82	6,06	0,1	87	5,2	5,5
<i>Deep background 8 (200-300)</i>	7,0	1,42	9,52	7,77	0,1	109	5,2	5,3

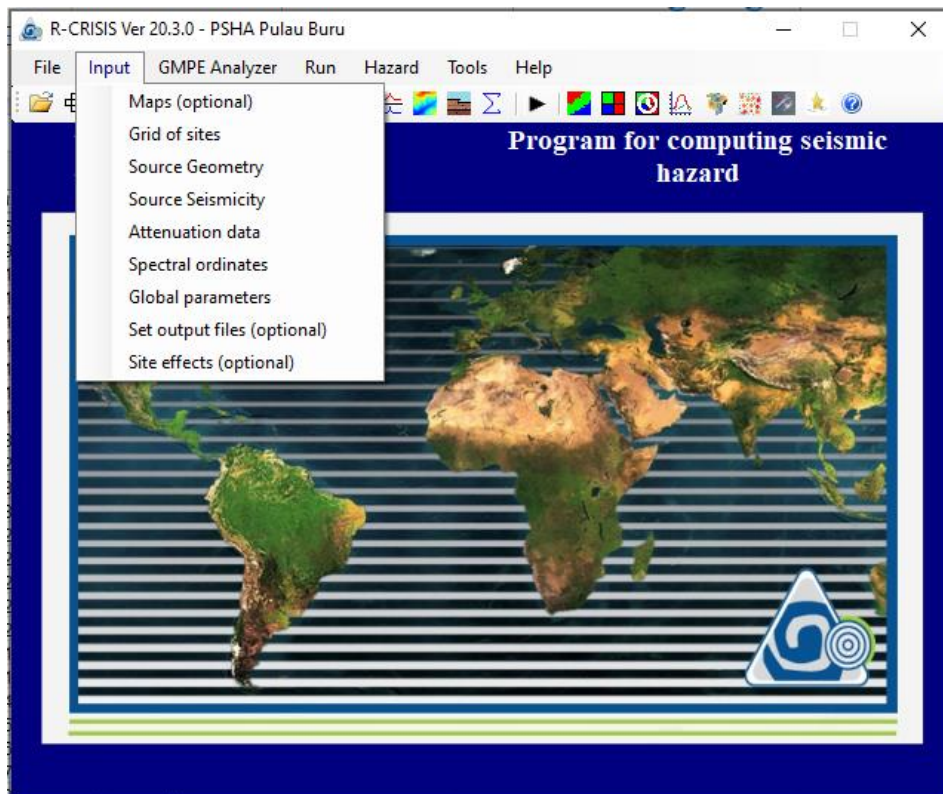
5.1.7 PSHA dengan R-CRISIS

R-CRISIS adalah aplikasi yang digunakan untuk menghitung tingkat

bahaya gempa dengan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. Program ini pertama kali dikenalkan oleh Profesor Mario Ordaz pada tahun 1991 (Ordaz, M., 1991). Untuk melakukan analisis PSHA menggunakan aplikasi R-*CRISIS* dibutuhkan *input* sebagai berikut:

1. *Maps*: bersifat opsional, adalah *input* untuk peta lokasi yang akan dihitung tingkat bahaya gempanya. *Input maps* berupa *shapefile* (.shp).
2. *Grid of sites*: adalah untuk menentukan batasan wilayah yang akan dilakukan perhitungan tingkat bahaya gempanya. Semakin rapat *grid* akan semakin akurat analisis PSHA dan juga semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan simulasi.
3. *Source Geometry*: untuk memuat zona sumber gempa. Data untuk input ini berupa *shapefile* yang telah dibuat menggunakan aplikasi *ArcMap*.
4. *Source Seismicity*: untuk mendefinisikan parameter gempa setiap zona gempa.
5. *Attenuation data*: untuk mendefinisikan Persamaan atenuasi yang digunakan dalam analisis PSHA ini. Secara umum atenuasi data menggambarkan hubungan probabilistik antara magnitudo, jarak sumber gempa ke *site*, dan intensitas gempa.
6. *Spectral ordinates*: untuk mendefinisikan *spectral acceleration ordinate*. Dalam penelitian ini digunakan 3 (tiga) *spectral ordinate*, yaitu: 0s, 0.2s dan 1s.
7. *Global parameter*: untuk mendefinisikan *time frame*, *maximum integration distance*, *minimum triangle size* dan *minimum distance*.
8. *Set output files*: untuk menentukan letak *folder* dari *file* hasil analisis.
9. *Site effects*: untuk mendefinisikan pengaruh lokal dari lokasi, baik amplifikasi maupun deamplifikasi pada analisis PSHA yang tergantung pada lokasi *site*, periode struktur dan *ground motion level*.

Tampilan menu utama pada *software* R-*CRISIS* dapat dilihat pada Gambar 5.23 berikut ini.



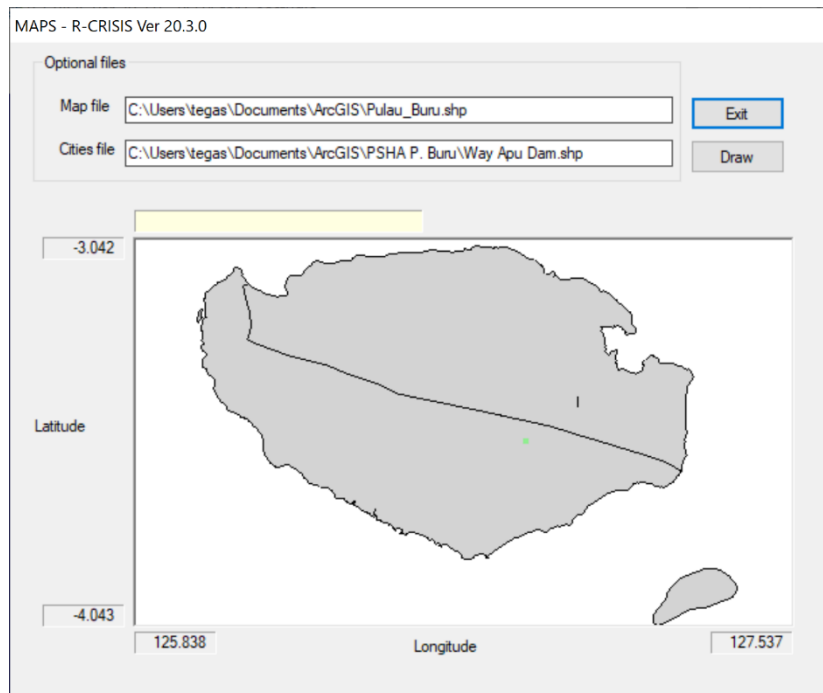
Gambar 5.23 Tampilan Menu Utama pada *Software R-CRISIS*

Langkah - langkah analisis PSHA dengan aplikasi *R-CRISIS* adalah sebagai berikut:

1. *Input Maps.*

Klik *Input*→*Maps (optional)*→pada jendela *Maps* pilih *shapefile (.shp)* Pulau Buru→*Draw*→*Exit*.

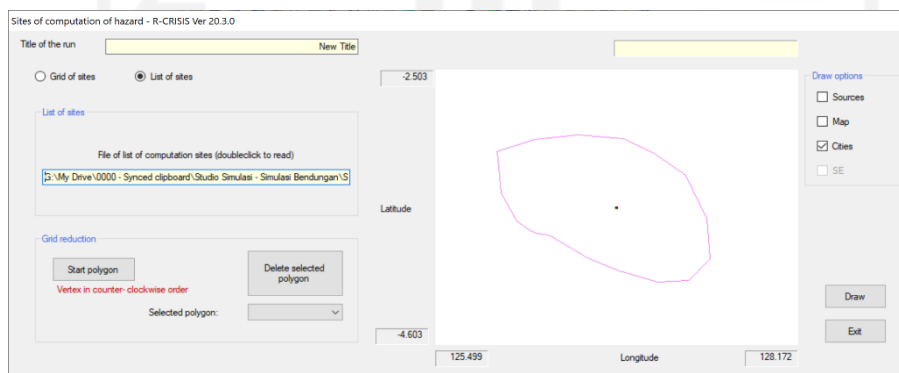
Hasil keluaran dari proses input maps dapat dilihat pada Gambar 5.24 di bawah ini.



Gambar 5.24 Hasil *Input Maps* pada Pulau Buru.

2. *Grid of Sites.*

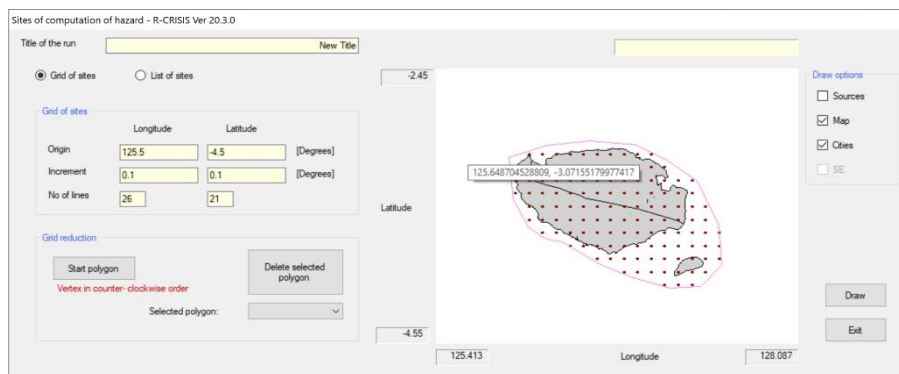
Klik *Input* → *Grid of sites* → pada jendela *Sites of computational hazard* pilih “*List of sites*” dan muat *shapefile* (.shp) lokasi Bendungan Way – Apu → *Draw* → *Exit*.



Gambar 5.25 *Sites of Computation of Hazard*

Input dengan pilihan “*List of sites*” hanya melakukan perhitungan pada lokasi *sites* yang ada pada *input*, dalam penelitian ini hanya pada titik

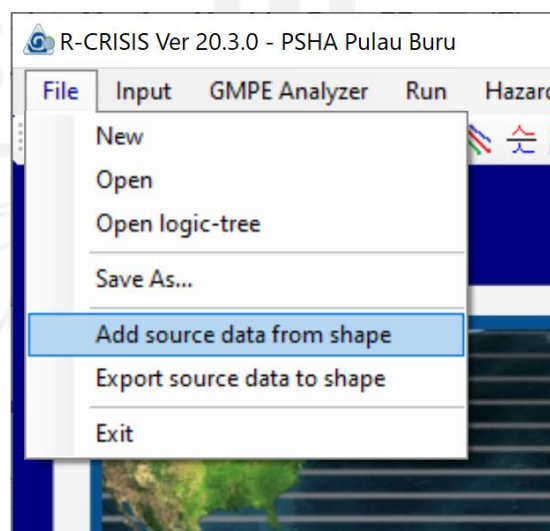
lokasi bendungan Way - Apu. Untuk membuat peta tingkat bahaya gempa untuk wilayah sekitar Bendungan Way - Apu dapat digunakan *input* “*Grid of sites*” seperti Gambar 5.26 di bawah ini. Semakin rapat *grid* berarti perhitungan semakin akurat namun proses simulasi akan berjalan lebih lama.



Gambar 5.26 Peta Tingkat Bahaya Gempa di Sekitar Bendungan

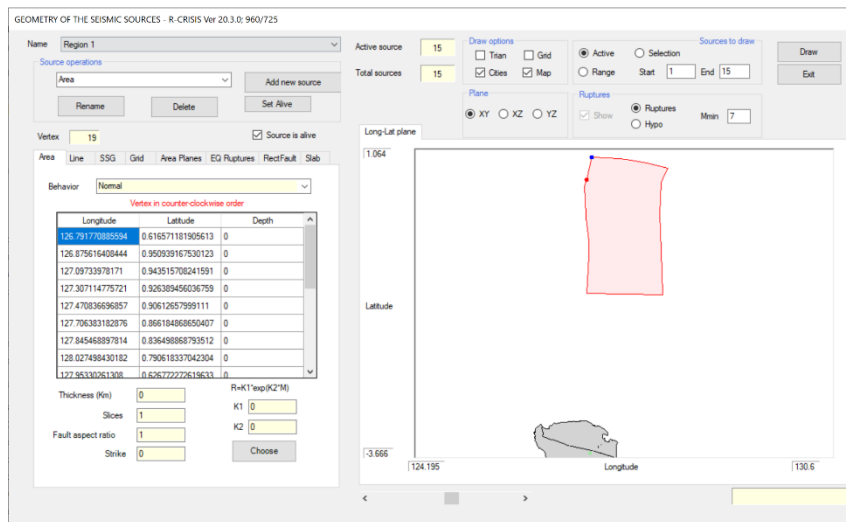
3. *Source Geometry.*

Klik *File* → *Add source data from shape* → pilih *shapefile* (.shp) *source geometry* yang telah dibuat dengan aplikasi *ArcMap*.



Gambar 5.27 Proses *Add Sources Data From Shape*

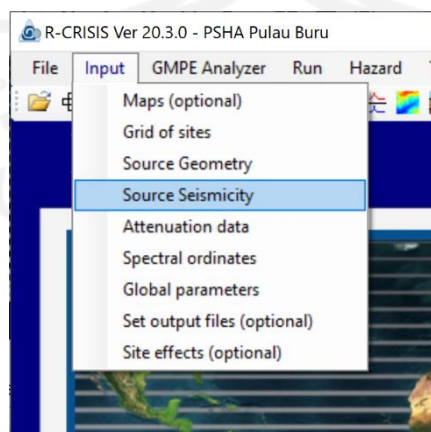
Setelah *shapefile* termuat, klik *Input* → *Source geometry* → pada jendela “*Geometry of the Seismic Source*” masukkan parameter yang sesuai dengan sumber gempa seperti kedalaman seperti terlihat pada Gambar 5.28. Proses ini kemudian diulangi untuk setiap zona sumber gempa yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 5.28 Proses *Geometry of the Seismic Source*

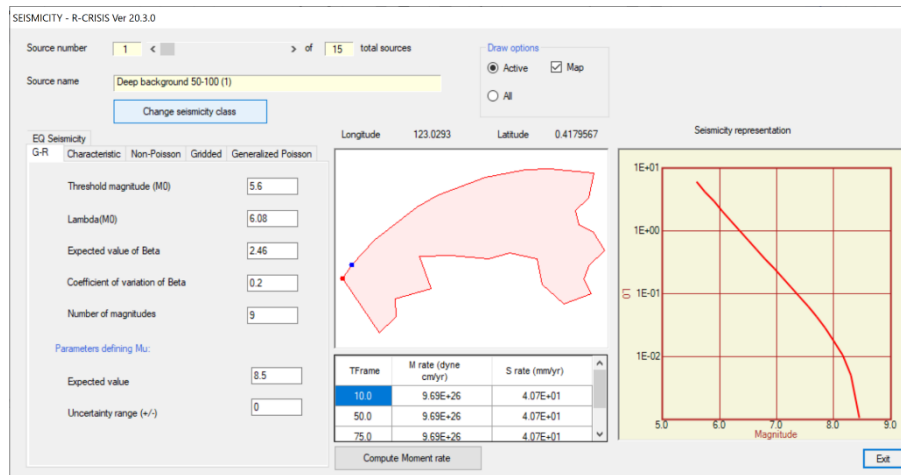
4. *Sources Seismicity*.

Klik *Input* → *Source seismicity* → pada jendela “*Seismicity*” masukkan parameter untuk setiap zona sumber gempa seperti tampak pada Gambar 5.29.



Gambar 5.29 Menu *Input Source Seismicity*

Jendela “*Seismicity*” untuk melakukan *input* parameter gempa masing - masing zona sumber gempa seperti terlihat pada Gambar 5.30. Parameter zona sumber gempa yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari data rekam gempa yang telah dilakukan proses *clipping* sesuai zonanya dan diolah dengan aplikasi *ZMap* untuk mendapatkan parameter gempanya. Parameter yang digunakan adalah sesuai dengan Tabel 5.11.



Gambar 5.30 Menu Input Sources Seismicity

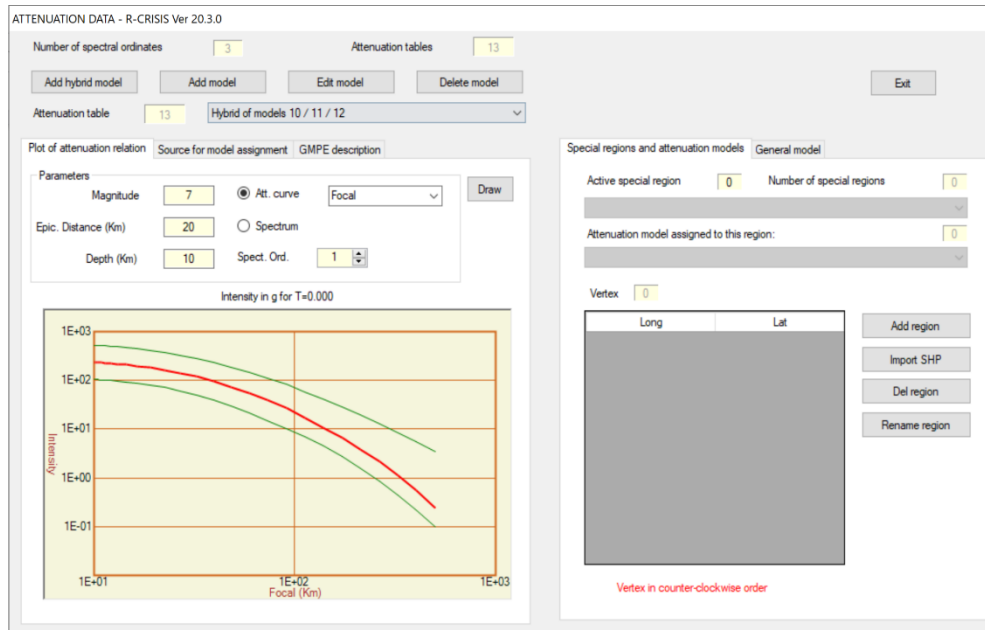
Tabel 5.11 Parameter Gempa pada PSHA

No	Source name	Thresho ld magnitu de (M0)	Lambda (M0)	Expecte d value of Beta	Coefficie nt variation of Beta	Number of magnitu dos	Expecte d value	Uncertai nty range
1	Deep background 50-100 (1)	5.6	6.08	2.46	0.2	9	8.5	0
2	Deep background 50-100 (2)	5.4	5.1	2.37	0.2	9	6.4	0
3	Deep background 50-100 (3)	5.4	6.95	3.02	0.2	9	6.3	0
4	Deep background 50-100 (4)	5.2	5.19	2.37	0.1	9	6.5	0
5	Deep background 100-150 (1)	5.6	5.55	2.22	0.1	9	8.1	0

No	Source name	Threshold magnitude (M0)	Lambda (M0)	Expected value of Beta	Coefficient variation of Beta	Number of magnitudes	Expected value	Uncertainty range
6	Deep background 100-150 (2)	5.5	7.75	3.52	0.5	9	6.4	0
7	Deep background 150-200	5.5	6.06	2.49	0.1	9	7.3	0
8	Deep background 200-300	5.3	7.77	3.27	0.1	9	7	0
9	Wetar back-arc	5.4	4.09	1.89	0.1	9	7	0
10	Seram interplate	5.4	7.2	3.06	0.2	9	8.2	0
11	South Seram thrust	5.5	8.56	3.64	0.2	9	6.8	0
12	Megathrust North Banda Sea	5.5	8.5	3.36	0.08	9	6.8	0
13	Sorong active fault	5.2	6.65	2.92	0.1	9	6.6	0
14	Megathrust Philippine	5.6	5.989	2.56	0.14	9	6.7	0

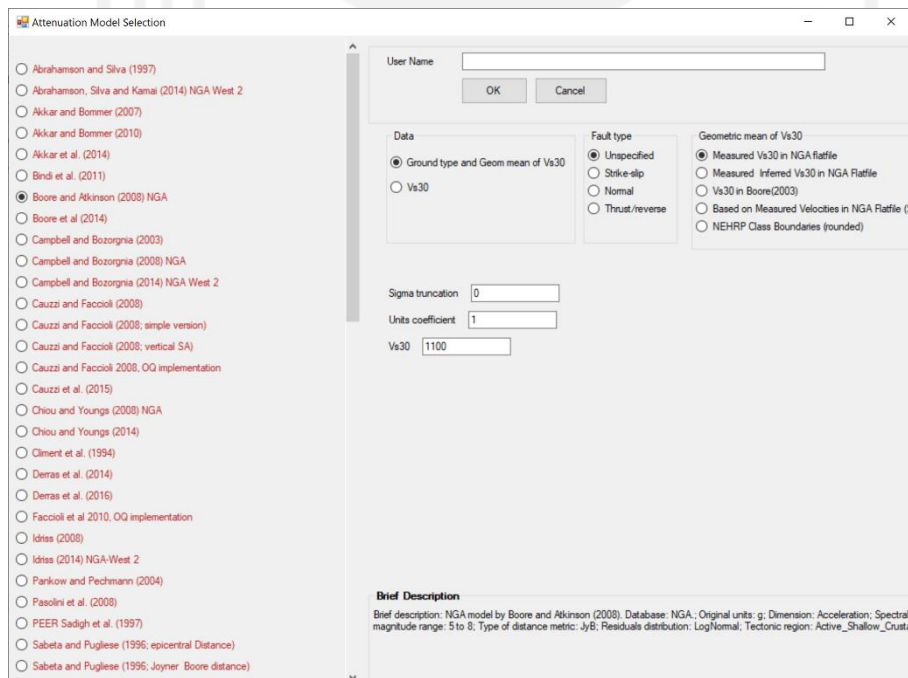
5. Input attenuation data.

Klik *Input* → *Attenuation data* → pada jendela “*Attenuation Data*” klik *Add model* untuk memilih Persamaan atenuasi yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 5.31.



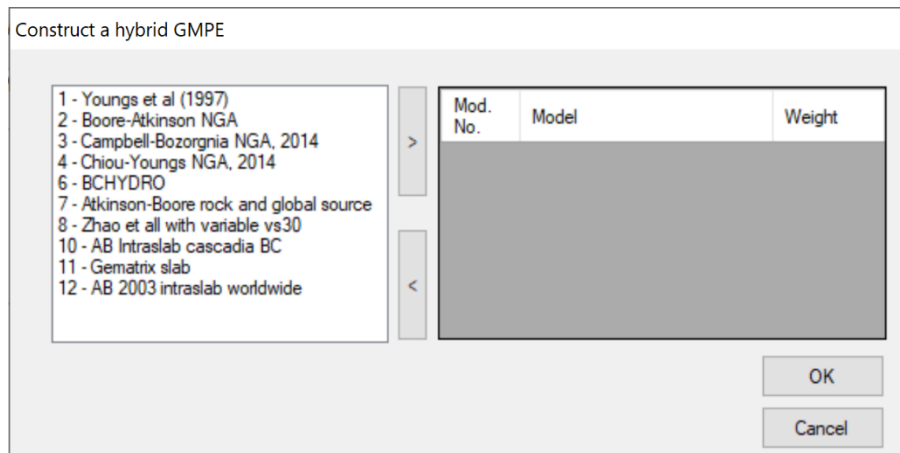
Gambar 5.31 Attenuation Data

Klik *Add model* untuk menampilkan jendela “Attenuation Model Selection” dan pilih jenis model atenuasi yang digunakan seperti terlihat pada Gambar 5.32.



Gambar 5.32 Attenuation Model Selection

Setelah masing-masing model atenuasi dimuat, klik “*Add hybrid model*” untuk membuat model *hybrid* dari beberapa Persamaan atenuasi seperti tampak pada Gambar 5.33.



Gambar 5.33 *Construct a Hybrid GMPE*

Model atenuasi yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Peta Sumber Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017) adalah sebagai berikut:

1. Sumber gempa *shallow crustal*, untuk gempa *fault* dan *shallow background*:
 - a. Boore-Atkinson NGA
 - b. Campbell-Bozorgnia NGA, 2014
 - c. Chiou-Youngs NGA, 2014
2. Sumber gempa subduksi *interface*, untuk gempa subduksi:
 - a. BCHYDRO (Abrahamson dkk, 2012)
 - b. Atkinson-Boore BC rock and global source subduction (Atkinson & Boore, 2003)
 - c. Zhao et al, with variable Vs30, 2006
3. Sumber gempa Benioff (*deep intraslab*), untuk gempa *deep background*:
 - a. *AB intraslab seismicity Cascadia region BC-rock condition*, 2003
 - b. *Geomatrix slab seismicity rock*, 1997

- c. AB 2003 *intraslab seismicity worldwide data region BC-rock condition*, 2003

Model atenuasi yang digunakan untuk masing - masing zona sumber gempa seperti terlihat pada Tabel 5.12.

Tabel 5.12 Parameter Gempa pada PSHA

Sumber Gempa	Source Model	Attenuation Model
<i>Megathrust Philippine</i>	<i>Subduction Megathrust</i>	<i>Hybrid b(1) / b(2) / b(3)</i>
<i>Sorong active fault</i>	<i>Fault</i>	<i>Hybrid a(1) / a(2) / a(3)</i>
<i>Megathrust North Banda Sea</i>	<i>Subduction Megathrust</i>	<i>Hybrid b(1) / b(2) / b(3)</i>
<i>South Seram Thrust</i>	<i>Subduction</i>	<i>Hybrid b(1) / b(2) / b(3)</i>
<i>Seram Interplate</i>	<i>Fault</i>	<i>Hybrid a(1) / a(2) / a(3)</i>
<i>Wetar back-arc</i>	<i>Fault</i>	<i>Hybrid a(1) / a(2) / a(3)</i>
<i>Deep background 1 (50-100)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 2 (50-100)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 3 (50-100)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 4 (50-100)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 5 (100-150)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 6 (100-150)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 7 (150-200)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>
<i>Deep background 8 (200-300)</i>	<i>Deep background</i>	<i>Hybrid c(1) / c(2) / c(3)</i>

6. *Input Spectral Ordinate.*

Klik *Input* → *Spectral ordinates* → pada penelitian ini digunakan 3 (tiga) *spectral ordinate* yaitu: 0 detik untuk perhitungan PGA, 0,2 detik dan 1 detik untuk perhitungan *spectral acceleration* seperti tampak pada Gambar 5.34.

INTENSITIES FOR EACH SPECTRAL ORDINATE - R-CRISIS Ver 20.3.0

Spectral ordinates

Total number of spectral ordinates: 3

Actual spectral ordinate: 1

Structural period of actual spectral ordinate: 0

Lower limit of intensity level: 1

Upper limit of intensity level: 2500

Spacing

Log Linear PEER Large PEER

General values

Units: g

Number of levels of intensity for which seismic hazard will be computed: 10

Exit

Gambar 5.34 *Intensity for Each Spectral Ordinate*

7. *Input Global Parameter.*

Klik *Input* → *Global parameter* → pada jendela “*Global parameter*” masukkan *Time frame* yang akan digunakan dalam perhitungan PSHA ini seperti terlihat pada Gambar 5.35.

GLOBAL PARAMETERS - R-CRISIS Ver 20.3.0

Integration parameters

Maximum integration distance: km

Minimum triangle size: km

Minimum Distance/Triangle Size ratio:

CAV filter

Filter type:

Time frame	Map return period (years)	PE in 10 years	PE in 50 years	PE in 75 years	PE in 100 years
10	100	9.52E-02	3.93E-01	5.28E-01	6.32E-01
50	250	3.92E-02	1.81E-01	2.59E-01	3.30E-01
75	500	1.98E-02	9.52E-02	1.39E-01	1.81E-01
100	1000	9.95E-03	4.88E-02	7.23E-02	9.52E-02
	2500	3.99E-03	1.98E-02	2.96E-02	3.92E-02

Exit

Gambar 5.35 *Input Global Parameter*

Menentukan Periode Ulang / *Return Period* (T) gempa:

$$R_N = 1 - (1 - R_a)^N$$

Dimana:

R_N = *Probability of Exceedance* / Resiko gempa dalam %

R_a = *Annual rate* 1/T

N = Masa guna bangunan

T = *Return Period* / Periode ulang

Hasil perhitungan *return period* atau periode ulang/ (T) ditampilkan pada Tabel 5.13.

Tabel 5.13 Parameter Gempa pada PSHA

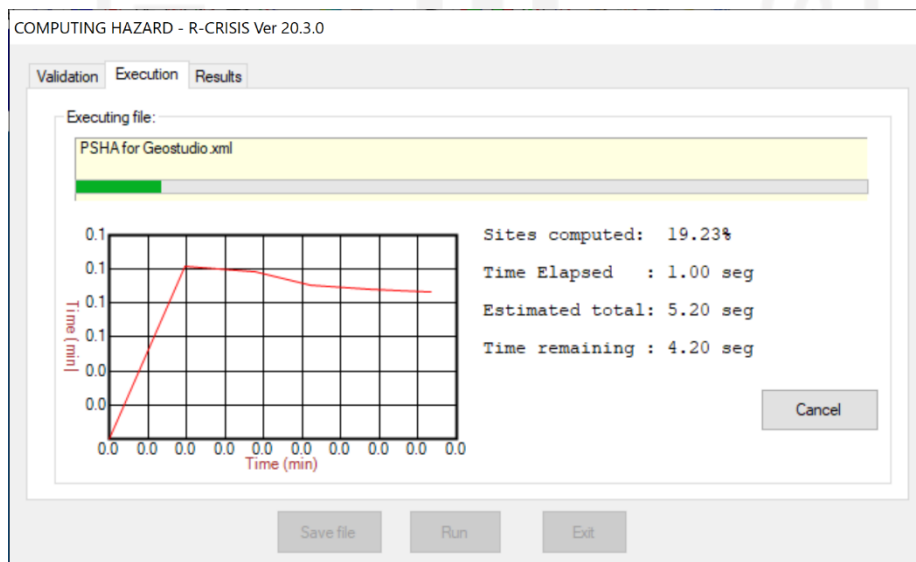
Periode ulang (tahun)	R_N / Resiko gempa (%)	N / Masa guna bangunan (tahun)	T / <i>Return period</i>	R_a / <i>Annual rate</i>
50	20%	10	45	0.022067

Periode ulang (tahun)	R _N / Resiko gempa (%)	N / Masa guna bangunan (tahun)	T / Return period	R _a / Annual rate
100	10%	10	95	0.010481
200	5%	10	195	0.005116
500	10%	50	475	0.002105
1000	7%	75	1033	0.000967
2500	2%	50	2475	0.000404
5000	2%	100	4950	0.000202
10000	1%	100	9950	0.0001

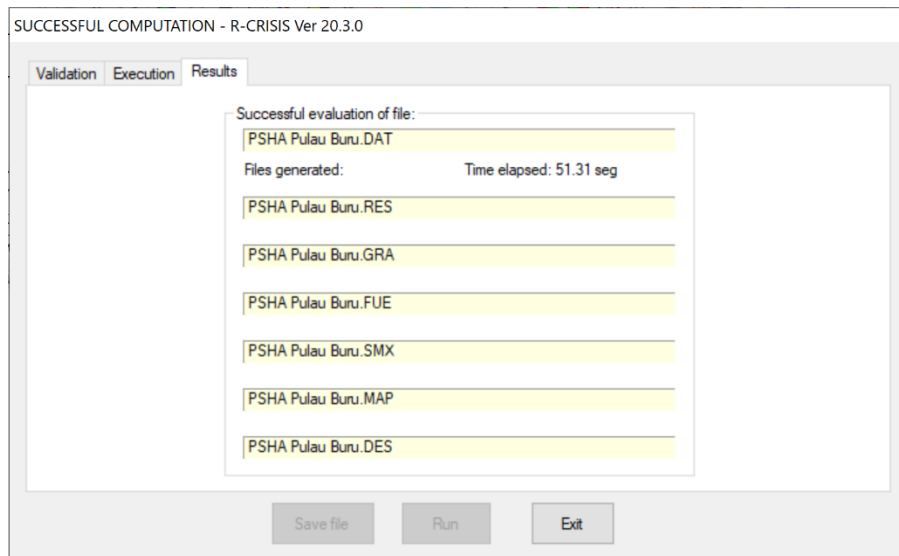
8. *Set Output files*: input ini untuk menentukan letak *folder* untuk menyimpan hasil analisis.

9. Menjalankan simulasi:

Klik *Run* → *Validate and run* → Proses simulasi akan berjalan seperti tampak pada Gambar 5.36. Selanjutnya apabila sudah selesai, jendela “*Computing Hazard*” akan menampilkan informasi *file* yang dihasilkan seperti tampak pada Gambar 5.37.

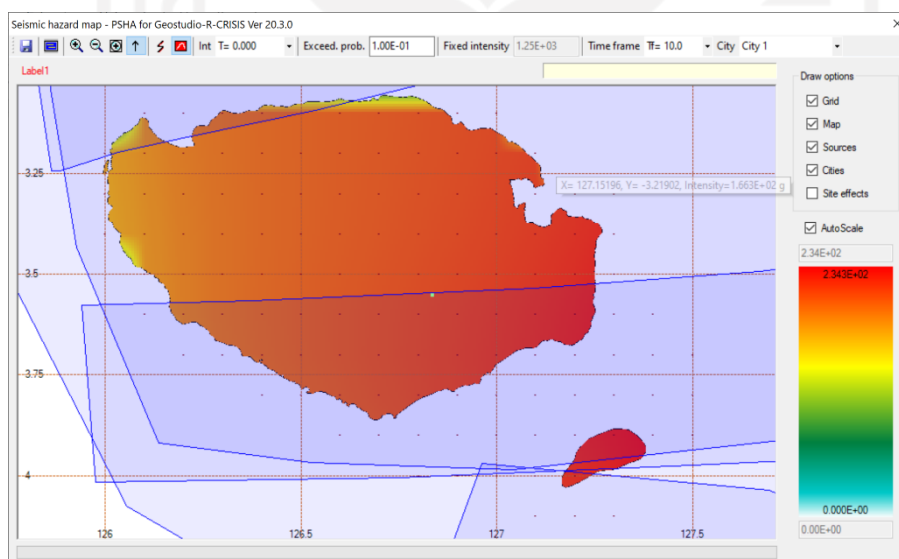


Gambar 5.36 Proses *Running* Simulasi PSHA dengan *R-CRISIS*



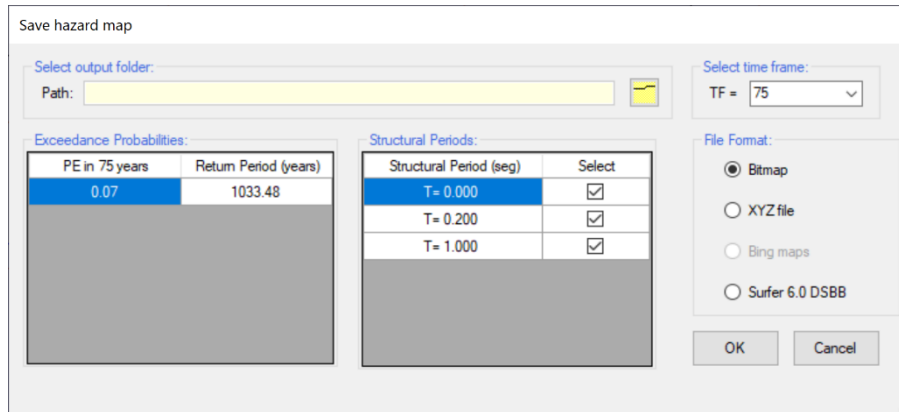
Gambar 5.37 Informasi Keluaran dari Simulasi PSHA dengan *R-CRISIS*

10. Hasil simulasi dapat dilihat dari *hazard map* yang di-generate secara otomatis oleh aplikasi *R-CRISIS* dengan cara klik *Hazard* → *See hazard map*.



Gambar 5.38 *Hazard Map* Hasil Simulasi PSHA dengan *R-CRISIS*

11. Untuk memperoleh hasil perhitungan PSHA pada lokasi bendungan dapat melakukan *export* data untuk masing - masing *time frame* dan *Exceedance probabilistic* seperti tampak pada Gambar 3.39 dan Tabel 5.14.



Gambar 5.39 File Hasil Simulasi PSHA dengan R-CRISIS

Tabel 5.14 Hasil Perhitungan PSHA untuk Titik Lokasi pada Bendungan Way - Apu

<i>Return period</i>	PE	TF	PGA (0s)	SA 0,2s	SA 1s
50	0,2	10	0,153	0,353	0,099
100	0,1	10	0,206	0,475	0,129
200	0,05	10	0,258	0,581	0,166
500	0,1	50	0,335	0,733	0,216
1000	0,07	75	0,437	0,924	0,263
2500	0,02	50	0,545	1,173	0,333
5000	0,02	100	0,645	1,368	0,401
10000	0,01	100	0,767	1,6	0,476

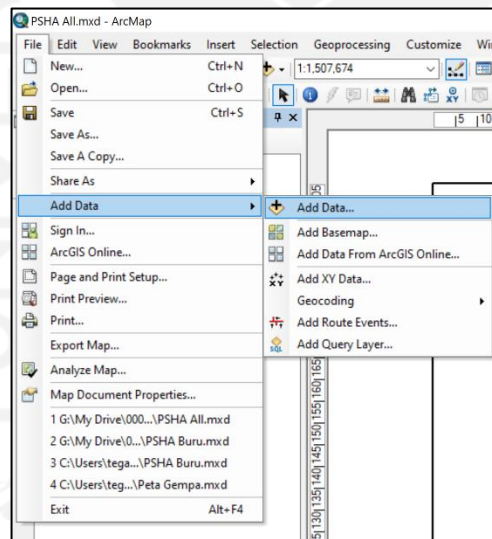
5.1.8 Peta *Peak Ground Acceleration* dan *Spectral Response Acceleration*

Peta PGA dan *Spectral Response Acceleration* adalah peta yang memuat informasi tingkat bahaya gempa pada wilayah yang ditentukan, dalam hal ini adalah Pulau Buru. Untuk membuat peta bahaya gempa Pulau Buru, data yang diperlukan adalah *hazard map* yang diperoleh dari hasil perhitungan PSHA untuk Pulau Buru dengan aplikasi R-CRISIS. Data perhitungan PSHA ini kemudian diolah dengan menggunakan aplikasi *ArcMap* untuk di-plot ke dalam peta Pulau Buru dan menambahkan informasi *contour* dari nilai PGA dan *Spectral response acceleration*.

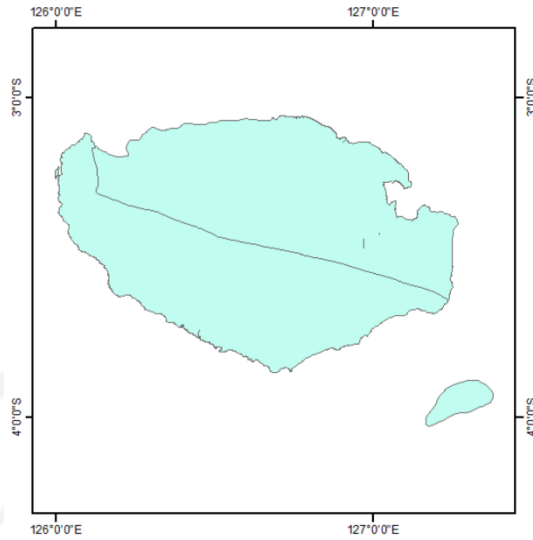
Berikut ini adalah langkah-langkah pembuatan peta sumber dan bahaya gempa:

1. Memuat *shapefile* Pulau Buru sebagai peta dasar.

Klik *File* → *Add Data* → pilih *shapefile* Pulau Buru seperti pada Gambar 5.40 dan hasilnya tampak pada Gambar 5.41.



Gambar 5.40 Memuat *Shapefile* Pulau Buru



Gambar 5.41 Tampilan *Output Shapefile* Pulau Buru

2. Memuat data PGA dan *Spectral Acceleration* hasil simulasi dengan *software R-CRISIS*

Klik *File* → *Add Data* → *Add XY Data* → pilih *file* data hasil PSHA seperti tampak pada Gambar 5.42.

Add XY Data

A table containing X and Y coordinate data can be added to the map as a layer

Choose a table from the map or browse for another table:

'100#pga\$'

Specify the fields for the X, Y and Z coordinates:

X Field: Lon

Y Field: Lat

Z Field: Intensity (g)

Coordinate System of Input Coordinates

Description:

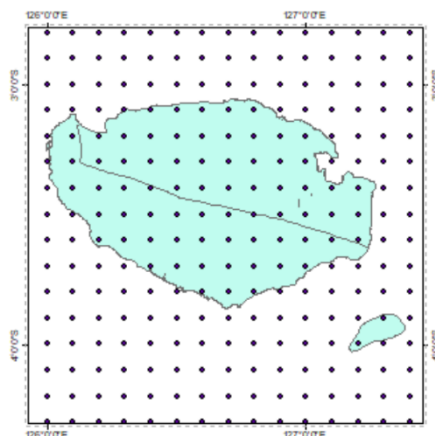
Geographic Coordinate System:
Name: GCS_WGS_1984

Show Details

Warn me if the resulting layer will have restricted functionality

[About adding XY data](#)

Gambar 5.42 Proses Memuat Data PGA dan *Spectral Acceleration*

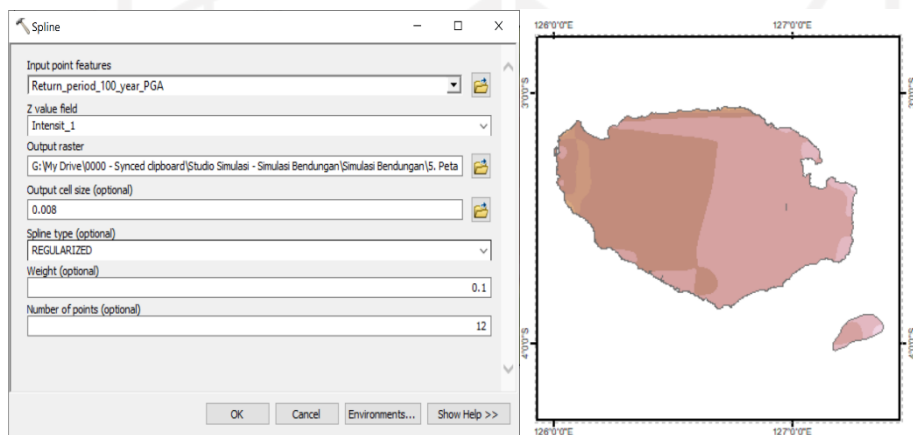


Gambar 5.43 Keluaran Data PGA dan *Spectral Acceleration*

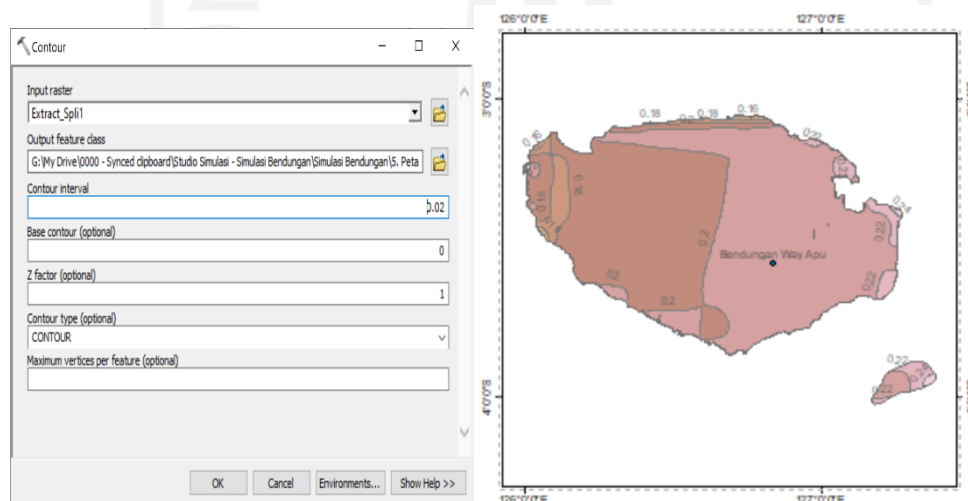
Pada jendela *Add XY Data* masukkan *Lon* sebagai *X Field*, *Lat* sebagai *Y Field* dan *Intensity* sebagai *Z Field*, serta WGS 1984 sebagai *Geographic Coordinate System*. Data ini akan termuat sebagai *grid* titik - titik perhitungan PSHA dengan aplikasi R-CRISIS seperti ditunjukkan pada Gambar 5.43.

3. Interpolasi data PSHA dan membuat kontur.

Untuk melakukan interpolasi digunakan *Tool Spline Interpolation* seperti ditunjukkan pada Gambar 5.44 kiri. Hasil interpolasi kemudian diubah intervalnya menjadi 0,02 dan dilakukan *clipping* dengan Peta Pulau Buru sebagai *mask* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.44 kanan.



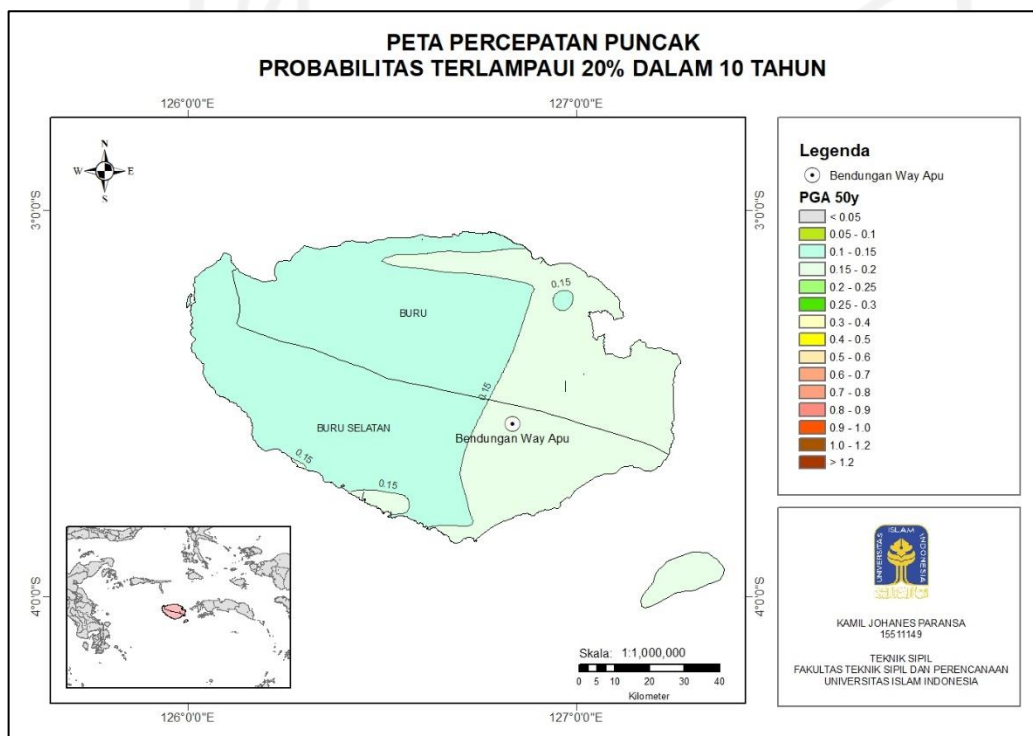
Gambar 5.44 Interpolasi data PSHA (kiri: *Spline tool*, kanan: *mask* Pulau Buru)



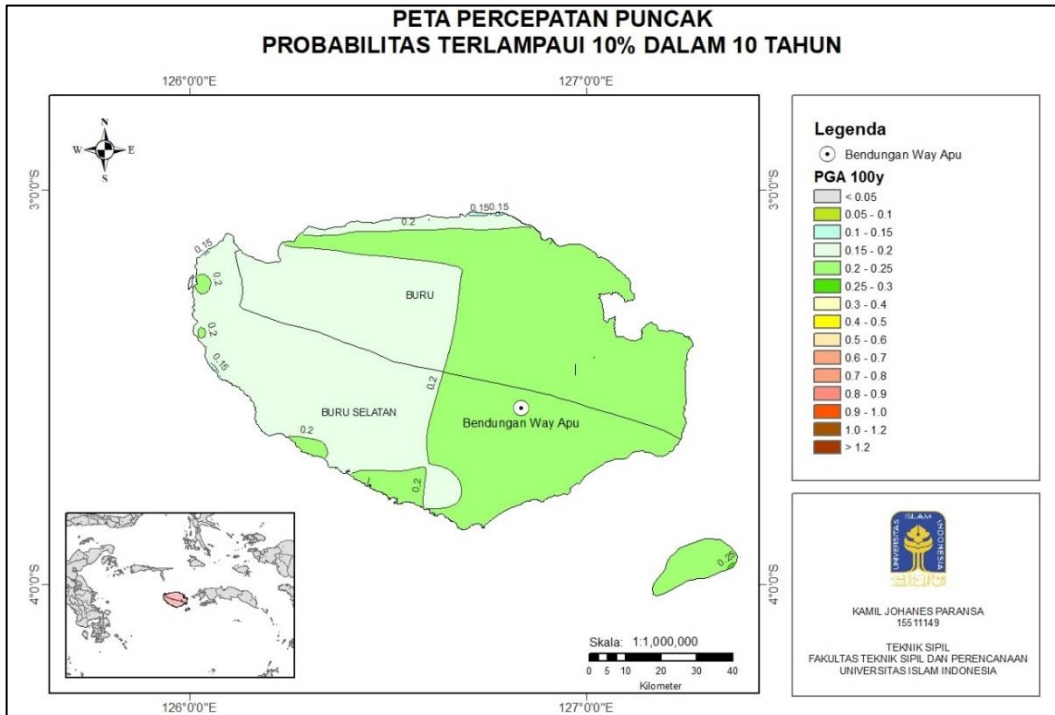
Gambar 5.45 Interpolasi data PSHA (kiri: *Contour tool*, kanan: *mask* Pulau Buru)

Untuk menambahkan garis kontur dan label digunakan *tools Surface* → *Contour* dengan hasil interpolasi sebagai *input raster* dan *interval 0,02* seperti tampak pada Gambar 5.45 kiri. Hasil Peta PGA setelah ditambahkan garis kontur dapat dilihat pada Gambar 5.45 kanan.

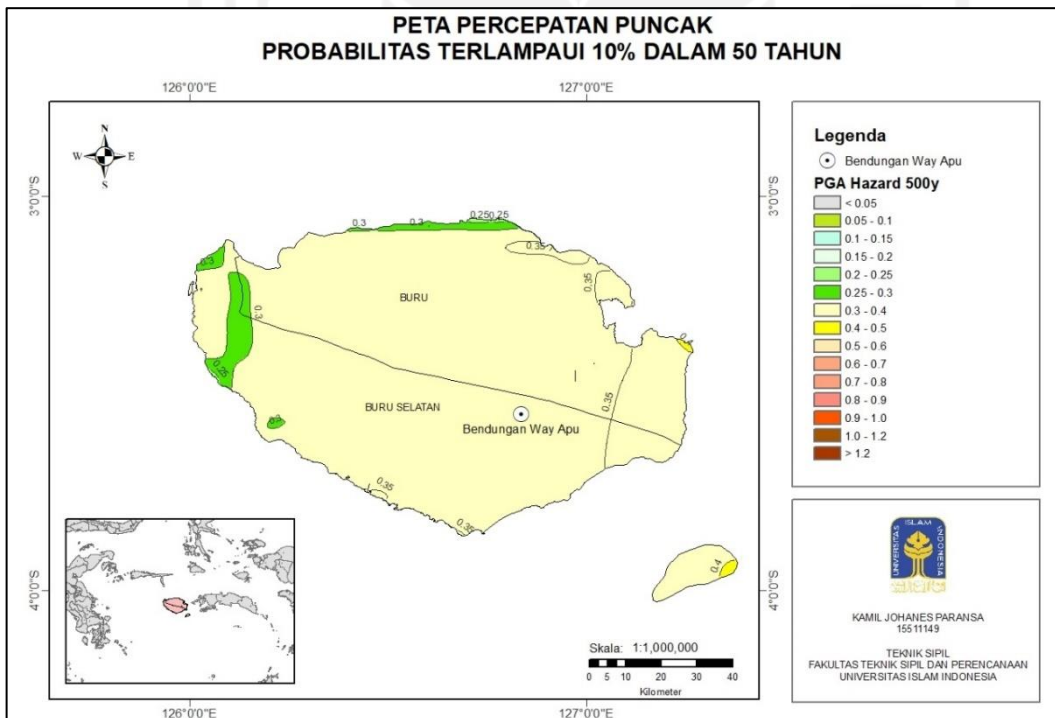
Hasil peta PGA terkait parameter seismik pada Pulau Buru dimana Bendungan Way - Apu berada ditunjukkan oleh Gambar 5.46 – Gambar 5.52.



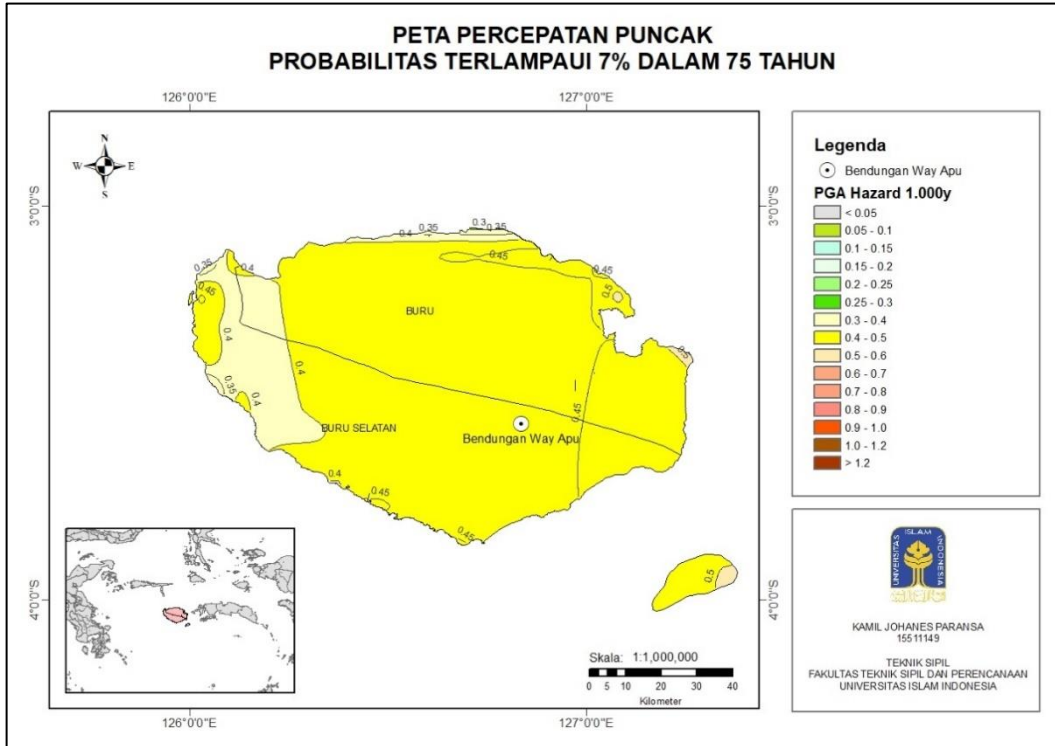
Gambar 5.46 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 20% dalam 10 Tahun



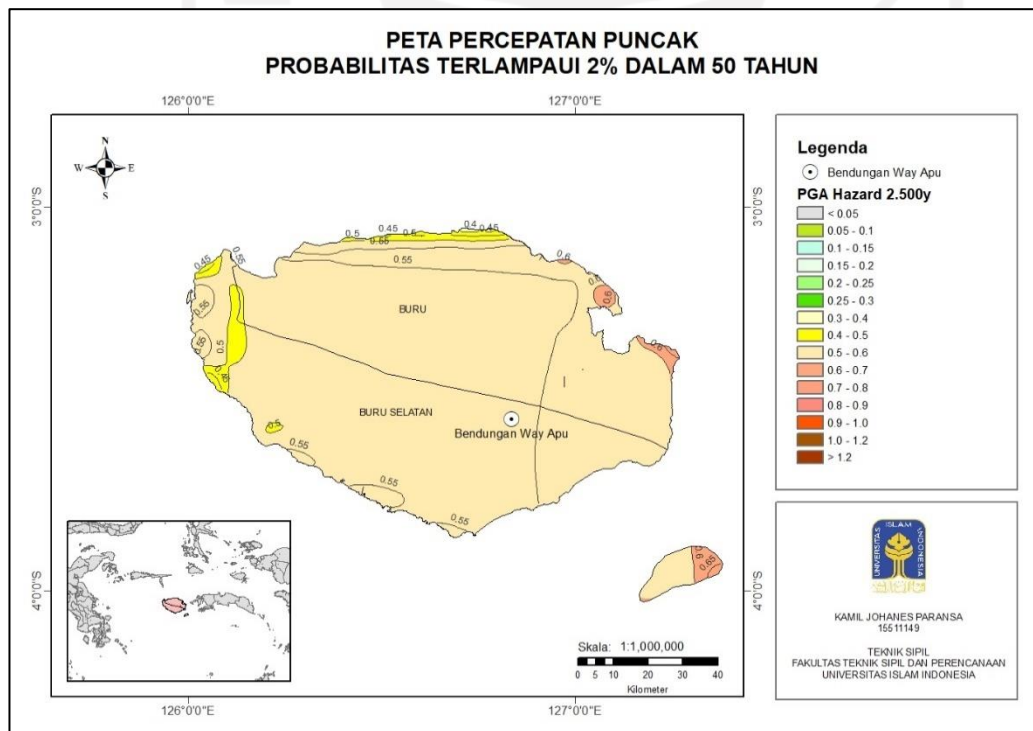
Gambar 5.47 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 10% dalam 10 Tahun



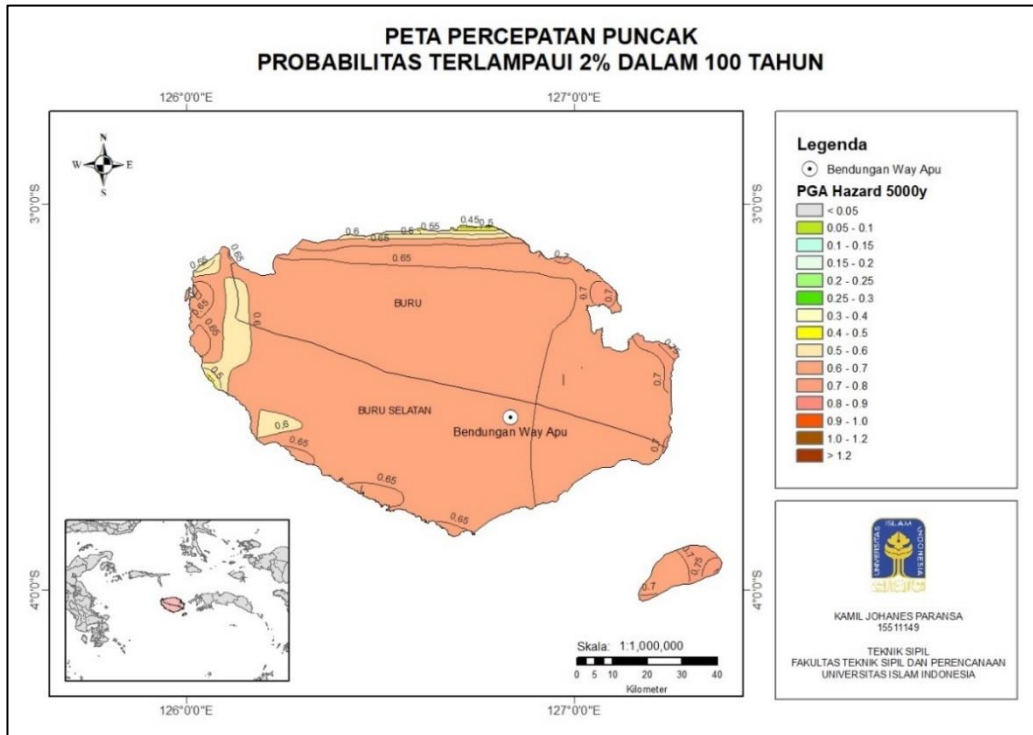
Gambar 5.48 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 10% dalam 50 Tahun



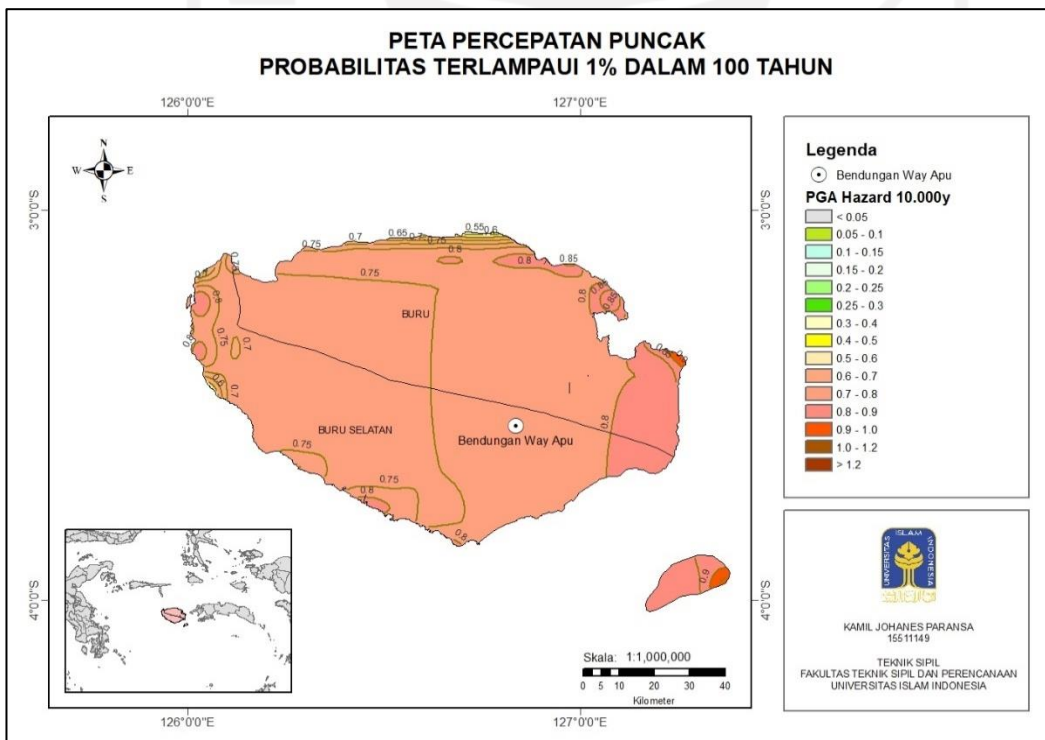
Gambar 5.49 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun



Gambar 5.50 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun



Gambar 5.51 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 2% dalam 100 Tahun



Gambar 5.52 Peta Percepatan Puncak Probabilitas Terlampaui 1% dalam 100 Tahun

5.2 Analisis Stabilitas Bendungan

Software R-CRISIS digunakan untuk melakukan analisis probabilitas bahaya gempa. R-CRISIS adalah versi terbaru dari CRISIS, merupakan solusi yang mendunia dan terkenal untuk melakukan analisis bahaya seismik probabilistik (PSHA). Program ini adalah hasil dari lebih dari 30 tahun inovasi, pengembangan dan peningkatan berkelanjutan, menyediakan perangkat lunak yang paling komprehensif, namun mudah digunakan, cocok untuk penggunaan akademik dan komersial.

Analisis stabilitas bendungan dibagi menjadi 2 (dua) bagian, yaitu analisis statis dan analisis dinamik. Pada analisis statis, kondisi bendungan, baik tanah maupun aliran air dalam kondisi ajeg dan mengabaikan perubahan yang terjadi terhadap perubahan waktu. Dalam kondisi sebenarnya, kondisi ini tidak akan pernah tercapai karena akan selalu ada perubahan aliran air. Pengaruh gempa yang dihitung dalam analisis statis merupakan parameter gempa yang bersifat statis yang diperoleh dari analisis PSHA. Analisis dinamik merupakan analisis yang mempertimbangkan perubahan keadaan bendungan dan aliran air terhadap perubahan waktu. Dalam analisis dinamik, beban gempa yang digunakan juga berupa beban gempa dinamik.

Dalam penelitian ini, baik simulasi analisis statik maupun dinamik dilakukan dengan bantuan aplikasi *GeoStudio 2018*. Analisis *SEEP/W* dan *SLOPE/W* digunakan untuk perhitungan stabilitas statis lereng bendungan sedangkan untuk stabilitas dinamik selain *SEEP/W* dan *SLOPE/W* juga digunakan *SIGMA/W*.

5.2.1 Data Bendungan

Bendungan Way - Apu merupakan bendungan tipe urugan dengan zona inti vertikal. Dalam analisis stabilitas bendungan, data yang dibutuhkan untuk perhitungan stabilitas adalah:

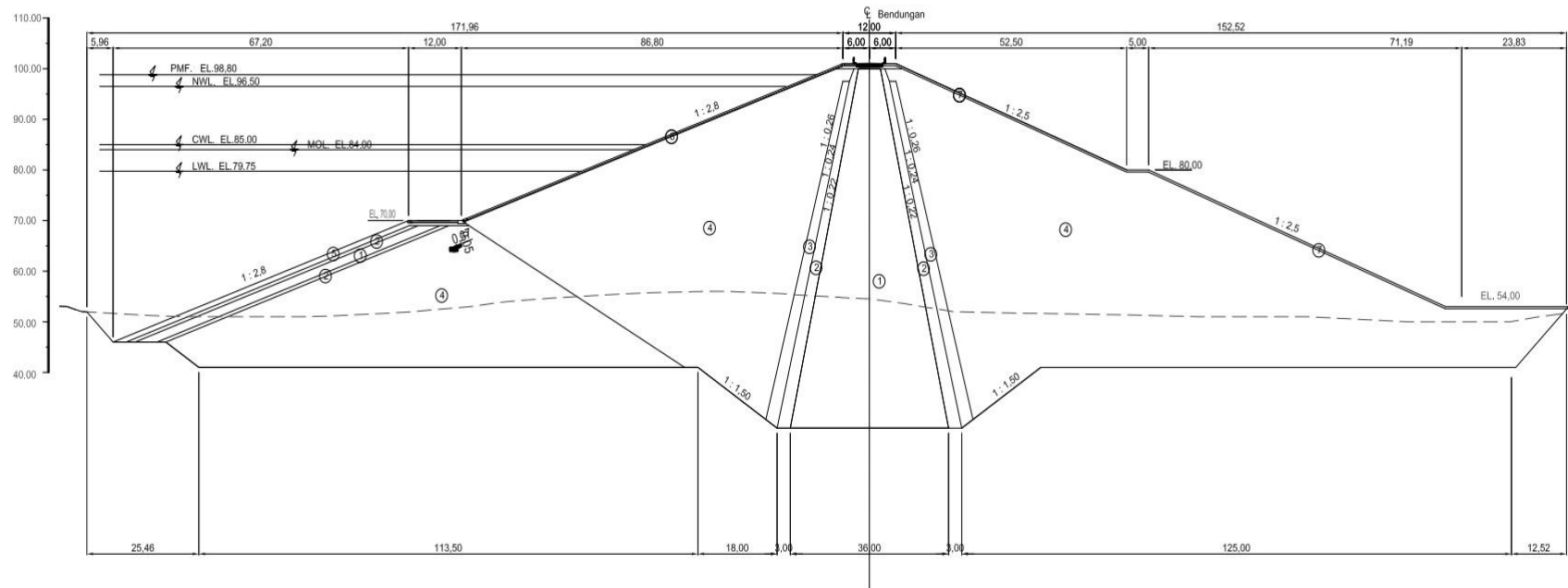
1. Gambar desain Bendungan Way - Apu untuk digunakan sebagai acuan dalam membuat model bendungan pada aplikasi *GeoStudio*.

2. Data material bendungan digunakan sebagai input dalam perhitungan stabilitas lereng bendungan. Data material termasuk parameter setiap material penyusun tubuh bendungan.
3. Data operasional bendungan seperti ketinggian muka air bendungan.

Gambar desain Bendungan Way - Apu yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.53. Gambar desain bendungan ini kemudian digambarkan ulang ke dalam format CAD dengan bantuan aplikasi *AutoCAD* dengan tujuan mempermudah dalam menggambar model bendungan dengan akurat. Pemodelan dua dimensi juga dapat dilakukan langsung di dalam aplikasi *GeoStudio*, namun keterbatasan fungsi pada *GeoStudio* menyebabkan pemodelan yang akurat lebih sulit dilakukan. Data material bendungan yang digunakan terlihat pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Data Material Bendungan Way - Apu

No	Material	Parameter				
		Berat isi kering	Berat isi basah	Berat isi jenuh	Sudut Geser dalam	
		γ_d (t/m ³)	γ_t (t/m ³)	γ_s (t/m ³)	Total ϕ (°)	Efektif ϕ' (°)
1	Inti tanah	1,66	1,95	2,04	16,45	23,27
2	Filter halus	1,66	1,70	2,05	31,72	-
3	Filter kasar	1,77	1,84	2,13	36,88	-
4	Random batu	1,71	1,82	2,07	35,43	-
5	Rip-rap	1,30	1,35	1,80	40,00	-
6	Pondasi aluvial	1,92	1,98	2,21	35,65	-
7	Pondasi <i>Shale-CL</i>	1,70	1,93	2,06	25,25	-
8	Pondasi <i>Sekis-CM</i>	1,78	2,00	2,05	37,00	-



TIPIKAL BENDUNGAN WAY APU
SKALA 1 : 500

- INTI TANAH
- ① INTI TANAH
 - ② FILTER HALUS
 - ③ FILTER KASAR
 - ④ RANDOM BATU
 - ⑤ RIP RAP
 - ⑥ CONCRETE BLOCK
 - ⑦ GEBALAN RUMPUT + FRM

Gambar 5.53 Desain Bendungan Way - Apu

Untuk dapat melakukan analisis baik statik maupun dinamik diperlukan data ketinggian muka air bendungan pada saat operasional. Pada penelitian ini digunakan data muka air bendungan seperti tampak pada Tabel 5.16.

Tabel 5.16 Ketinggian Muka Air Bendungan

No	Kondisi Muka Air	Elevasi (m)
1	Muka Air Normal	96,50
2	Muka Air Banjir	98,80
3	Muka Air Minimal	79,75

5.2.2 Kelas Resiko

Kelas resiko Bendungan Way - Apu dapat diketahui dengan merujuk pada nota perhitungan dari konsultan PT. Indra Karya yang sesuai dengan Tabel 3.9. dan besarnya faktor resiko dihitung berdasarkan Persamaan 3.23. Untuk Bendungan Way - Apu, perhitungan faktor resiko disajikan dalam Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5.17 Perhitungan Kelas Risiko Bendungan Way - Apu

No.	Pengaruh Resiko	Ukuran	Faktor Resiko	Bobot
1	Kapasitas (10^6 m^3)	59,73	FR_k	4
2	Tinggi	72	FR_t	6
3	Kebutuhan evakuasi (jumlah orang)	>1000	FR_e	12
4	Tingkat kerusakan hilir	Sangat Tinggi (Jumlah Keluarga >200)	FR_h	12
			FR_{tot}	34
			Klasifikasi	IV (Ekstrem)

(Nota Perhitungan PT Indra Karya, 2021)

Berdasarkan perhitungan kelas risiko di atas, Bendungan Way - Apu termasuk ke dalam klasifikasi kelas risiko IV (ekstrem). Untuk kategori ini, berdasarkan Tabel 3.11, metode analisis yang digunakan adalah:

1. Persyaratan tanpa kerusakan gempa atau *Operational Basis Earthquake* (OBE) digunakan analisis pseudostatik dengan periode ulang gempa $T = 100$ tahun dan persyaratan faktor keamanan $FK_{min} \geq 1,20$.
2. Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan atau *Maximum Design Earthquake* (MDE) digunakan analisis pseudostatik dengan periode ulang gempa $T = 10.000$ tahun dan persyaratan faktor keamanan $FK_{min} \geq 1$.
3. Analisis dinamik dilakukan apabila persyaratan faktor keamanan untuk gempa MDE tidak terpenuhi.

5.2.3 Koefisien Gempa Bumi

Berdasarkan analisis PSHA yang telah dilaksanakan sebelumnya, untuk lokasi Bendungan Way - Apu mempunyai koefisien gempa PGA (*Peak Ground Acceleration*) sebagaimana terlihat pada Tabel 5.18 di bawah ini.

Tabel 5.18 Koefisien Gempa PGA

No.	Periode ulang (tahun)	Percepatan puncak di batuan dasar / PGA (g)	Respon Spektrum 0,2 detik (g)	Respon Spektrum 1 detik (g)
1.	50	0,153	0,353	0,099
2.	100	0,206	0,475	0,129
3.	200	0,258	0,581	0,166
4.	500	0,335	0,733	0,216
5.	1.000	0,437	0,924	0,263
6.	2.500	0,545	1,173	0,333
7.	5.000	0,645	1,368	0,401

8.	10.000	0,767	1,600	0,476
----	--------	-------	-------	-------

Sesuai dengan hasil perhitungan faktor resiko, koefisien gempa yang digunakan untuk simulasi adalah koefisien T=100 tahun (*Operational Basis Earthquake / OBE*) dan T = 10,000 tahun (*Maximum Design Earthquake / MDE*). Koefisien gempa untuk lokasi Bendungan Way - Apu terlihat pada Tabel 5.19.

Tabel 5.19 Koefisien Gempa PGA pada Bendungan Way - Apu

Periode Ulang Gempa	Koefisien Gempa / Nilai PGA
100 tahun	0,206
10.000 tahun	0,767

Dalam analisis stabilitas bendungan, koefisien gempa ini harus dimodifikasi sesuai dengan fungsi kedalaman dari puncak bendungan agar dapat menggambarkan “Efek Cambuk” yang terjadi ketika bendungan mendapat pengaruh dari gempa, yaitu semakin tinggi tempat yang ditinjau akan semakin besar efek guncangan gempanya.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung koefisien gempa di permukaan terkoreksi adalah (lihat Persamaan):

$$K_o = \alpha_2 \times K_h$$

Dengan:

K_o : koefisien gempa terkoreksi dengan di permukaan tanah

α_2 : koreksi untuk jenis struktur; bendungan urugan $\alpha_2 = 0.5$

K_h : koefisien gempa sesuai dengan periode ulang gempa T

Sehingga perhitungan untuk koefisien gempa terkoreksi pada penelitian ini:

Untuk gempa OBE T=100 tahun

$$K_o = 0.5 \times 0.206$$

$$K_o = 0.103$$

Untuk gempa MDE T=10,000 tahun

$$K_0 = 0.5 \times 0.767$$

$$K_0 = 0.384$$

Kemudian menentukan koefisien gempa termodifikasi sesuai fungsi kedalaman adalah dengan Persamaan berikut ini:

Untuk $0 < y/H \leq 0,4$

$$k = k_0 \times (2,5 - 1,85 \times y/H)$$

dan untuk $0,4 < y/H \leq 1,0$ digunakan Persamaan

$$k = k_0 \times (2,0 - 0,6 \times y/H)$$

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan di atas, diperoleh koefisien gempa termodifikasi sesuai dengan fungsi kedalaman yang disajikan dalam Tabel 5.20.

Tabel 5.20 Koefisien Gempa Termodifikasi Bendungan Way - Apu

Periode ulang gempa T	K ₀	K pada y/H			
		0.25	0.50	0.75	1.00
100 (OBE)	0.103	0.201	0.175	0.16	0.144
10,000 (MDE)	0.384	0.782	0.653	0.595	0.538

Koefisien di atas merupakan koefisien gempa untuk arah horisontal sedangkan dalam analisis stabilitas bendungan juga perlu dihitung koefisien gempa vertikal. Untuk menghitung koefisien gempa vertikal biasanya digunakan 50% dari koefisien gempa horisontal sehingga dalam penelitian ini, digunakan koefisien gempa vertikal yang dihitung berdasarkan Persamaan, $KV = K \times 0.5$ dan disajikan dalam Tabel 5.21.

Tabel 5.21 Koefisien Gempa Termodifikasi Bendungan Way - Apu

Periode ulang gempa T	K _v pada y/h			
	0,25	0,50	0,75	1,00
100 (OBE)	0,105	0,088	0,08	0,072
10.000 (MDE)	0,391	0,327	0,298	0,269

5.2.4 Analisis Statik Lereng Bendungan

Menurut Pd T-14-2004-A tentang analisis stabilitas bendungan tipe urugan akibat beban gempa, analisis stabilitas statik bendungan dilakukan untuk kondisi berikut:

1. Selesai masa konstruksi.
2. Aliran langgeng (*steady-state seepage*)
3. Pengoperasian waduk (surut cepat)
4. Kondisi darurat

Pada penelitian ini, kondisi waduk yang dihitung dalam analisis stabilitas lereng bendungan adalah:

1. Selesai masa konstruksi kondisi air kosong
2. Kondisi air langgeng muka air normal pada elevasi +96,5 m
3. Kondisi air langgeng muka air banjir pada elevasi +98,8 m
4. Kondisi pengoperasian surut cepat dari muka air normal elevasi +96,5 m ke muka air minimum elevasi +79,75 m

Analisa stabilitas bendungan menggunakan program *GeoStudio* 2018 R2. Metode analisis yang digunakan adalah *SEEP/W* dan *SLOPE/W*. *SEEP/W* digunakan untuk memperoleh nilai *pore water pressure* dan garis *freatik* pada

tubuh bendungan. *Output* dari *SEEP/W* digunakan dalam analisa *SLOPE/W* untuk memperoleh nilai faktor keamanan bendungan. Analisis stabilitas statik Bendungan Way - Apu secara garis besar dilakukan sesuai dengan Tabel 5.22.

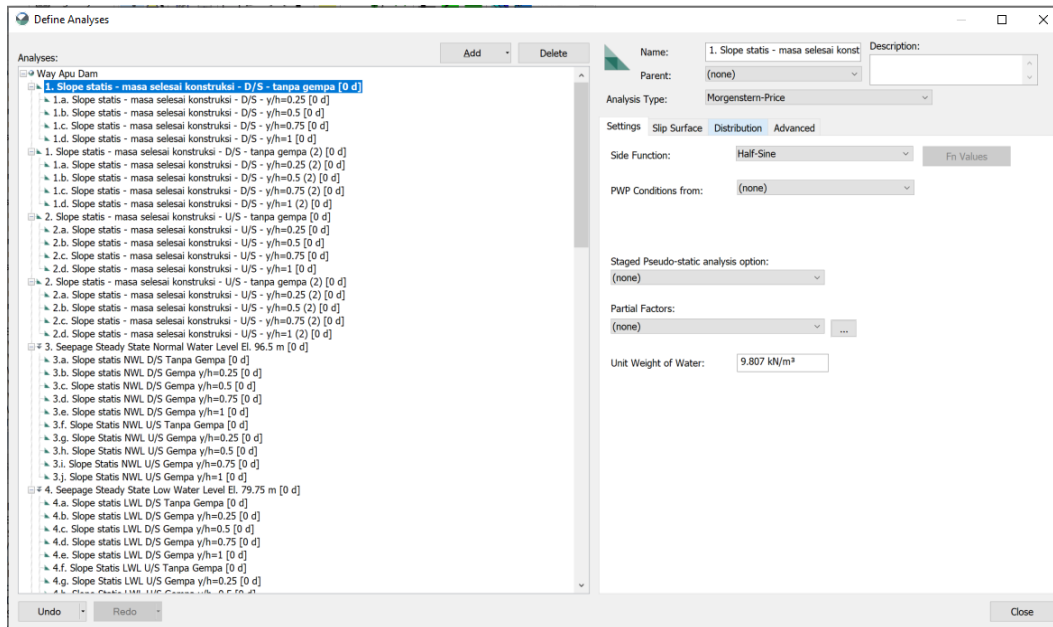
Tabel 5.22 Koefisien Gempa Termodifikasi Bendungan Way - Apu

No	Kondisi	Analisis	Keterangan	Hasil
1	Kondisi setelah masa konstruksi dengan air kosong	<i>Slope/W</i>	Tipe Morgenstern-Price tanpa PWP dan menggunakan <i>entry & exit</i> untuk <i>slip surface</i>	Faktor Keamanan
2	Kondisi aliran <i>steady-state</i>	<i>Seep/W</i>	Tipe <i>steady state</i> dan <i>boundary condition</i> sesuai Muka Air Normal	<i>Pore Water Pressure / garis freatik</i>
		<i>Slope/W</i>	Tipe Morgenstern-Price dengan PWP dari <i>Seep/W</i>	Faktor keamanan
4	Kondisi surut cepat / <i>rapid drawdown</i>	<i>Seep/W</i>	Tipe <i>Steady-State</i>	<i>Initial PWP Condition</i>
		<i>Seep/W</i>	Tipe <i>Transient</i> dengan <i>boundary condition level with time</i>	PWP pada <i>time frame</i> sesuai dengan kecepatan <i>drawdown</i>
		<i>Slope/W</i>	Dengan PWP dari <i>Seep/W transient</i>	Faktor Keamanan

Pada kondisi masa selesai konstruksi/ air kosong (nomor 1 dan 2) digunakan program *SLOPE/W* dengan tipe Morgenstern-Price tanpa PWP. *Slip surface* sisi lereng hulu dan hilir menggunakan *entry and exit* yang dibedakan arahnya. Analisis statis bendungan pada masa selesai konstruksi/ air kosong mengikuti beberapa langkah dibawah ini, yaitu:

1. Membuat analisis baru pada *SLOPE/W* dengan tipe Morgenstern-Price, tanpa *Pore Water Pressure* dan *slip surface* dengan *option entry and exit*.

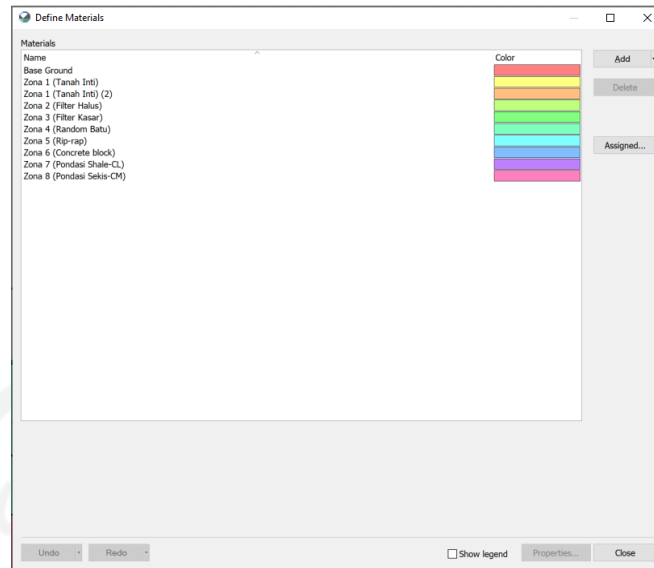
Klik *Define Analysis* → *Add* → *Seep/W Analysis* → *Steady-state* seperti pada Gambar 5.54.



Gambar 5.54 Jendela *Define Analysis*

2. *Input material* pada *region* bendungan dan parameter sesuai data

Untuk melakukan *input material* klik *Define* → *Materials* sesuai dengan Gambar 5.55. Sedangkan untuk melakukan *input material* pada *region* klik *Draw* → *Material*.



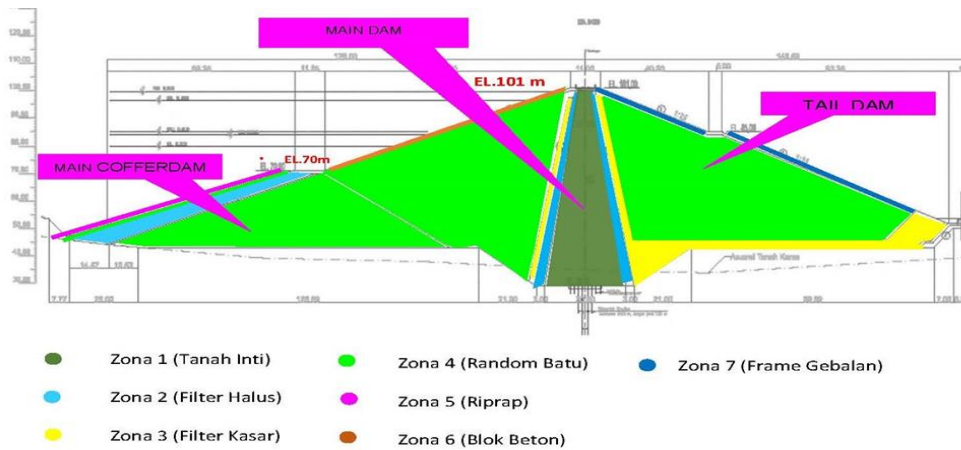
Gambar 5.55 Jendela *Define Materials*

Beberapa material yang digunakan dalam simulasi perhitungan analisis *SLOPE/W* Serta gambar masing masing zonal ditunjukkan oleh Tabel 5.23 dan Gambar 5.56.

Tabel 5.23 Material dalam Simulasi Analisis *Slope/W*

No	Nama material	Material model	<i>Unit weight</i> (kN/m ³)	ϕ (^o)	<i>Cohesion</i> (kPa)
1	Zona 1 (Tanah Inti)	Mohr-Coulomb	19,13	16,45	37,67
2	Zona 2 (Filter Halus)	Mohr-Coulomb	16,68	31,72	0
3	Zona 3 (Filter Kasar)	Mohr-Coulomb	18,05	36,88	0
4	Zona 4 (<i>Random</i> Batu)	Mohr-Coulomb	17,85	35,43	13,5378
5	Zona 5 (<i>Rip-rap</i>)	Mohr-Coulomb	13,24	40	0
6	Zona 6 (<i>Concrete block</i>)	Mohr-Coulomb	19,42	35,65	0
7	Zona 7 (Pondasi <i>Shale-CL</i>)	Mohr-Coulomb	18,93	25,25	0

8	Zona 8 (Pondasi Sekis-CM)	Mohr-Coulomb	19,62	37	62,78
---	---------------------------	--------------	-------	----	-------

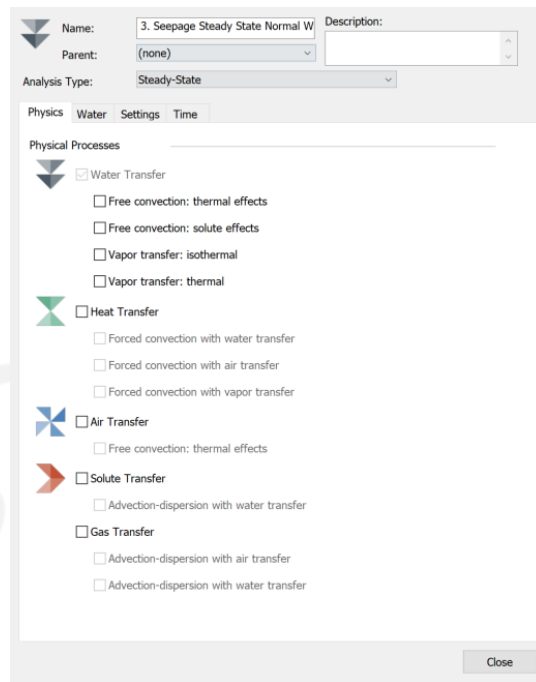


Gambar 5.56 gambar masing masing zonal bendungan Way-Apu

3. Untuk kondisi tanpa gempa, *seismic load* dikosongkan.
4. Untuk kondisi dengan gempa OBE, *seismic load* diisi dengan koefisien gempa horizontal dan vertikal dengan ketinggian masing-masing ($y/h = 0,25; 0,50; 0,75; 1,00$).
5. *Running simulation* untuk mendapatkan angka faktor keamanan untuk setiap kondisi.

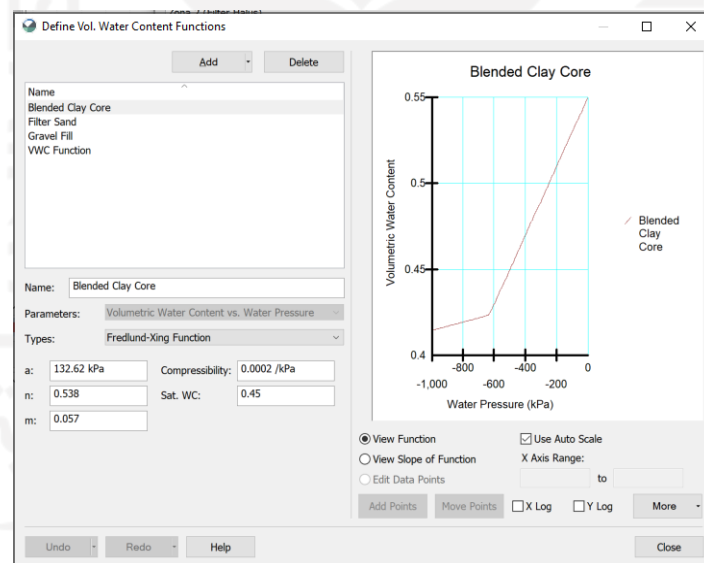
Untuk analisis kondisi dengan aliran *steady-state* muka air normal, muka air banjir dan muka air minimum, sebelum analisis stabilitas dengan *SLOPE/W* terlebih dahulu dilakukan analisis *SEEP/W steady-state* untuk mendapatkan garis *freatik pore water pressure* yang digunakan pada analisis *SLOPE/W*. Prosedur simulasinya adalah sebagai berikut:

1. Membuat analisis baru untuk *SEEP/W* dengan tipe *steady state*.



Gambar 5.56 Jendela Pembuatan Analisis Baru untuk *SEEP/W*

2. Menentukan fungsi hidrolis untuk material: *Hydraulic conductivity* dan *Volume Water Content*.



Gambar 5.57 Jendela *Define Volume Water Content Function*

Hydraulic Conductivity Function:

a. *Blended Clay Core*

Type

: *Hyd. K Data Point Function*

Estimation Method : Fredlund-Xing-Huang
Vol. Water Content Fn : Blended Clay Core
Saturated Kx : $1,08 \times 10^{-7}$ m/sec

b. *Hydraulic Fine Sand*

Type : Hyd. K Data Point Function
Estimation Method : Fredlund-Xing-Huang
Vol. Water Content Fn : Blended Clay Core
Saturated Kx : 10^{-6} m/sec

c. *Coarse Sand*

Type : Hyd. K Data Point Function
Estimation Method : Fredlund-Xing-Huang
Vol. Water Content Fn : Blended Clay Core
Saturated Kx : 0,001 m/sec

d. *Gravel Fill*

Type : Hyd. K Data Point Function
Estimation Method : Fredlund-Xing-Huang
Vol. Water Content Fn : Blended Clay Core
Saturated Kx : $7,52 \times 10^{-6}$ m/sec

3. *Input material untuk SEEP/W*

a. *Zona 1 (Tanah Inti)*

Material Model : Saturated/Unsaturated
Vol. Water Content Fn. : Blended Clay Core
Hyd. Conductivity Fn. : Blended Clay Core

b. *Zona 2 (Filter Halus)*

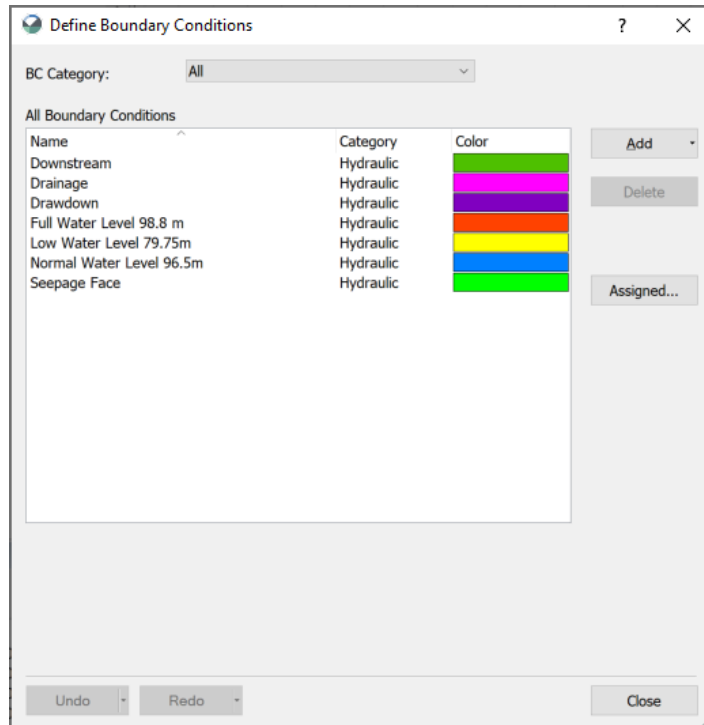
Material Model : Saturated/Unsaturated
Vol. Water Content Fn. : Filter Sand
Hyd. Conductivity Fn. : Hydraulic Fine Sand

c. *Zona 3 (Filter Kasar)*

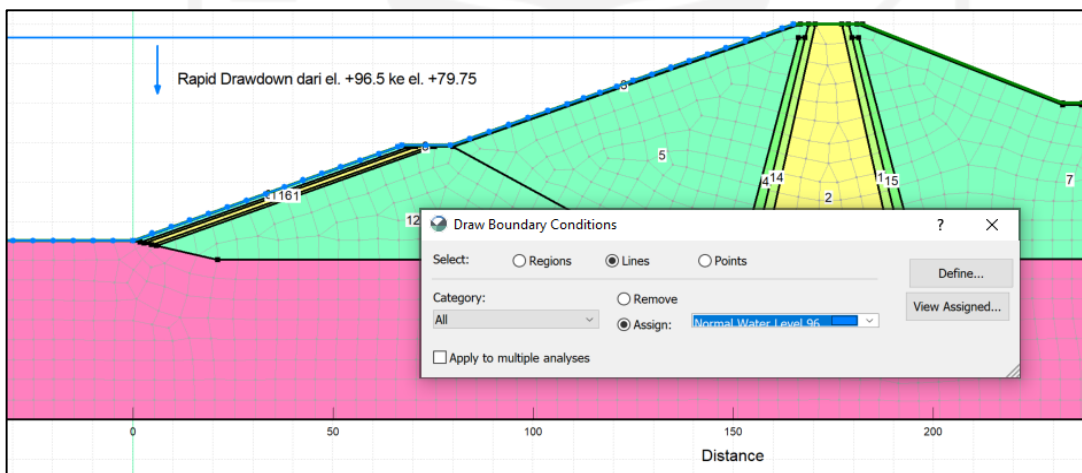
Material Model : Saturated/Unsaturated
Vol. Water Content Fn. : Filter Sand

- Hyd. Conductivity Fn.* : *Coarse Sand*
- d. Zona 4 (Random batu)
- Material Model* : *Saturated/Unsaturated*
- Vol. Water Content Fn.* : *Gravel Fill*
- Hyd. Conductivity Fn.* : *Gravel Fill*
- e. Zona 5 (Rip-rap)
- Material Model* : *Saturated Only*
- Sat. X-Conductivity* : *0,01 m/sec*
- f. Zona 6 (Concrete Block)
- Material Model* : *Saturated Only*
- Sat. X-Conductivity* : *10^{-11} m/sec*
- g. Zona 6 (Pondasi Shale-CL)
- Material Model* : *Saturated Only*
- Sat. X-Conductivity* : *5×10^{-7} m/sec*
- h. Zona 6 (Concrete Sekis-CM)
- Material Model* : *Saturated Only*
- Sat. X-Conductivity* : *$6,62 \times 10^{-9}$ m/sec*

4. *Define boundary* untuk analisa *SEEP/W*. Dalam analisis ini digunakan *boundary conditions* sebagai berikut:
- Water Total Head* untuk level muka air.
 - Water Pressure Head* untuk *Zero pressure*.



Gambar 5.58 Jendela *Define Boundary Condition*



Gambar 5.59 Jendela *Draw Boundary Condition*

5. *Start solve manager* untuk menjalankan simulasi dan mendapatkan *output* berupa garis *freatik* yang akan digunakan pada analisis *SLOPE/W* selanjutnya.

6. Analisis *SEEP/W* ini dibuat untuk setiap *Water Level: Normal Water Level* +96,5m; *Low Water Level* +84,88 dan *Flood Water Level* + 98,8m.

Analisis *SLOPE/W* dilakukan untuk setiap kondisi yang telah ditentukan dalam penelitian ini, yaitu kondisi kosong, *steady-state* dan *rapid drawdown* pada lereng hulu dan hilir dengan beban gempa dari setiap koefisien gempa termodifikasi.

Hasil simulasi statis Bendungan Way - Apu untuk kondisi tanpa gempa ditunjukkan oleh Tabel 5.24.

Tabel 5.24 Hasil Simulasi Analisis Statis Bendungan Tanpa Gempa

No.	Kondisi	FK minimal	y/h	Faktor Keamanan		Keterangan	
				Hulu U/S	Hilir D/S	Hulu	Hilir
1	Selesai masa konstruksi, air kosong dan tanpa gempa	1,3	-	2,578	2,247	Aman	Aman
2	Kondisi air <i>steady state</i> , muka air normal / <i>Normal Water Level (NWL)</i> +96,5 m tanpa gempa	1,5	-	3,072	2,243	Aman	Aman
3	Kondisi muka air banjir / <i>Flood Water Level (FWL)</i> +98,8 m tanpa gempa	1,3	-	3,210	2,243	Aman	Aman
4	Kondisi muka air minimum/ <i>Low Water Level (LWL)</i> +79,75 m tanpa gempa	1,3	-	2,397	2,243	Aman	Aman
5	Kondisi surut cepat (<i>Rapid Drawdown</i>) dari muka air normal +96,5 m ke muka air minimum +79,75 m tanpa gempa	1,3	-	2,429	2,148	Aman	Aman
6	Kondisi darurat surut cepat (<i>Rapid Drawdown</i>) dari muka air maksimum +98,8 m ke muka air minimum +79,75 m tanpa gempa	1,3	-	2,382	1,955	Aman	Aman

Hasil simulasi statis Bendungan Way - Apu untuk kondisi gempa OBE ditunjukkan oleh Tabel 5.25.

Tabel 5.25 Hasil Simulasi Analisis Statis Bendungan Gempa OBE

No.	Kondisi	FK minimal	y/h	Faktor Keamanan		Keterangan	
				Hulu U/S	Hilir D/S	Hulu	Hilir
1	Selesai masa konstruksi, air kosong dan dengan beban gempa 50% gempa OBE	1,2	0,25	1,614	1,534	Aman	Aman
			0,50	1,625	1,621	Aman	Aman
			0,75	1,717	1,527	Aman	Aman
			1,00	1,749	1,578	Aman	Aman
2	Kondisi air <i>steady state</i> , muka air normal / <i>Normal Water Level (NWL)</i> +96,5 m dengan beban gempa 50% gempa OBE	1,2	0,25	1,683	1,534	Aman	Aman
			0,50	1,637	1,621	Aman	Aman
			0,75	1,460	1,527	Aman	Aman
			1,00	1,543	1,578	Aman	Aman
3	Kondisi muka air banjir / <i>Flood Water Level (FWL)</i> +98,8 m dengan gempa OBE	1,2	0,25	1,780	1,534	Aman	Aman
			0,50	1,711	1,621	Aman	Aman
			0,75	1,494	1,527	Aman	Aman
			1,00	1,579	1,578	Aman	Aman
4	Kondisi muka air minimum/ <i>Low Water Level (LWL)</i> +79,75 m dengan gempa OBE	1,2	0,25	1,611	1,534	Aman	Aman
			0,50	1,479	1,621	Aman	Aman

No.	Kondisi	FK minimal	y/h	Faktor Keamanan		Keterangan	
				Hulu U/S	Hilir D/S	Hulu	Hilir
			0,75	1,340	1,527	Aman	Aman
			1,00	1,404	1,578	Aman	Aman
5	Kondisi surut cepat dari muka air normal +96,5 m ke muka air minimum +79,75 m, dengan gempa OBE	1,1	0,25	1,152	1,314	Aman	Aman
			0,50	1,249	1,389	Aman	Aman
			0,75	1,296	1,424	Aman	Aman
			1,00	1,352	1,465	Aman	Aman
6	Kondisi darurat surut cepat dari muka air normal +98,8 m ke muka air minimum +79,75 m dengan gempa OBE	1,1	0,25	1,187	1,269	Aman	Aman
			0,50	1,288	1,340	Aman	Aman
			0,75	1,337	1,374	Aman	Aman
			1,00	1,395	1,413	Aman	Aman

Hasil simulasi statis Bendungan Way - Apu untuk kondisi gempa MDE ditunjukkan oleh Tabel 5.26.

Tabel 5.26 Hasil Simulasi Analisis Statis Bendungan Gempa MDE

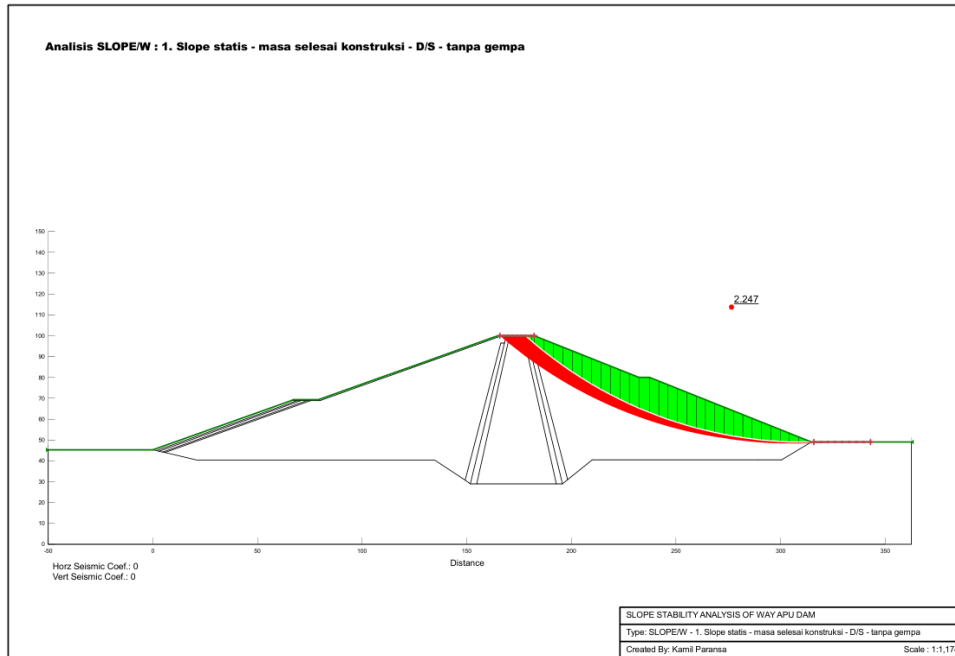
No.	Kondisi	FK minimal	y/h	Faktor Keamanan		Keterangan	
				Hulu U/S	Hilir D/S	Hulu	Hilir
1	Selesai masa konstruksi, air kosong dan dengan beban	1,0	0,25	0,847	0,813	Tidak Aman	Tidak Aman

No.	Kondisi	FK minimal	y/h	Faktor Keamanan		Keterangan	
				Hulu U/S	Hilir D/S	Hulu	Hilir
	gempa 50% gempa MDE		0,50	0,887	0,888	Tidak Aman	Tidak Aman
			0,75	0,945	0,864	Tidak Aman	Tidak Aman
			1,00	0,985	0,913	Tidak Aman	Tidak Aman
2	Kondisi air <i>steady state</i> , muka air normal / <i>Normal Water Level (NWL)</i> +96,5 m dengan beban gempa 50% gempa MDE	1,0	0,25	0,790	0,813	Tidak Aman	Tidak Aman
			0,50	0,778	0,888	Tidak Aman	Tidak Aman
			0,75	0,706	0,864	Tidak Aman	Tidak Aman
			1,00	0,747	0,913	Tidak Aman	Tidak Aman
3	Kondisi surut cepat dari muka air normal +96,5 m ke muka air minimum +79,75 m dengan gempa MDE	1,0	0,25	0,597	0,707	Tidak Aman	Tidak Aman
			0,50	0,660	0,777	Tidak Aman	Tidak Aman
			0,75	0,695	0,817	Tidak Aman	Tidak Aman
			1,00	0,736	0,859	Tidak Aman	Tidak Aman

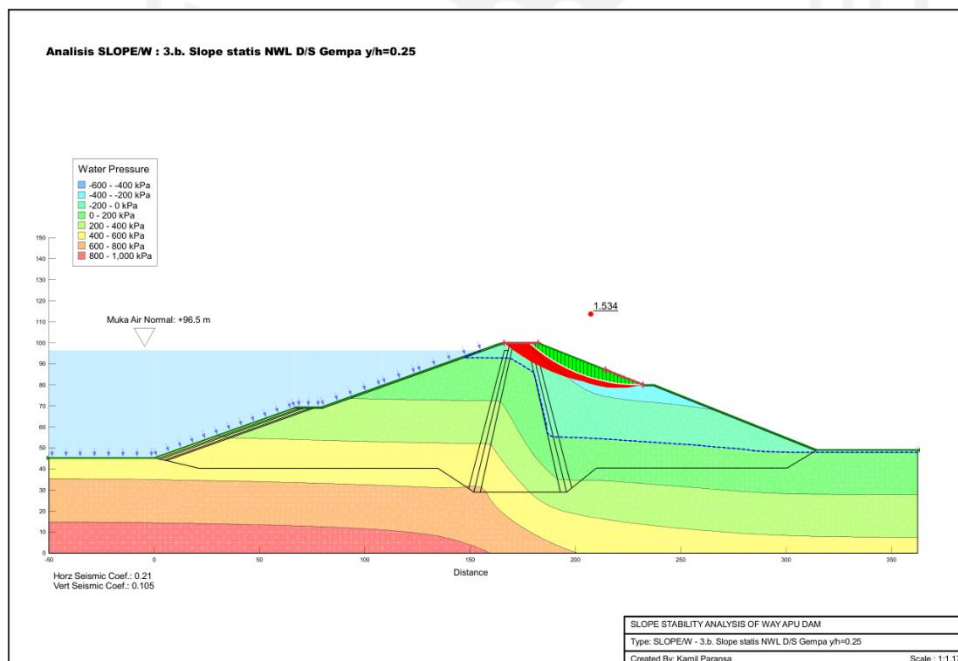
Hasil perhitungan untuk analisis statik stabilitas lereng Bendungan Way - Apu memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu dan dalam keadaan tanpa gempa maupun dengan beban gempa OBE atau gempa periode ulang 100 tahun.

Sedangkan untuk beban gempa MDE tidak memenuhi persyaratan angka keamanan. Sesuai dengan Pd T-14-2004-A, pada kondisi yang tidak memenuhi

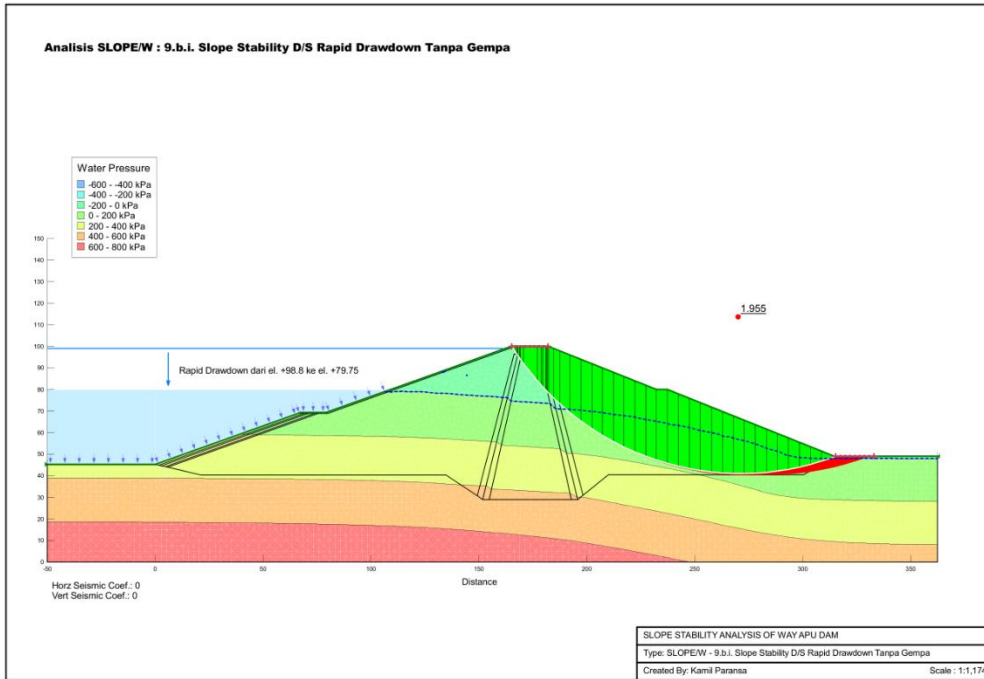
angka keamanan perlu dilakukan analisis dinamik untuk menghitung deformasi yang terjadi pada saat keadaan gempa. Dalam penelitian ini, perhitungan analisis dinamik dilakukan dengan *QUAKE/W* dan *SLOPE/W*.



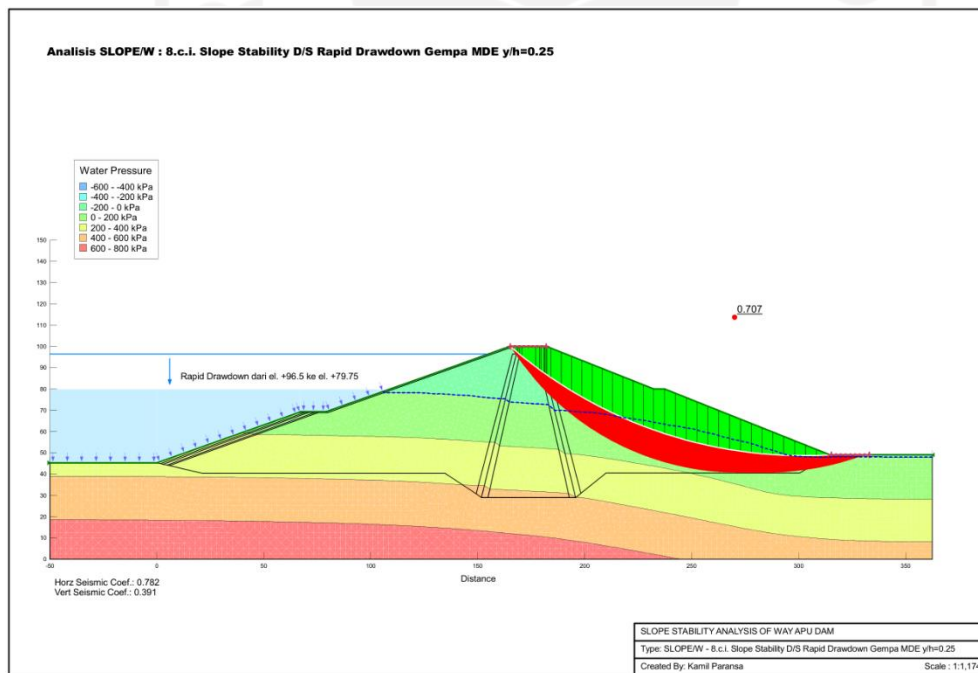
Gambar 5.60 Analisis *SLOPE/W* (Statis, masa konstruksi selesai, tanpa gempa)



Gambar 5.61 Analisis *SLOPE/W* (Statis, NWL D/S Gempa $y/h=0,25$)



Gambar 5.62 Analisis *SLOPE/W* (Stability, rapid drowdown, tanpa gempa)



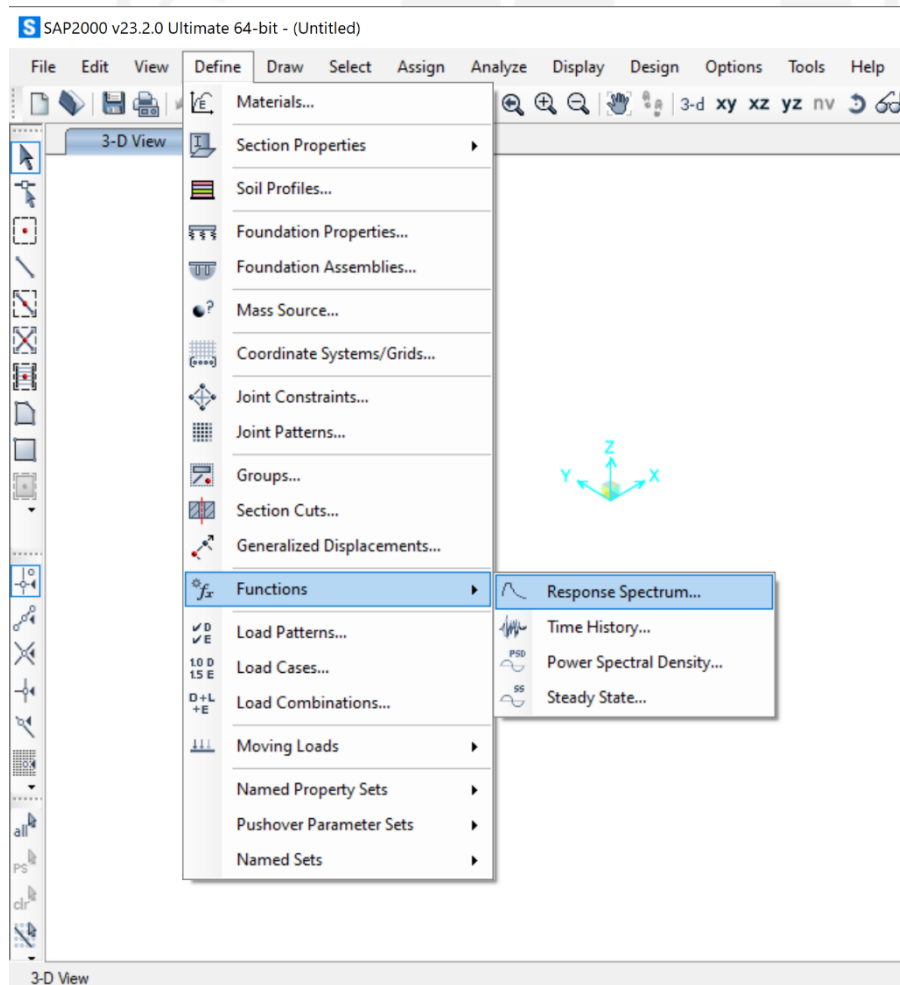
Gambar 5.63 Analisis *SLOPE/W* (Slope stability, rapid drowdown, Gempa MDE $y/h=0,25$)

5.2.5 Analisis Dinamik Lereng Bendungan

Dalam analisis dinamik kestabilan lereng bendungan dihitung dengan mempertimbangkan pengaruh perubahan waktu terhadap perubahan parameter. Sebagai contoh, koefisien gempa yang digunakan adalah koefisien gempa dinamik. Dalam penelitian ini koefisien gempa dinamik yang digunakan adalah data simulasi *ground motion*. Data *ground motion* ini diperoleh dengan menggunakan fungsi *spectrum response* dan *time history* pada aplikasi SAP2000. *Simulasi ground motion* dengan SAP2000 adalah sebagai berikut:

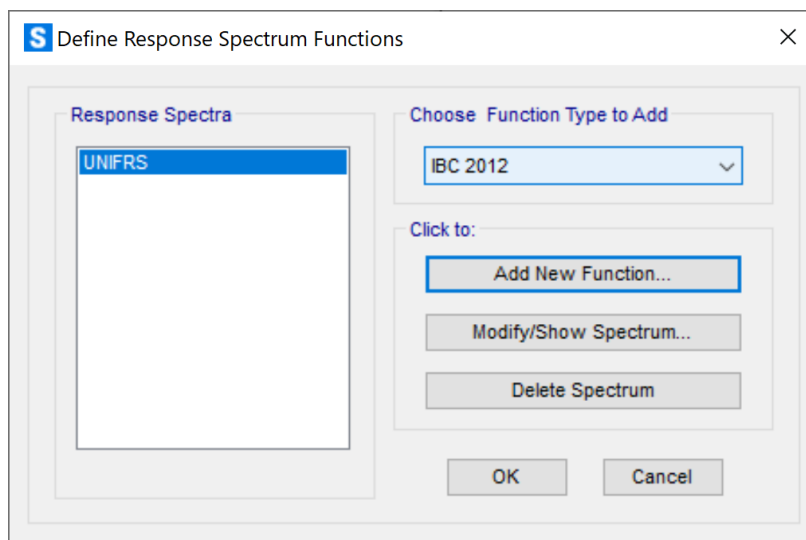
1. Setelah membuat file baru pada aplikasi SAP2000.

Klik *Define*→*Function*→*Response Spectrum*. Seperti tampak pada Gambar 5.64.

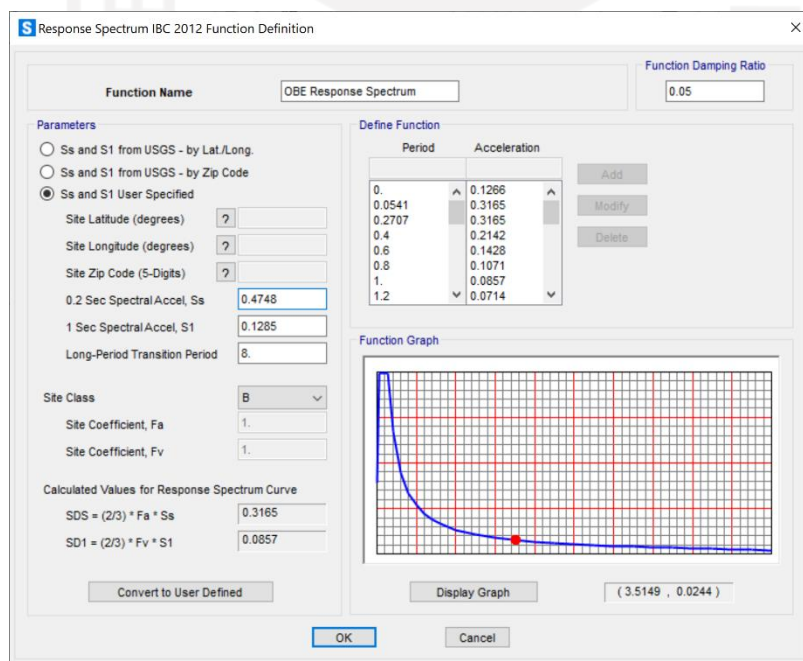


Gambar 5.64 Menentukan Respon Spektrum Gempa

2. Membuat *response spectrum* berdasarkan koefisien gempa OBE dan MDE dari hasil simulasi PSHA. Function yang digunakan adalah IBC2012. Pada jendela *Define Response Spectrum Function* pilih IBC2010 dan *Add New Function*.



Gambar 5.65 Mendefinisikan Respon Spektrum Gempa



Gambar 5.66 *Function Definition* pada Respon Spektrum Gempa

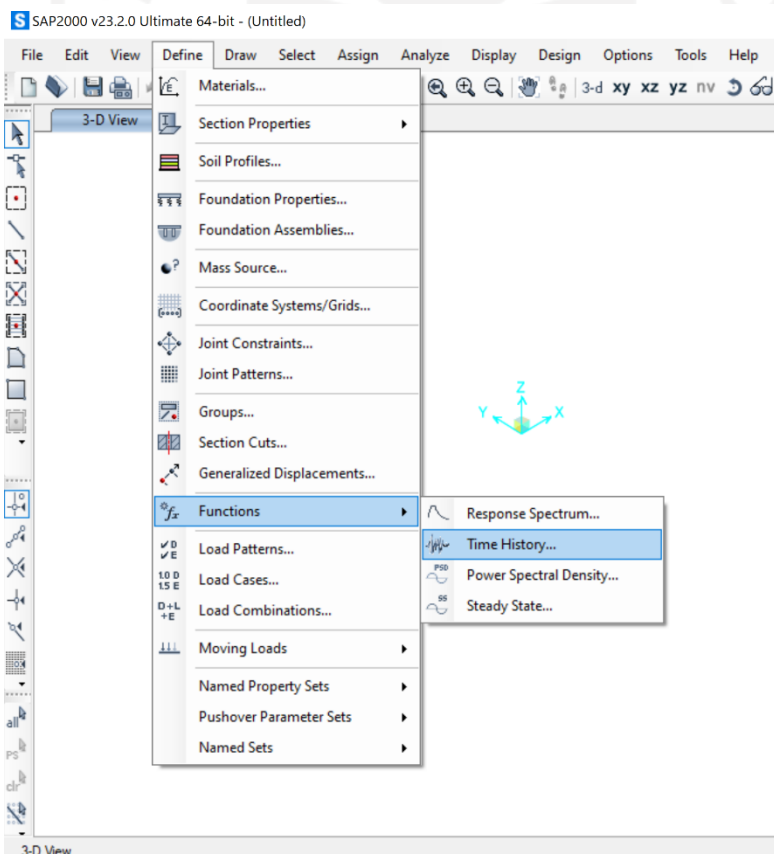
Data Ss dan S1 diambil dari perhitungan PSHA dengan R-CRISIS dengan nilai tampak pada Tabel 5.27.

Tabel 5.27 Nilai Parameter PSHA yang digunakan

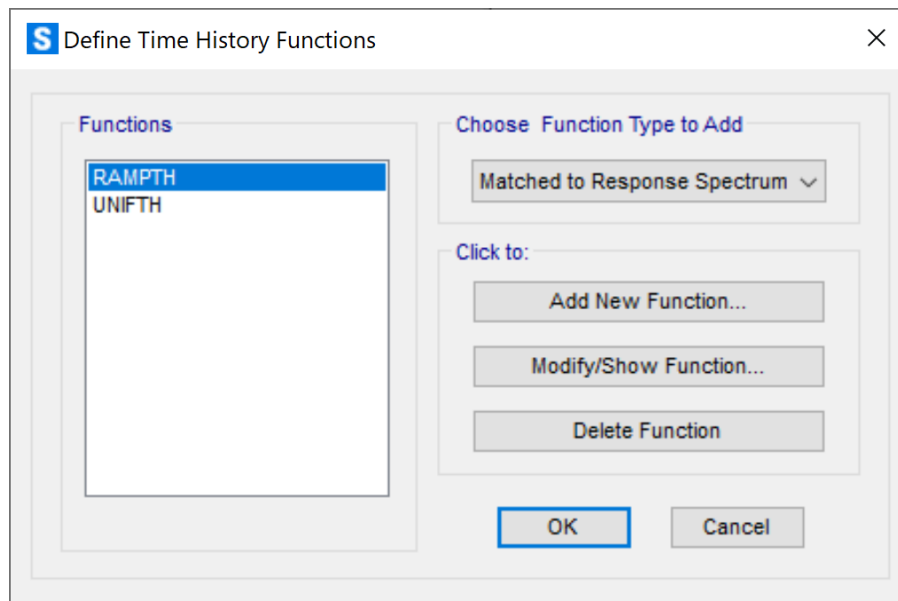
Parameter	Gempa OBE	Gempa MDE
0,2 sec Spectral Acceleration, Ss	0,4748	1,5994
1 sec Spectral Acceleration, S1	0,1285	0,4756

3. Membuat *time history* sesuai dengan *response spectrum* yang telah dibuat.

Klik *Define* → *Functions* → *Time History* → pilih *type Matched to Response Spectrum* seperti tampak pada Gambar 5.67.

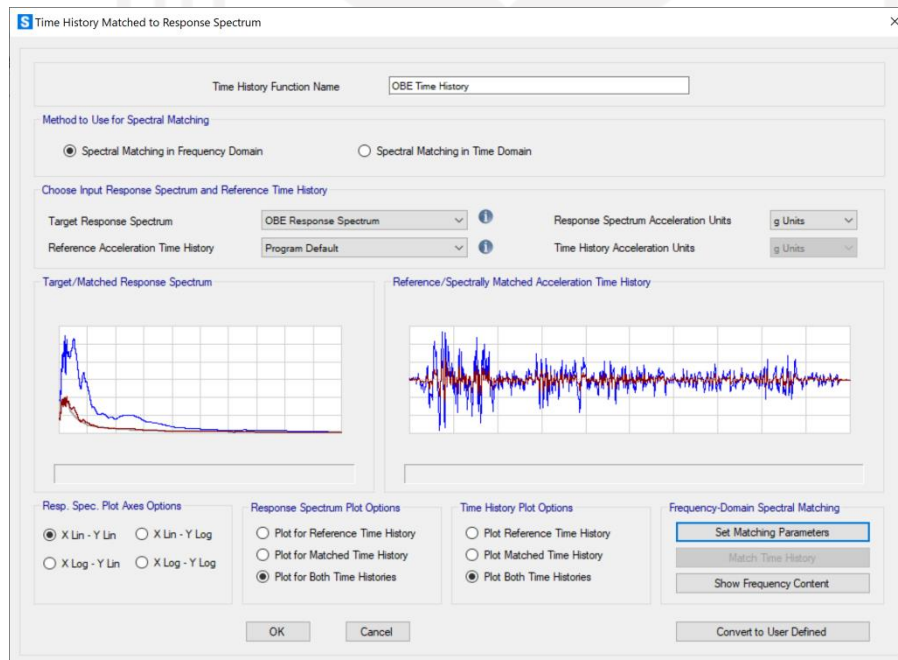


Gambar 5.67 Pembuatan *Time History* Gempa



Gambar 5.68 Pendefinisian Fungsi *Time History*

Pada jendela *Time History* pilih *response spectrum* yang telah dibuat sebelumnya sebagai *Target Response Spectrum*.



Gambar 5.69 Grafik Fungsi *Time History*

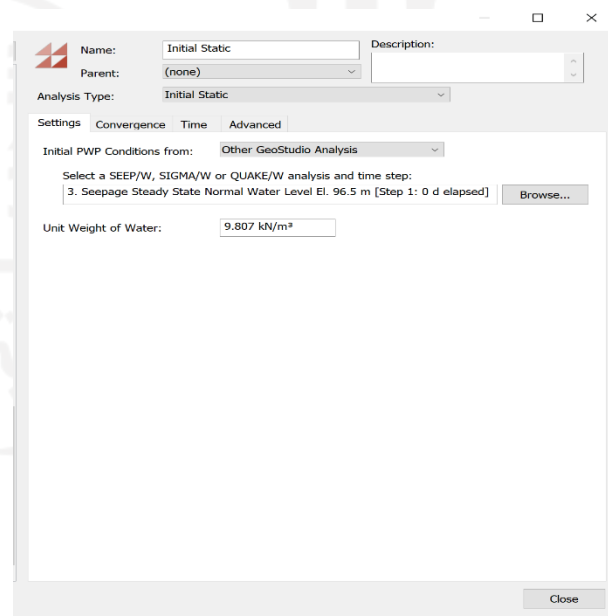
4. Data ini kemudian di-*export* ke format *Microsoft Excel* untuk kemudian digunakan sebagai *input* dalam analisis *QUAKE/W*.

5.2.6 Perhitungan *Displacement* dengan *QUAKE-W*

QUAKE/W adalah bagian dari aplikasi *GeoStudio* yang digunakan untuk menghitung analisis kestabilan akibat dari pengaruh gempa. Dalam penelitian ini *QUAKE/W* digunakan untuk menghitung *displacement* yang terjadi pada puncak bendungan pada saat menerima beban gempa baik gempa OBE maupun gempa MDE.

Pada penelitian ini digunakan analisis *QUAKE/W* tipe *initial static* dan kemudian dilanjutkan dengan analisis tipe *Linear Equivalent*. Langkah - langkah analisis dinamik dengan *QUAKE/W* adalah sebagai berikut:

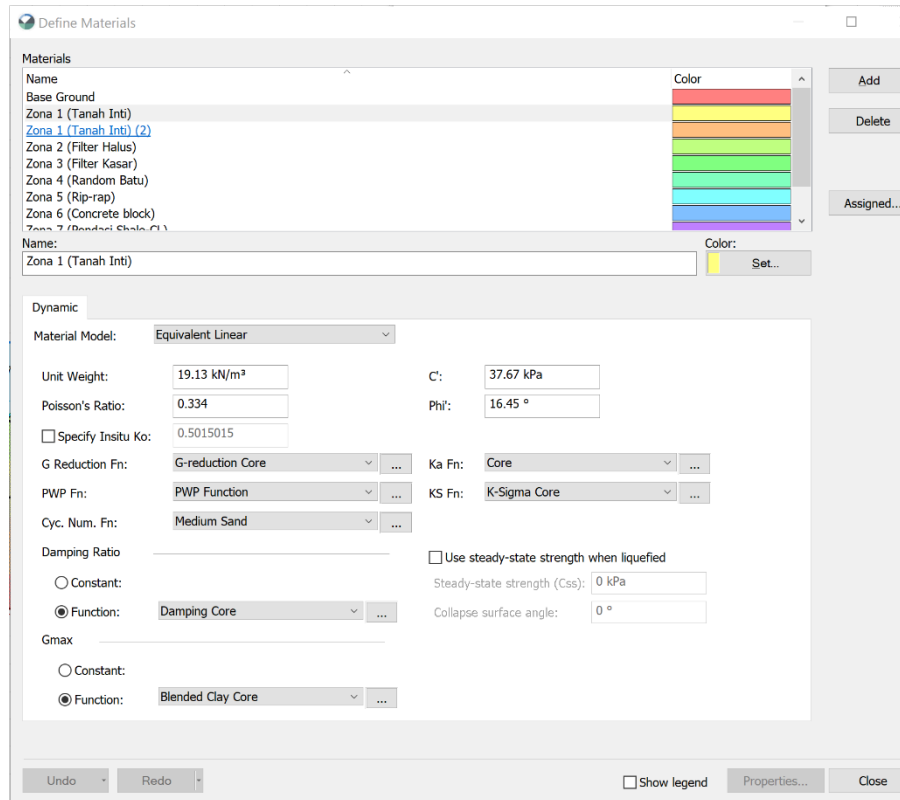
1. Analisis *QUAKE/W initial static* untuk kondisi awal
 - a. Membuat analisis *QUAKE/W* baru dengan tipe *initial static* dan *initial PWP* dari analisis *SEEP/W* sesuai dengan kondisi muka air yang dianalisis.



Gambar 5.70 Pembuatan File Analisis *QUAKE/W* Baru

b. *Input material properties* untuk analisis *QUAKE/W*

Material pada penelitian ini menggunakan tipe *equivalent linear* untuk dibuat fungsi masing-masing untuk *G Reduction*, *Pore Water Pressure*, *Cyc. Num*, *Ka*, *KS*, *Damping ratio* dan *Gmax*.

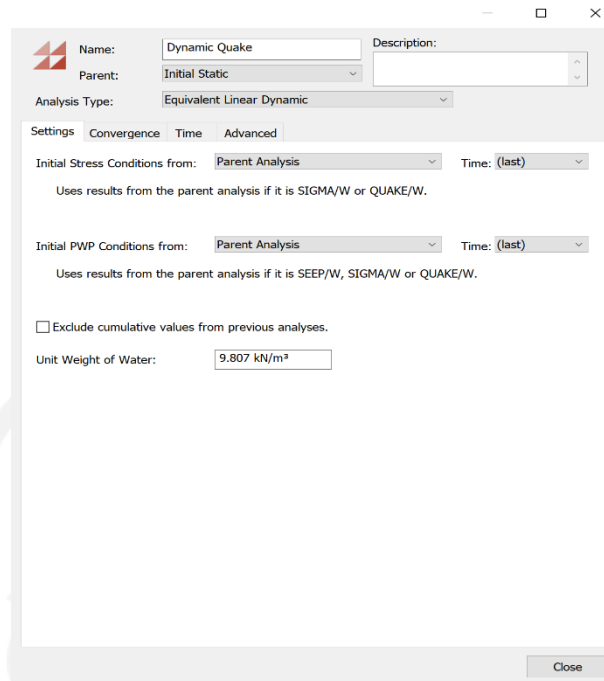


Gambar 5.71 *Input Properti Material pada QUAKE/W*

2. Analisis *QUAKE/W* dengan *type dynamic quake* untuk mendapatkan pengaruh gempa dinamik terhadap bendungan. Analisis *dynamic quake* ini menggunakan data *time history* dari SAP2000 sebagai *Horizontal Earthquake Records*.

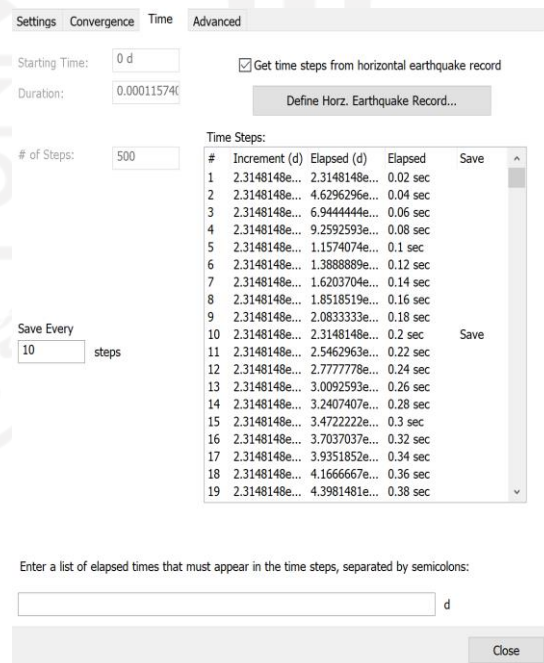
a. Membuat analisis *QUAKE/W* dengan *type dynamic quake* dan analisis *Initial Static* sebagai *parent*.

Klik → *Define Analyses* → *Add* → *QUAKE/W Analysis* → *Equivalent Linear Dynamic* seperti tampak pada Gambar 5.72.

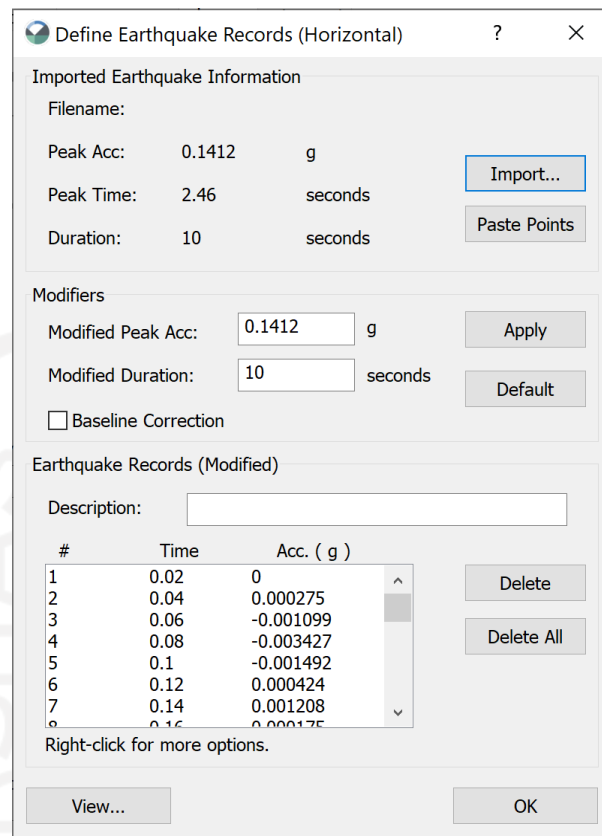


Gambar 5.72 Pembuatan Analisis *QUAKE/W* Tipe Dinamik

Pada tab *Time* klik *Define Horizontal Earthquake record* untuk memasukkan data *time history* dari SAP2000 seperti tampak pada Gambar 5.73.

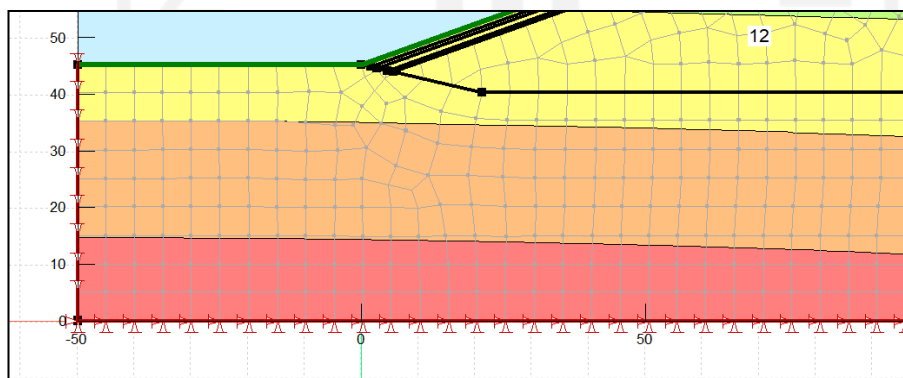


Gambar 5.73 Pendefinisian *Horizontal Earthquake*



Gambar 5.74 Pendefinisian *Horizontal Earthquake Record*

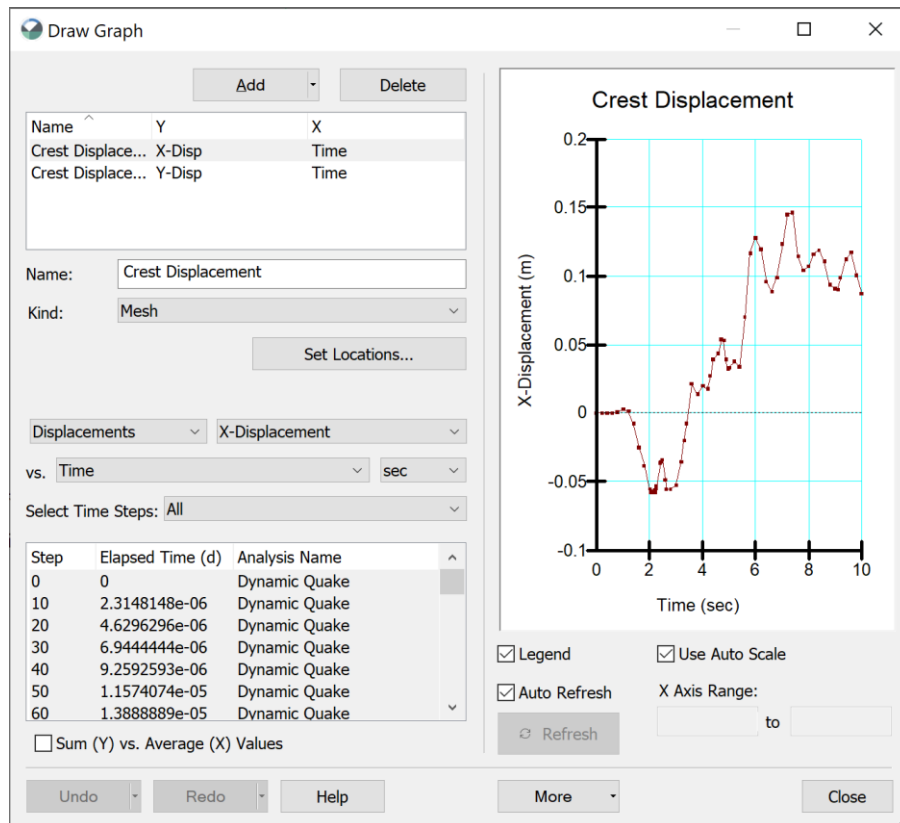
- b. Menentukan *boundary conditions* pada bagian sumbu Y dengan *Fixed X* dan *fixed X/Y* untuk sumbu X.



Gambar 5.75 Penentuan *Boundary Condition*

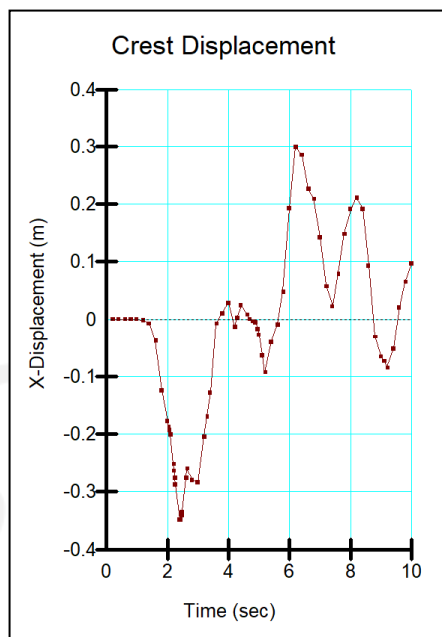
- c. Setelah menjalankan simulasi, informasi mengenai *displacement* dapat dilihat dengan membuat *plot* grafik *x-displacement vs time* dan *y-displacement vs time*.

Pada jendela *Result*, klik *Draw*→*Graph*.



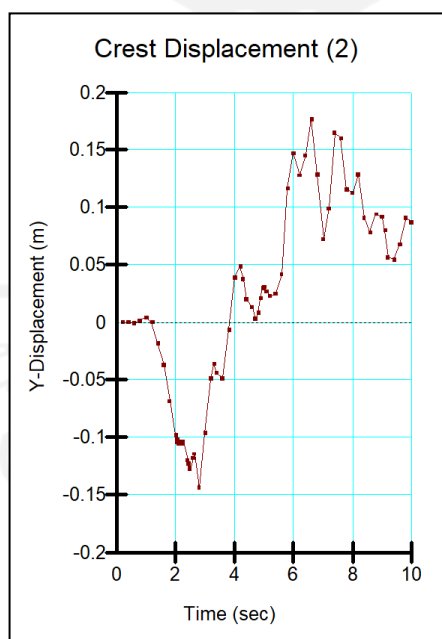
Gambar 5.76 Penentuan Penggambaran Grafik

Untuk membuat grafik *x-displacement vs time* digunakan tipe *Mesh* dan *set location* pada puncak bendungan serta tipe *displacement* dan *X-Displacement*. Hasil *X-Displacement* untuk kondisi *steady-state* muka air normal +96,5 m seperti tampak pada Gambar 5.77.



Gambar 5.77 *Crest Displacement (x-displacement)*

Hasil *Y-Displacement* untuk kondisi *steady-state* muka air normal +96,5 m seperti tampak pada Gambar 5.78.

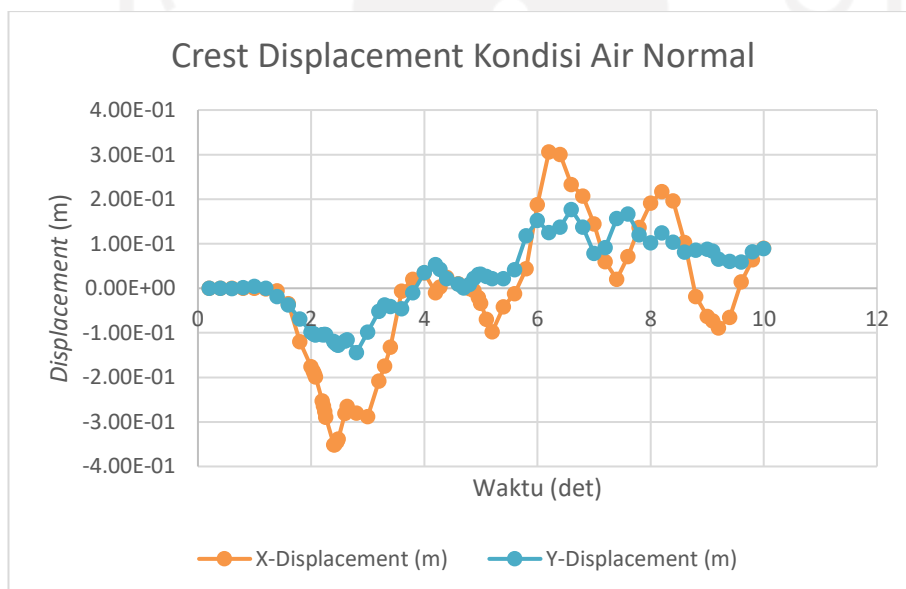


Gambar 5.78 *Crest Displacement (y-displacement)*

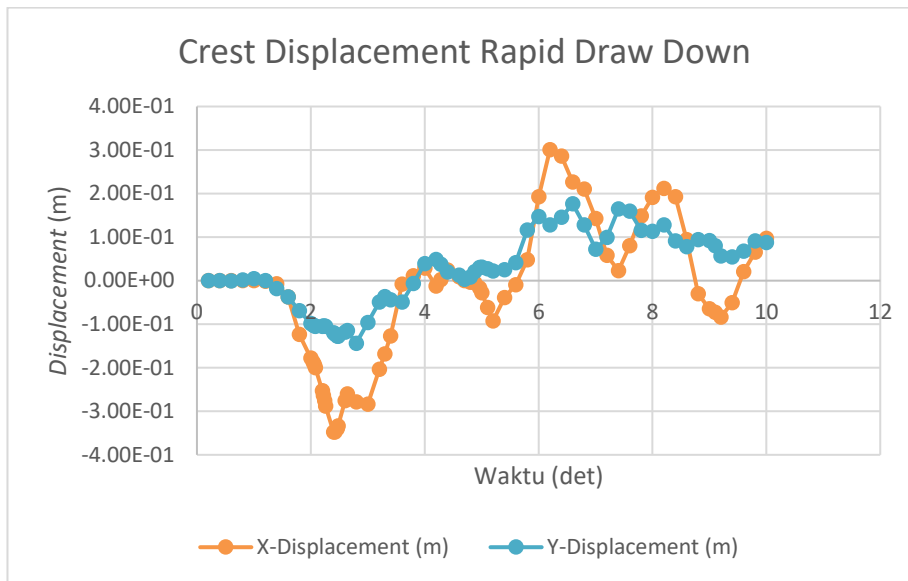
Hasil analisis dinamik lereng bendungan ditampilkan dalam nilai *displacement* pada puncak bendungan tampak seperti pada Tabel 5.28.

Tabel 5.28 Hasil Analisis Dinamik Lereng Bendungan Way - Apu

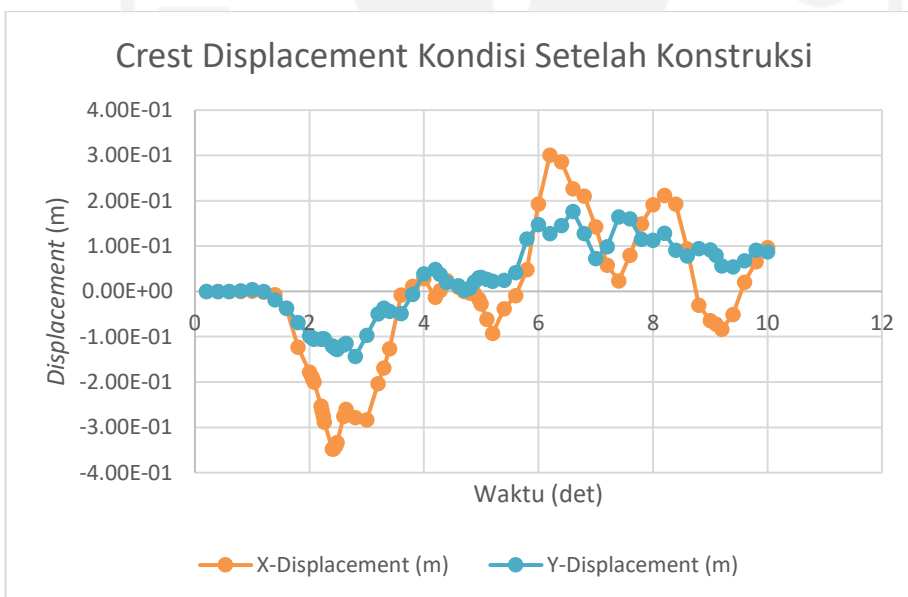
Kondisi Analisis	X-displacement (m)	Y-displacement (m)	Keterangan
Masa selesai konstruksi	0,3008	0,1766	Aman
Kondisi air normal	0,3061	0,1770	Aman
Kondisi surut cepat	0,3008	0,1766	Aman



Gambar 5.79 Crest Displacement Kondisi Air Normal



Gambar 5.80 Crest Displacement Kondisi Rapid Drowdown



Gambar 5.81 Crest Displacement Kondisi Setelah Konstruksi

5.2.7 Perhitungan Displacement dengan QUAKE-W

Untuk memperoleh nilai faktor keamanan lereng bendungan dengan analisis dinamik, hasil dari QUAKE/W pada analisis sebelumnya dijadikan sebagai input dalam analisis SLOPE/W dengan tipe QUAKE/W Stress. Hasil

perhitungan faktor keamanan untuk beban gempa dinamik ditampilkan dalam Tabel 5.29 berikut ini.

Tabel 5.29 Hasil Perhitungan Faktor Keamanan untuk Beban Gempa Dinamik

No.	Kondisi	FK minimum	FK Hulu	FK Hilir	Keterangan
1	Setelah masa konstruksi	1,0	5,377	1,16	Aman
2	Aliran <i>steady-state</i>	1,0	1,326	1,057	Aman
3	<i>Rapid drawdown</i>	1,0	1,491	1,065	Aman

Dari perhitungan *displacement* maupun *slope stability* dengan beban gempa dinamik, Bendungan Way - Apu memenuhi persyaratan angka faktor keamanan, baik untuk analisis *displacement* dengan *QUAKE/W* maupun analisis *SLOPE/W* dengan *QUAKE/W Stress*.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dengan melakukan evaluasi faktor keamanan Bendungan Way - Apu dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan simulasi analisis PSHA yang dilakukan, lokasi dibangunnya Bendungan Way - Apu memiliki potensi bahaya gempa yang dikategorikan dalam klasifikasi kelas risiko IV (ekstrem) dengan nilai tingkat risiko sebesar 34 point.
2. Berdasarkan hasil simulasi analisis kestabilan lereng bendungan statik dengan kondisi tanpa gempa dan gempa OBE, bendungan Way - Apu memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu. Namun, pada kondisi gempa MDE, analisis kestabilan lereng bendungan statik dengan kondisi gempa MDE, bendungan Way - Apu tidak memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu. Sesuai dengan Pd T-14-2004-A, pada kondisi yang tidak memenuhi angka keamanan perlu dilakukan analisis dinamik untuk menghitung deformasi yang terjadi pada saat keadaan gempa.
3. Berdasarkan hasil simulasi analisis kestabilan lereng bendungan dinamik, bendungan Way - Apu memenuhi kriteria angka keamanan, baik pada sisi hilir maupun hulu dalam kondisi setelah masa konstruksi, aliran *steady-state* dan *rapid drawdown*.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang telah dipaparkan diatas maka dapat disarankan beberapa hal sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan analisis stabilitas dengan menggunakan data pembacaan piezometer di lapangan jika bendungan sudah selesai dibangun.

2. Pada penelitian ini perhitungan dilakukan dengan menggunakan *software* simulasi, alangkah baiknya apabila pada penelitian selanjutnya dilakukan perbandingan hasil antara perhitungan secara manual dan perhitungan menggunakan *software* simulasi.



DAFTAR PUSTAKA

- ANSS. Katalog Gempa. (<https://www.ncedc.org/anss/catalog-search.html>. Diakses Agustus 2022).
- Arabasz W. J. dan Robinson R. 1976 *Microseismicity and Geologic Structure In The Northern South Island, New Zealand*. New Zealand Journal of Geology and Geophysics. New Zealand.
- Asrurifak M., Irsyam M., Budiono B., Triyoso W., and Anita Firmanti A., Indonesia Spectral Hazard Map at Ground Surface for Earthquake Resistance Building Design, The 5th Kyoto University Southeast Asia Forum, Conference of Earth and Space Science, Bandung 7-8 January 2010.
- Aulawi N. 2018. Analisis Stabilitas Statik dan Respon Dinamik Terhadap Displacement Selama Gempa Pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak. Universitas Sebelas Meret. Surakarta.
- Badan Standarisasi Nasional, 2016. SNI 8064:2016. *Metode Analisis Stabilitas Lereng Statik Bendungan Tipe Urugan*. BSN. Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional, 2002. *Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Tipe Urugan*. BSN. Jakarta
- Bowles, J. E., 1978, *Engineering Properties of Soils and Their Movement, 2nd edition*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Christady Hardiyatmo, Hary. 2007a. *Mekanika Tanah 1* Edisi Keempat. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Christady Hardiyatmo, Hary. 2007b. *Mekanika Tanah 2* Edisi Keempat. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Cornell, C.A. 1968. *Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 58, pp. 1583-1606.
- Das, Braja M. 1983. *Advanced Soil Mechanics*. Washington, New York, London: Hemisphere Publishing Corporation.
- Das, Braja M, dkk. 1993. *Mekanika Tanah Jilid 1* (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik), Jakarta: Erlangga.
- Das, Braja M, dkk. 1994. *Mekanika Tanah Jilid 2* (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik), Jakarta: Erlangga.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah 2004. Pd-T 14-2004-A. *Analisis*

- Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Kementerian PUPR. Jakarta.
- Dewi R.K. 2018. *Analisis Stabilitas Statik dan Stabilitas Dinamik Menggunakan Parameter Safety Evaluation Earthquake (SEE) Pada Bendungan Urugan Zonal Inti Tegak*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Edwina, D., & S. Novita. 2008. *Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Seismik Kota Padang Panjang menggunakan Metode Kanai*. Jurnal Teknik Sipil Universitas Andalas, Vol. 2, No. 29, ISSN: 0854-8471.
- Gardner, J. K., & Knopoff, L. 1974. *Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian?*. Bulletin of Seismological Society of America., 64, 1363-1367.
- Gutenberg, B., dan Richter, C.F. 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton University Press, Princeton.
- Hartono W.A. 2018. *Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Zonal Inti Miring Dengan Metode Statik dan Dinamik Riwayat Waktu*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Ibrahim M.A. 2017. *Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Tipe Urugan Zonal Inti Tegak dengan Perkuatan Timbunan terhadap Beban Gempa*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Ibrahim, G. & Subardjo. 2005. *Pengetahuan Seismologi*. Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika. Jakarta.
- ISC. Katalog Gempa. (<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>. Diakses Agustus 2022).
- Kanamori H. 1977. *Energy-Release In Great Earthquakes*. Journal of Geophysical Research. (<https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>. Diakses September 2022)
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Pangular, D., 1985, *Petunjuk Penyelidikan & Penanggulangan Gerakan Tanah, Pusat Penelitian dan Pengembangan Pengairan*. Balitbang Departemen Pekerjaan Umum.
- Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. N.p: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum.
- Puslitbang Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum. 2014. *Analisa*

Dinamik Bangunan Air.

Richart, F., Hall, J., & Woods, R. 1970. *Vibrations of Soils and Foundations*.
Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc.

Seed, H.B., Lee, K.L. and Idriss, I.M. 1969. *Analysis of Sheffield Dam Failure*.
Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 95, 1453-1490.

Sosrodarsono, Suyono dan Takeda Kensaku. 1977. *Bendungan Tipe Urugan
Cetakan Keempat*. Pradnya Paramita. Jakarta

USGS. Katalog Gempa. (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Diakses
Agustus 2022).





Lampiran 1 Cuplikan Katalog Gempa

Your search parameters are:

catalog=ANSS
 start_time=1900/01/01,00:00:00
 end_time=2021/12/31,23:59:59
 minimum_latitude=-8.057896305
 maximum_latitude=0.951112705
 minimum_longitude=122.3312896
 maximum_longitude=131.3402986
 minimum_magnitude=4
 maximum_magnitude=9
 minimum_depth=0
 maximum_depth=300
 event_type=e

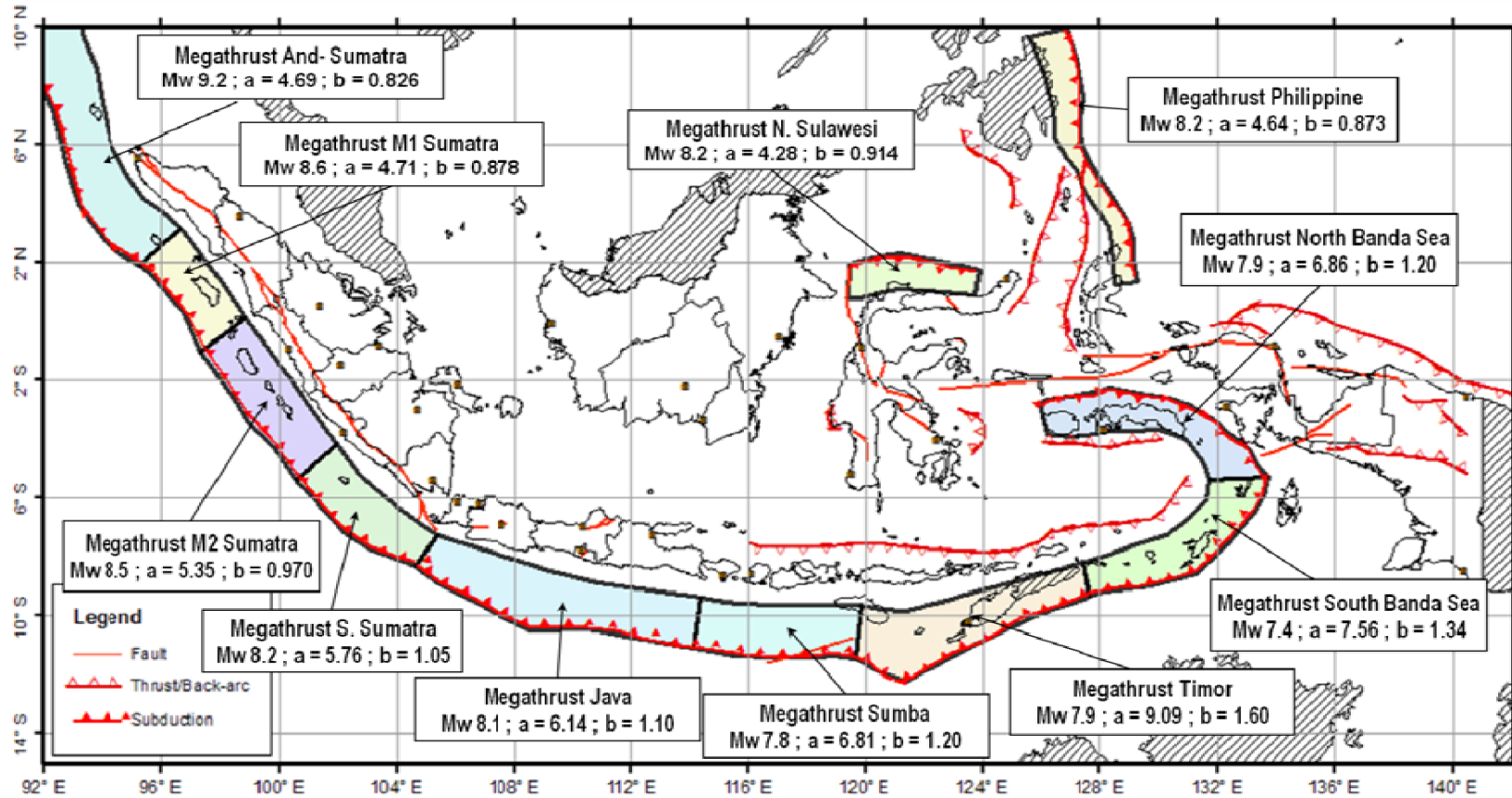
Mb	8397	Mb	10325
Me	14	Me	16
ML	4	ML	4
Ms	19	Ms	36
Mw	496	Mw	636
Unk	0		11017
	8930		
lat	lon		
-3.55339	126.8358		

Date Time	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Magnitude Type	NbStations	Mw	round Mw	Distance	RMS	Source	EventID	Year	Month	Day	Hour	Min	Sec
35:34.0	0.905	122.375	105	5.5	Mb	56	5.9505	5.95	700.06	0	NEI	1.98E+11	1976	4	9	11	35	34
03:15.4	0.899	122.41	67	5.1	Mb	41	5.68954	5.69	696.84	0	NEI	1.98E+11	1975	4	14	13	3	15
04:49.4	0.943	122.461	38	5.4	Mb	48	5.88184	5.88	696.35	0	NEI	1.98E+11	1975	3	15	16	4	49
02:51.2	-7.99	131.271	90.9	4.2	Mb	9	5.23576	5.24	696.34	0.9	NEI	1.99E+11	1992	2	9	9	2	51
21:33.8	-7.896	122.355	250	5.1	Mb	23	5.68954	5.69	692.62	0.97	NEI	2E+11	1996	9	3	9	21	34
30:52.1	0.765	122.339	33	4.4	Mb	15	5.32064	5.32	692.04	0.89	NEI	2E+11	2003	11	26	17	30	52
55:43.2	-7.999	122.477	35	4.6	Mb	16	5.41464	5.41	691.08	1.1	NEI	2.00707E+11	2007	7	5	0	55	43
27:20.8	-7.862	131.324	33	4	Mb	6	5.16	5.16	690.6	0.57	NEI	1.99709E+11	1997	9	21	17	27	21
34:52.9	-8.019	122.511	186.2	4.9	Mb	22	5.57274	5.57	690.04	0.6	NEI	1.99503E+11	1995	3	19	0	34	53

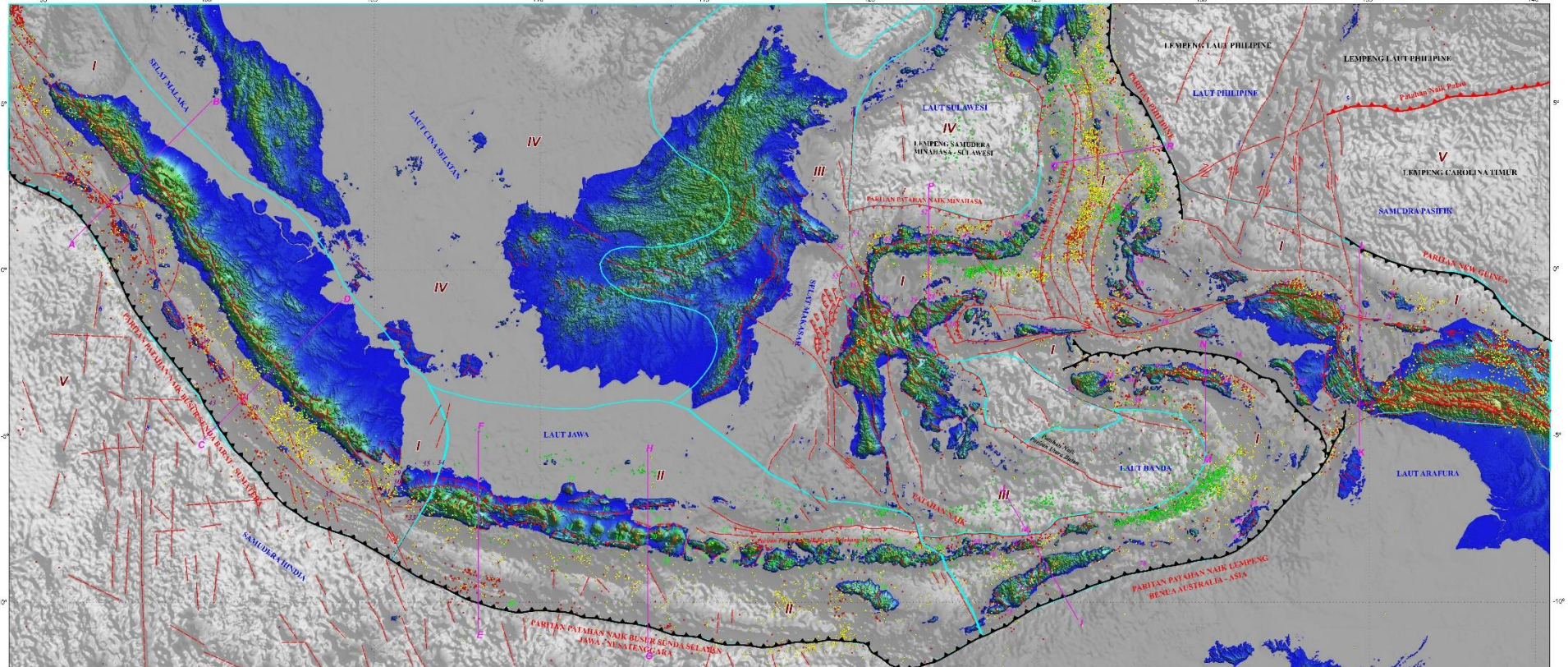
Date Time	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Mag Type	NbStations	Mw	round Mw	Distance	RMS	Source	EventID	Year	Month	Day	Hour	Min	Sec
04:13.6	0.841	122.46	59	5.4	Mb	66	5.88184	5.88	688.36	0	NEI	1.9781E+11	1978	10	12	7	4	14
51:04.8	-8.048	122.591	250	4.7	Mb	15	5.46506	5.47	686.23	1.23	NEI	1.99701E+11	1997	1	13	6	51	5
39:23.2	0.916	122.652	80.9	4.9	Mb	30	5.57274	5.57	679.55	0.9	NEI	2.00012E+11	2000	12	22	19	39	23
33:22.7	-7.738	122.37	279	5.5	Mb	40	5.9505	5.95	679.32	0	NEI	1.97503E+11	1975	3	14	19	33	23
36:54.8	0.599	122.35	74.9	5.9	Mw	159	5.9	5.9	678.51	1.1	NEI	2.00312E+11	2003	12	28	5	36	55
07:14.3	0.838	122.6	51	5.5	Mb	109	5.9505	5.95	677.25	0	NEI	1.97603E+11	1976	3	6	11	7	14
05:54.3	-7.868	122.524	150	4.7	Mb	26	5.46506	5.47	677.08	0.99	NEI	1.99512E+11	1995	12	6	1	5	54
14:36.6	-7.922	122.604	281.1	5.2	Mb	14	5.75136	5.75	675.12	1.14	NEI	1.98603E+11	1986	3	23	14	14	37
22:10.4	0.724	122.516	33	4.5	Mb	23	5.3665	5.37	674.79	0.93	NEI	1.99309E+11	1993	9	12	19	22	10
53:56.3	-7.824	122.523	283	5	Mb	45	5.63	5.63	673.71	0	NEI	1.97707E+11	1977	7	21	8	53	56
58:42.6	0.775	122.583	64	5.5	Mb	64	5.9505	5.95	673.55	0	NEI	1.97503E+11	1975	3	17	18	58	43
11:48.3	0.566	122.389	73.3	4.6	Mb	10	5.41464	5.41	672.84	1.05	NEI	2.00604E+11	2006	4	30	6	11	48
14:27.7	-7.949	130.988	36.6	4.2	Mb	19	5.23576	5.24	671.18	0.76	NEI	2.0101E+11	2010	10	24	3	14	28
45:46.6	-7.734	122.468	262.2	4.9	Mb	98	5.57274	5.57	671.12	1.1	NEI	2.0101E+11	2010	10	30	17	45	47
53:56.6	-8.046	122.796	221.2	5	Mb	36	5.63	5.63	670.64	1.16	NEI	1.98601E+11	1986	1	1	17	53	57
19:10.7	-7.914	131.014	74	4.5	Mb	6	5.3665	5.37	670.35	1.28	NEI	1.99202E+11	1992	2	23	15	19	11
18:35.6	0.769	122.621	70	6.1	Mb	194	6.41034	6.41	670.13	0	NEI	1.97505E+11	1975	5	27	10	18	36
13:45.6	-8.014	122.768	194.8	4.4	Mb	10	5.32064	5.32	670.09	0.94	NEI	1.98412E+11	1984	12	15	1	13	46
22:12.4	-7.621	122.377	33	4.8	Mb	15	5.51776	5.52	669.93	0.68	NEI	1.9881E+11	1988	10	19	10	22	12
15:23.4	-7.927	122.683	250	4.2	Mb	9	5.23576	5.24	669.45	1.14	NEI	1.98706E+11	1987	6	22	1	15	23
29:30.2	-8.017	122.788	206.3	4.4	Mb	33	5.32064	5.32	668.85	0.74	NEI	2.01108E+11	2011	8	21	14	29	30
22:33.9	0.575	122.447	192	5.2	Mb	16	5.75136	5.75	668.82	0	NEI	1.97101E+11	1971	1	26	20	22	34
08:41.1	-7.839	131.066	81.9	5.1	Mb	14	5.68954	5.69	668.41	1.7	NEI	1.99101E+11	1991	1	13	8	8	41
48:49.9	0.468	122.354	119	4.5	Mb	8	5.3665	5.37	668.38	0	NEI	1.98101E+11	1981	1	12	1	48	50
58:29.1	-7.826	122.597	264.8	6.1	Mw	339	6.1	6.1	668.06	0.99	NEI	2.00601E+11	2006	1	15	11	58	29
29:26.7	0.483	122.389	153.3	5.1	Mb	46	5.68954	5.69	666.61	1.14	NEI	1.99006E+11	1990	6	24	5	29	27
12:33.4	0.544	122.452	93.4	4.1	Mb	7	5.19674	5.2	666.06	0.98	NEI	2.00711E+11	2007	11	14	5	12	33
46:09.2	-7.831	131.041	33	5.2	Mb	13	5.75136	5.75	665.83	0	NEI	1.97903E+11	1979	3	30	13	46	9
18:05.4	0.874	122.795	175.4	4.6	Mb	12	5.41464	5.41	665.35	0.97	NEI	1.99211E+11	1992	11	29	16	18	5
57:20.7	-7.891	122.699	182	5.1	Mb	48	5.68954	5.69	665.33	0.82	NEI	1.99903E+11	1999	3	18	23	57	21
55:43.2	-7.999	122.477	35	4.6	Mb	16	5.41464	5.41	691.08	1.1	NEI	2.00707E+11	2007	7	5	0	55	43
27:20.8	-7.862	131.324	33	4	Mb	6	5.16	5.16	690.6	0.57	NEI	1.99709E+11	1997	9	21	17	27	21
34:52.9	-8.019	122.511	186.2	4.9	Mb	22	5.57274	5.57	690.04	0.6	NEI	1.99503E+11	1995	3	19	0	34	53

الجامعة الإسلامية
الاستاذ الدكتور

Lampiran 1 Peta Sumber Patahan dan Megathrust

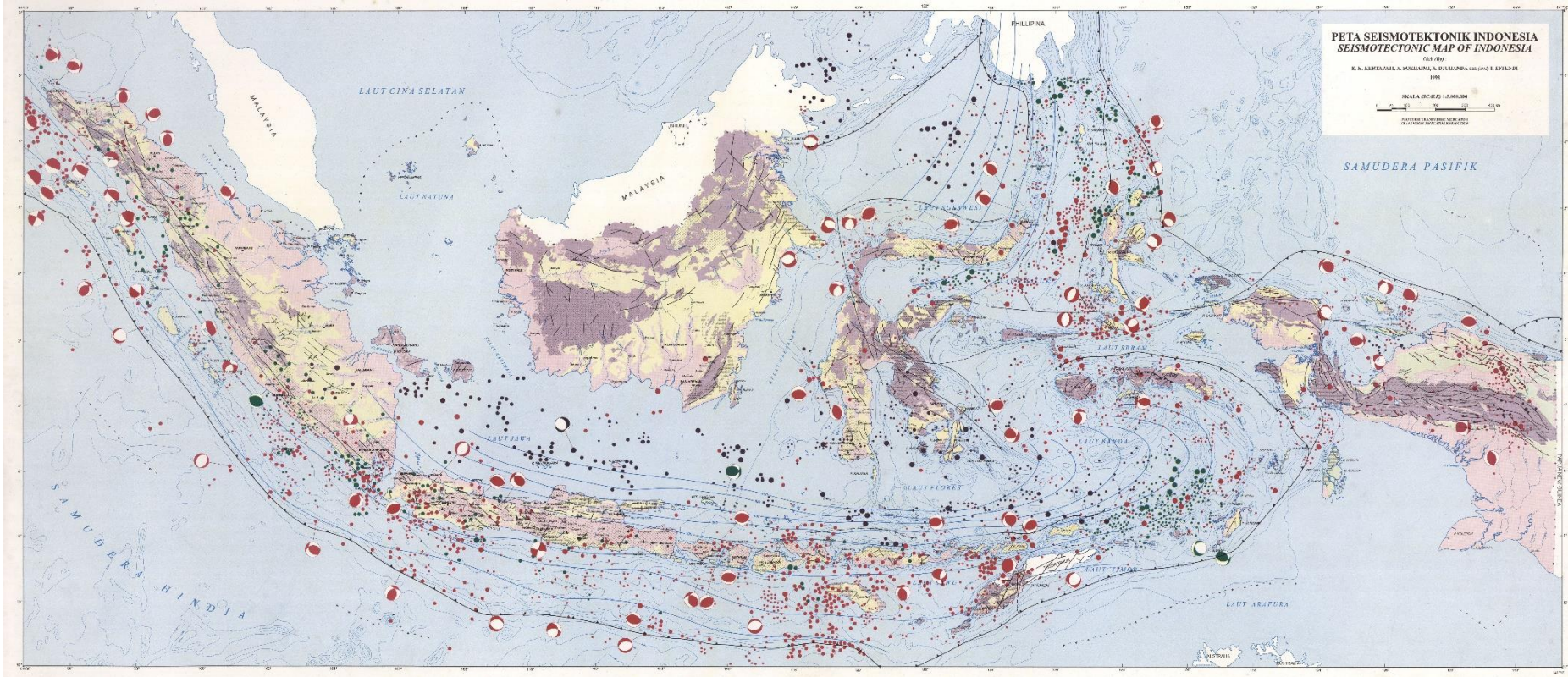


Gambar L1.1. Peta Megathrust Indonesia



Gambar L.1.2. Peta Patahan Aktif Indonesia

الجمهورية الإسلامية اندونيسية

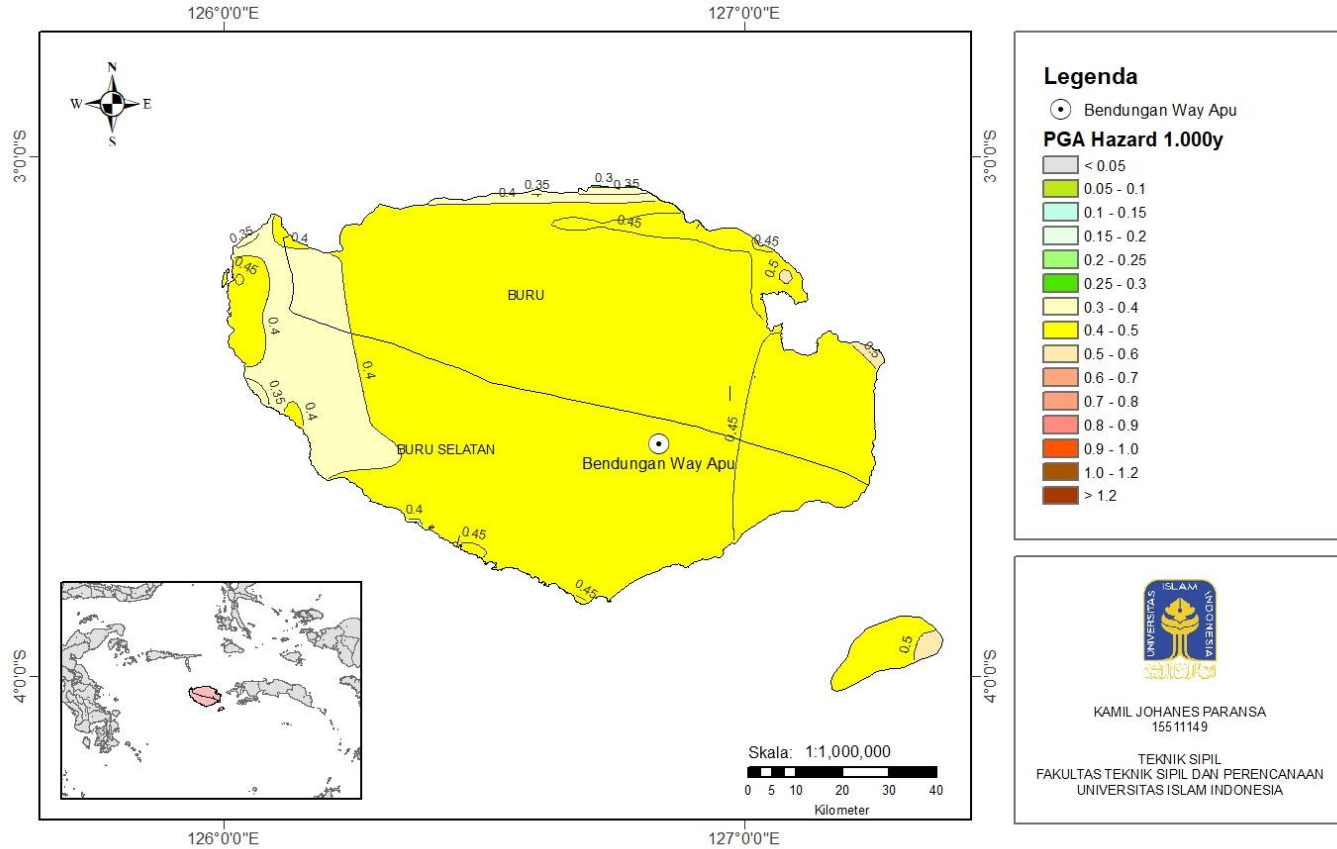


Gambar L.1.3. Peta Seismotektonik Indonesia

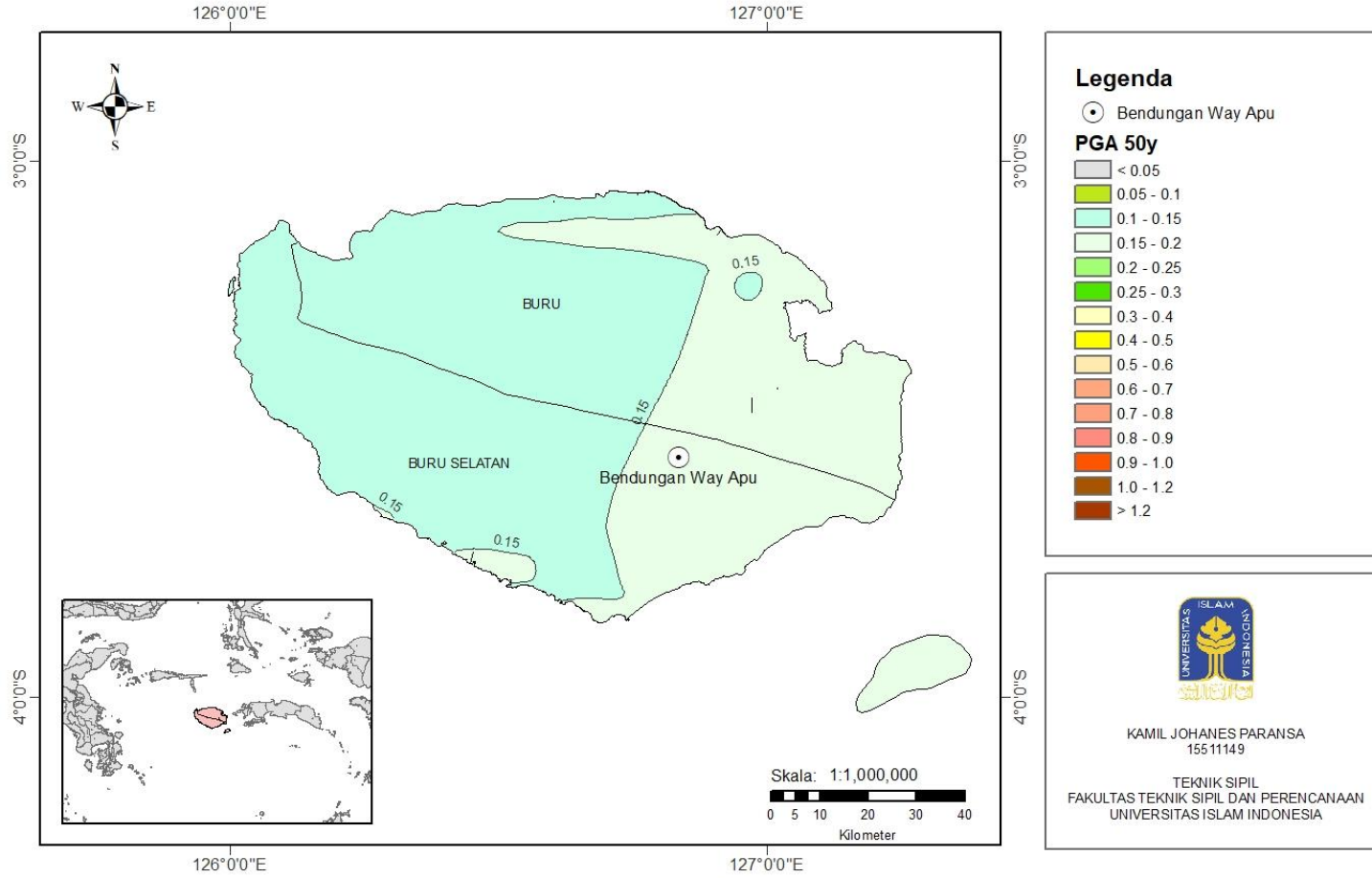
المعهد الإسلامي للدراسات والبحوث

Lampiran 2 Peta PGA dan Spectral Acceleration

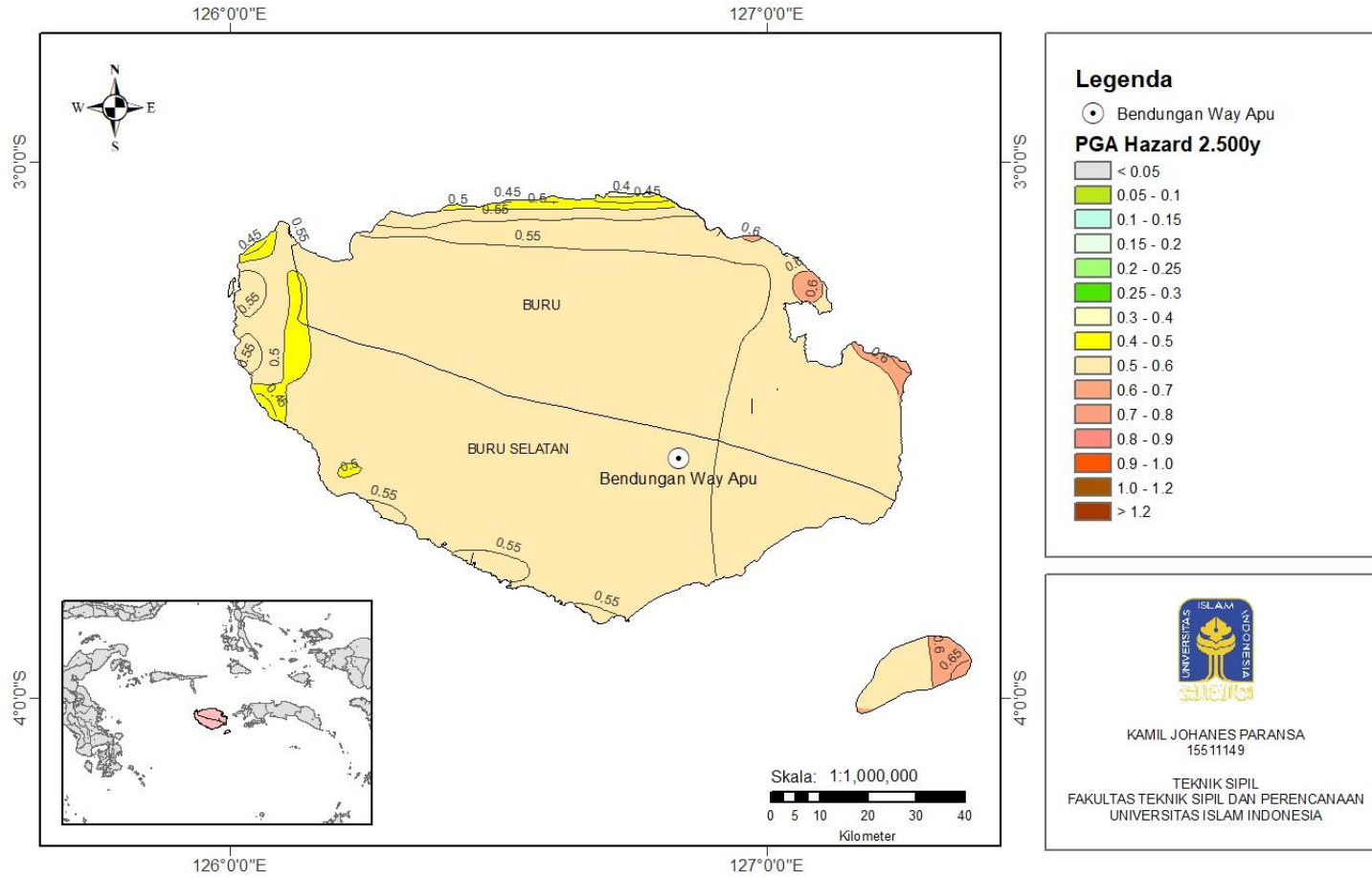
**PETA PERCEPATAN PUNCAK
PROBABILITAS TERLAMPAUI 7% DALAM 75 TAHUN**



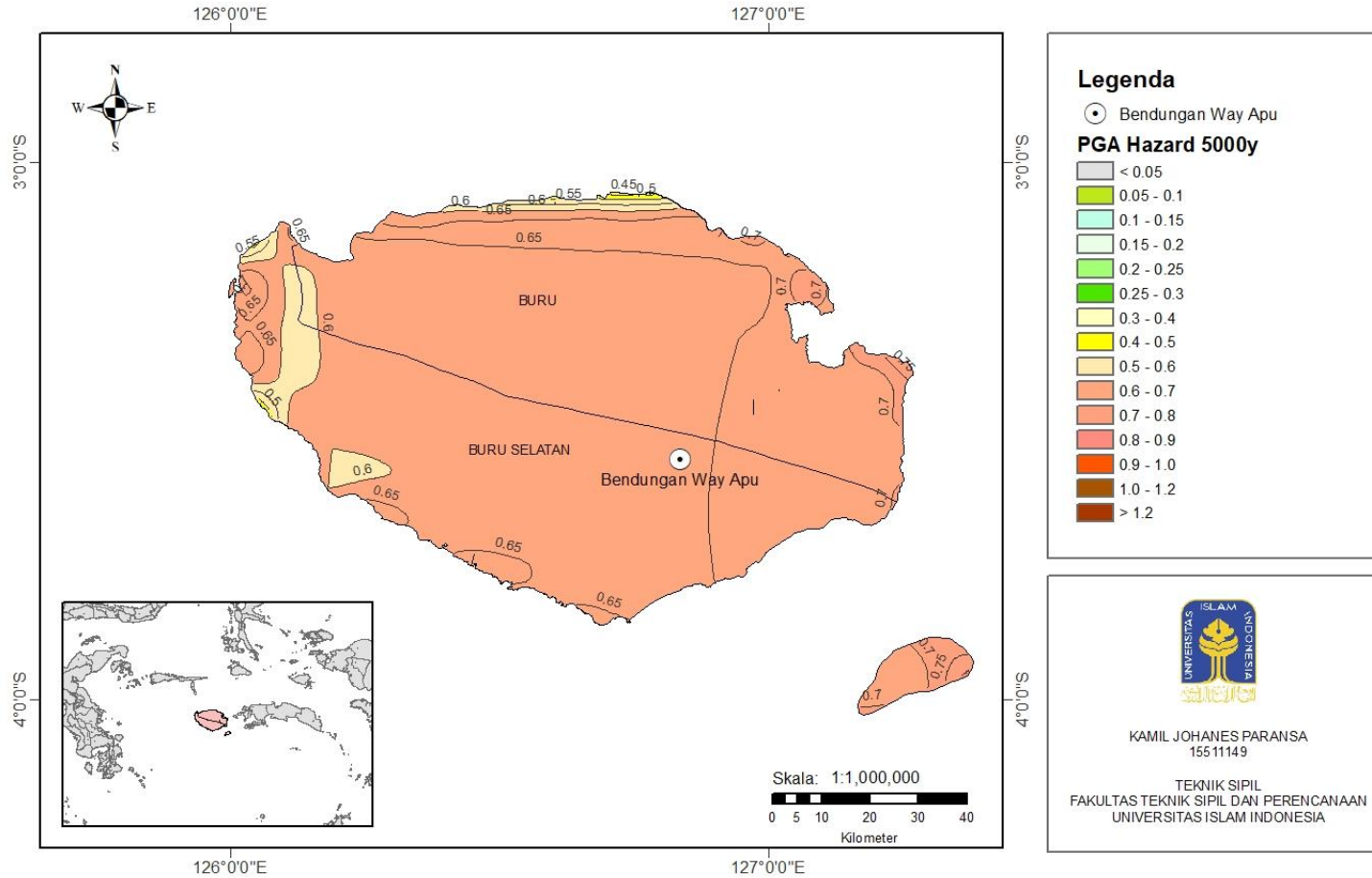
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 20% DALAM 10 TAHUN



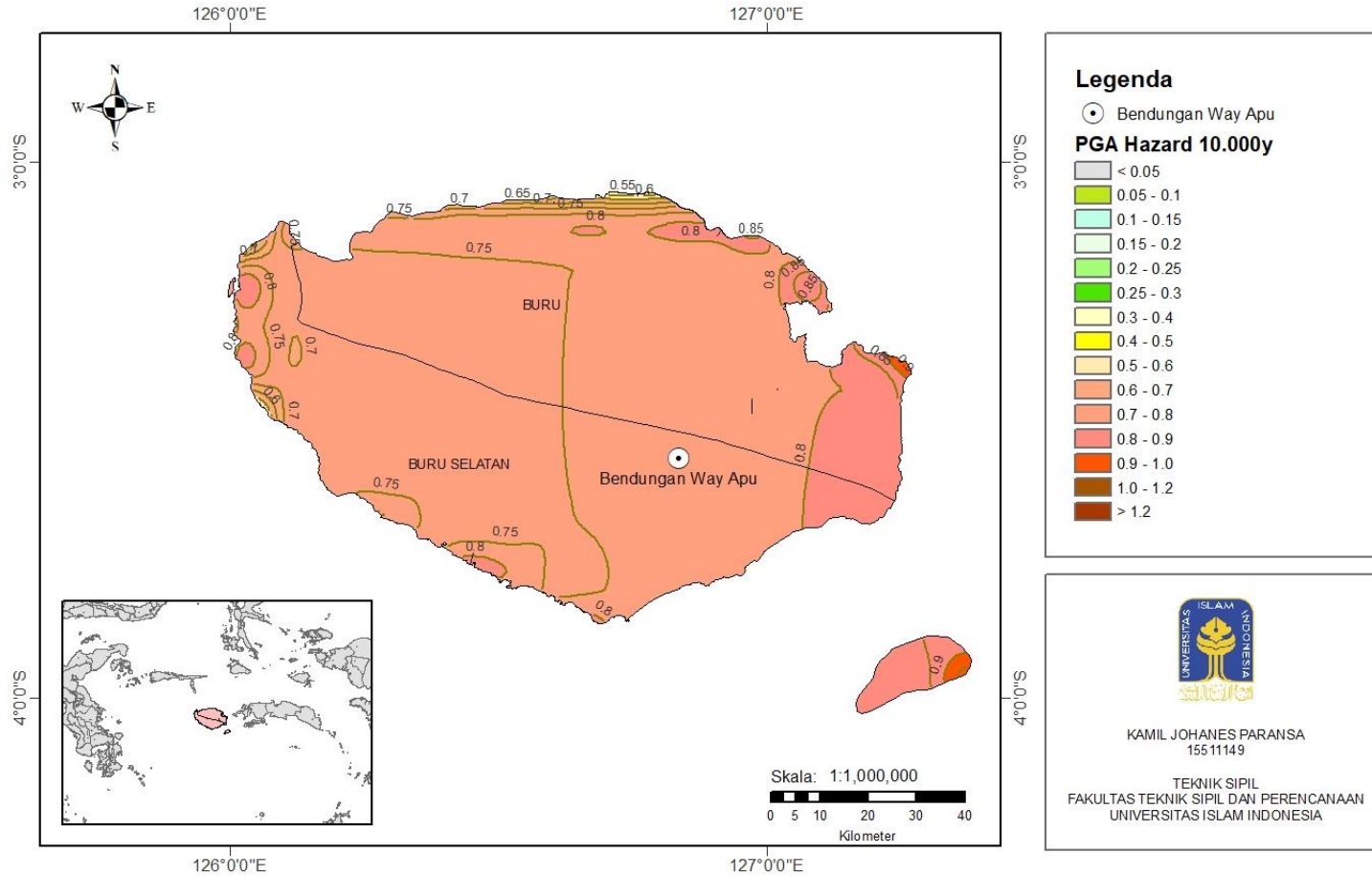
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 2% DALAM 50 TAHUN



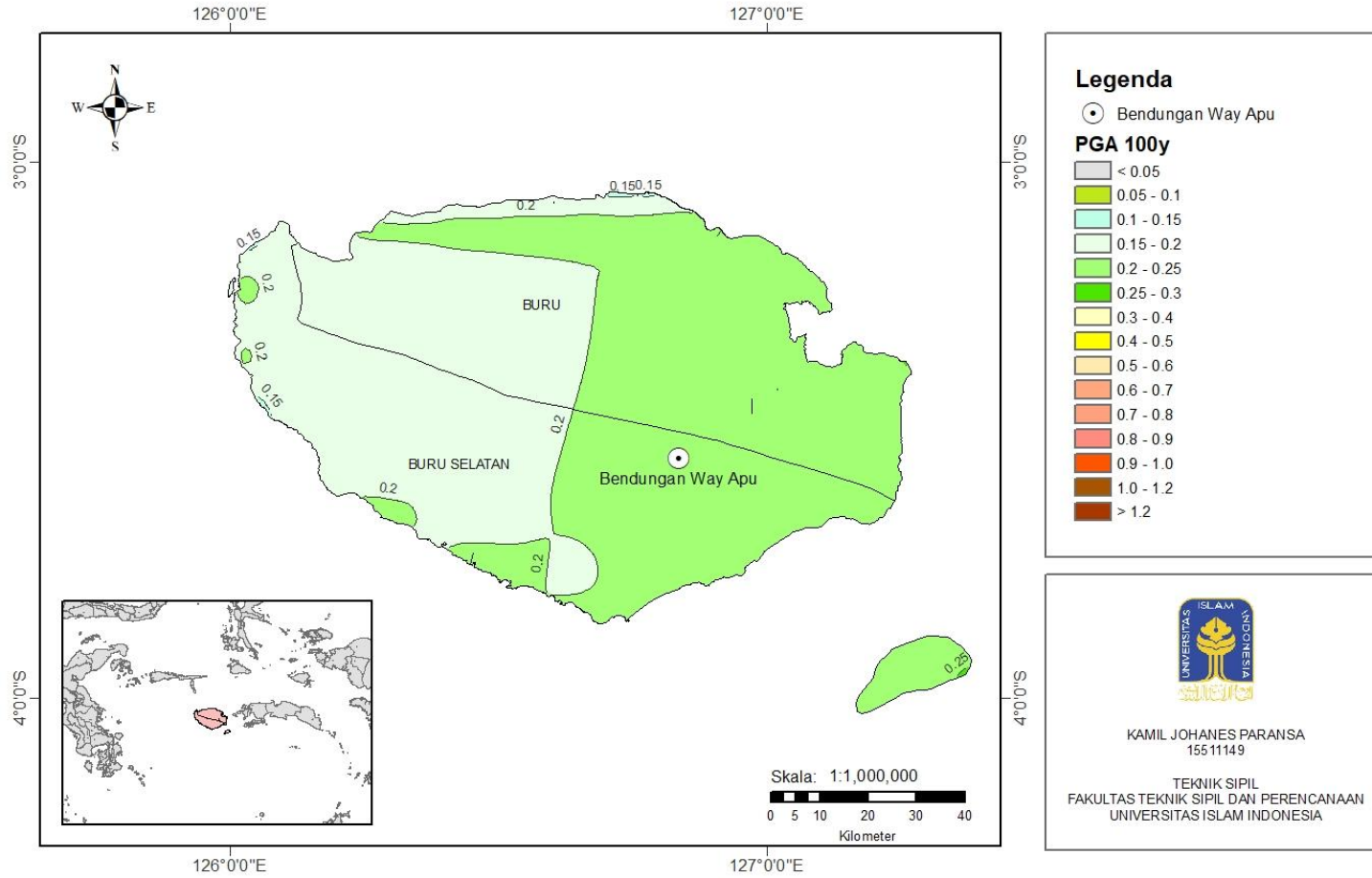
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 2% DALAM 100 TAHUN



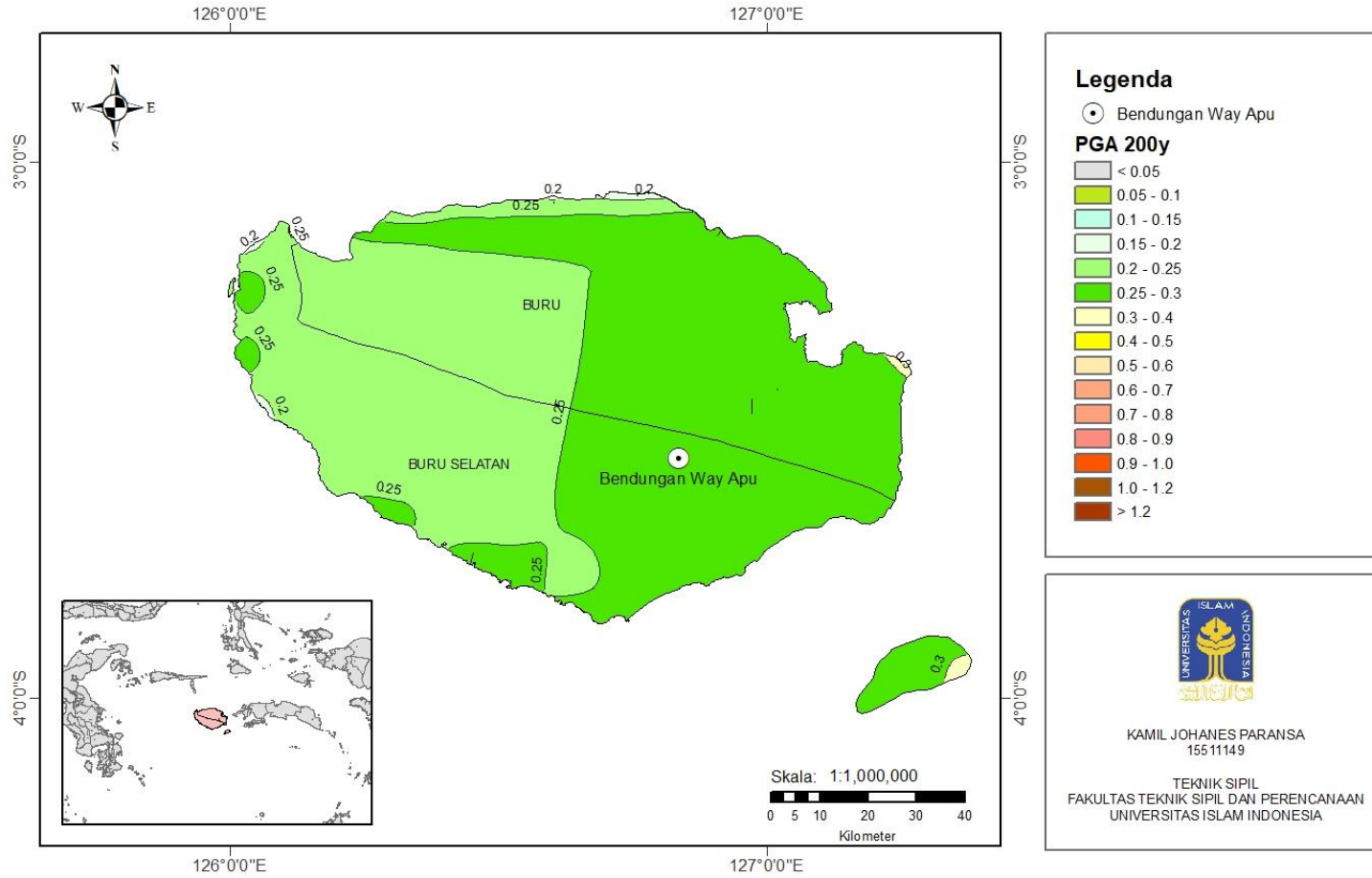
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 1% DALAM 100 TAHUN



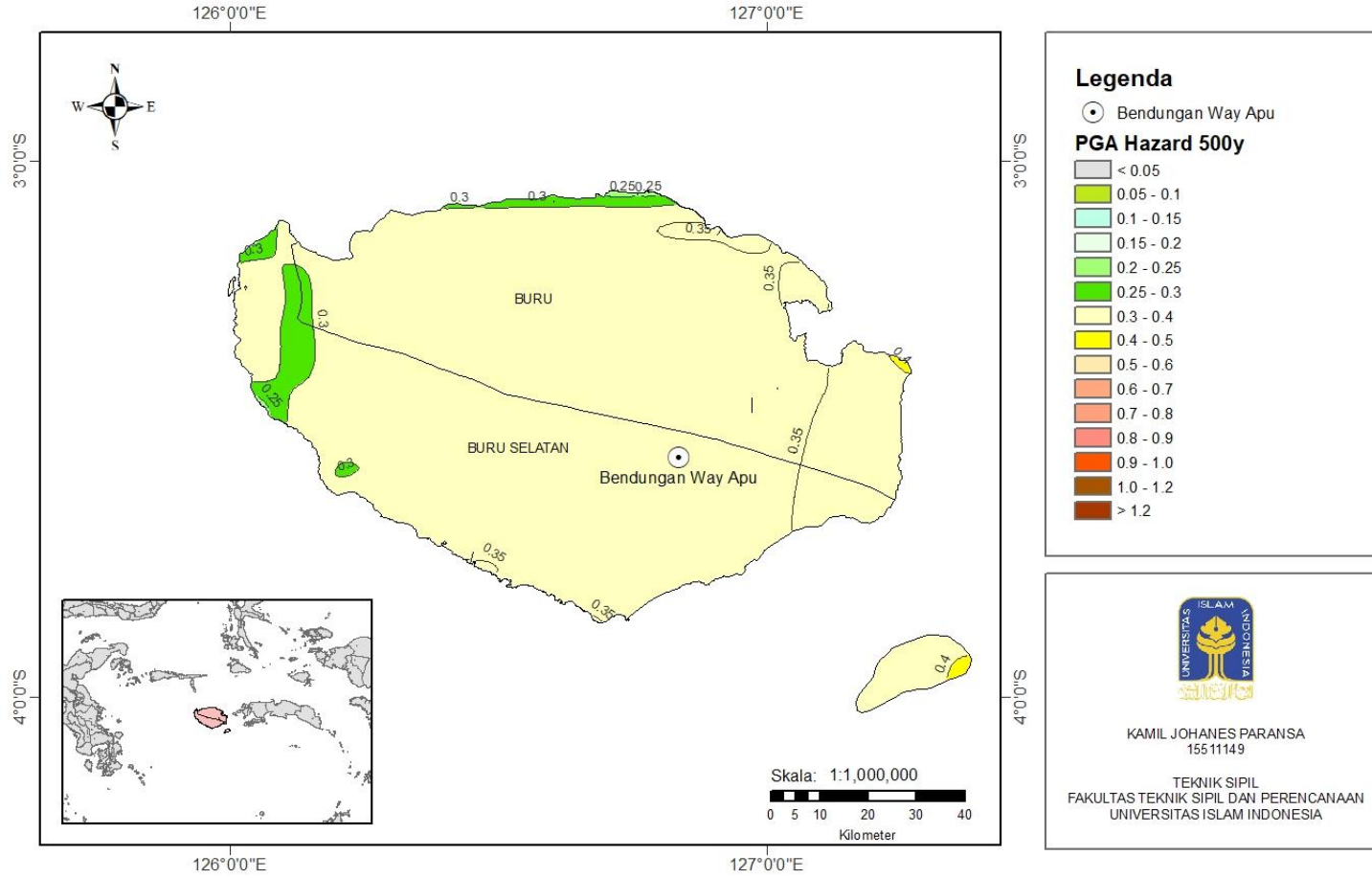
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 10% DALAM 10 TAHUN



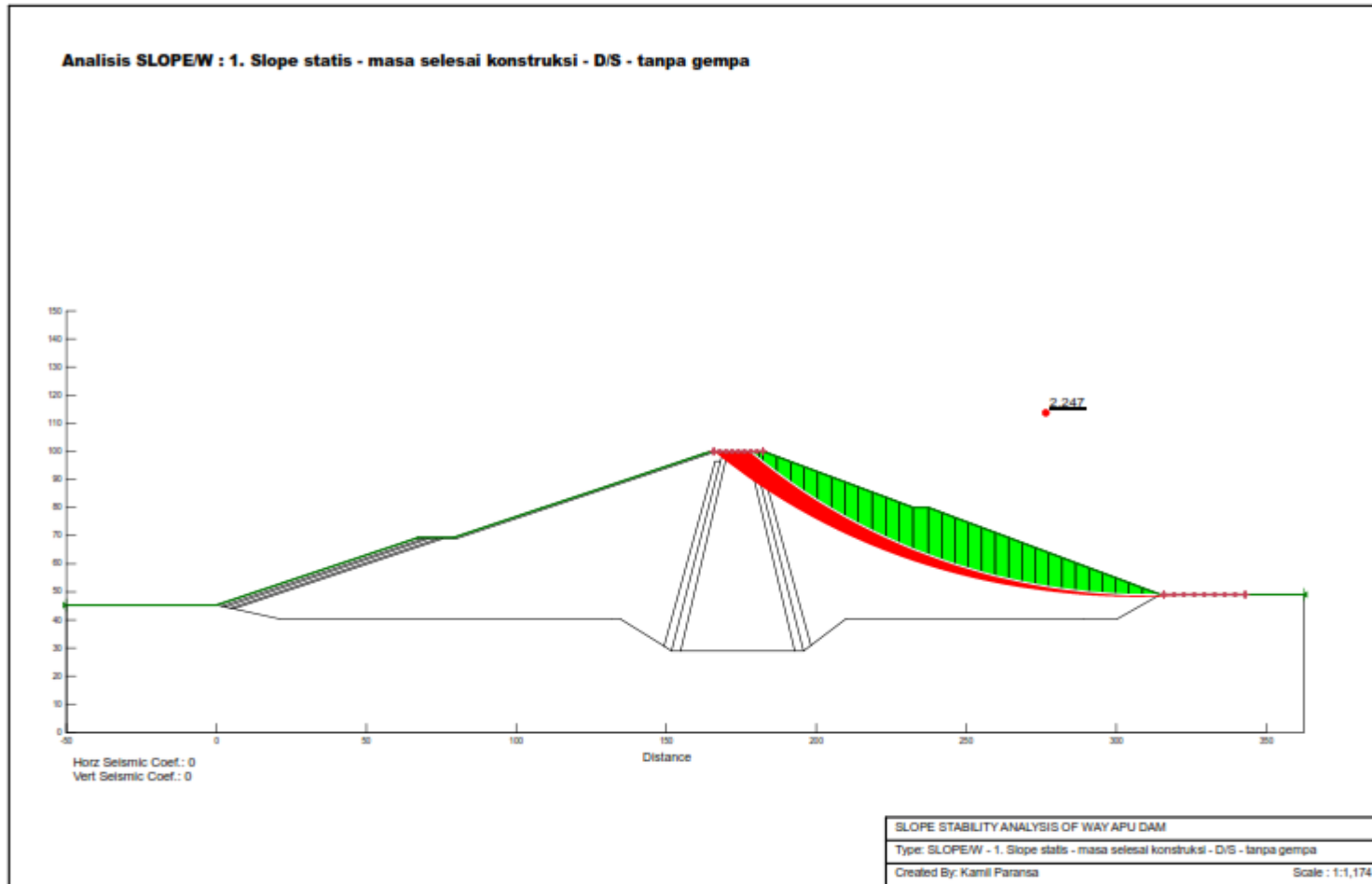
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 5% DALAM 10 TAHUN

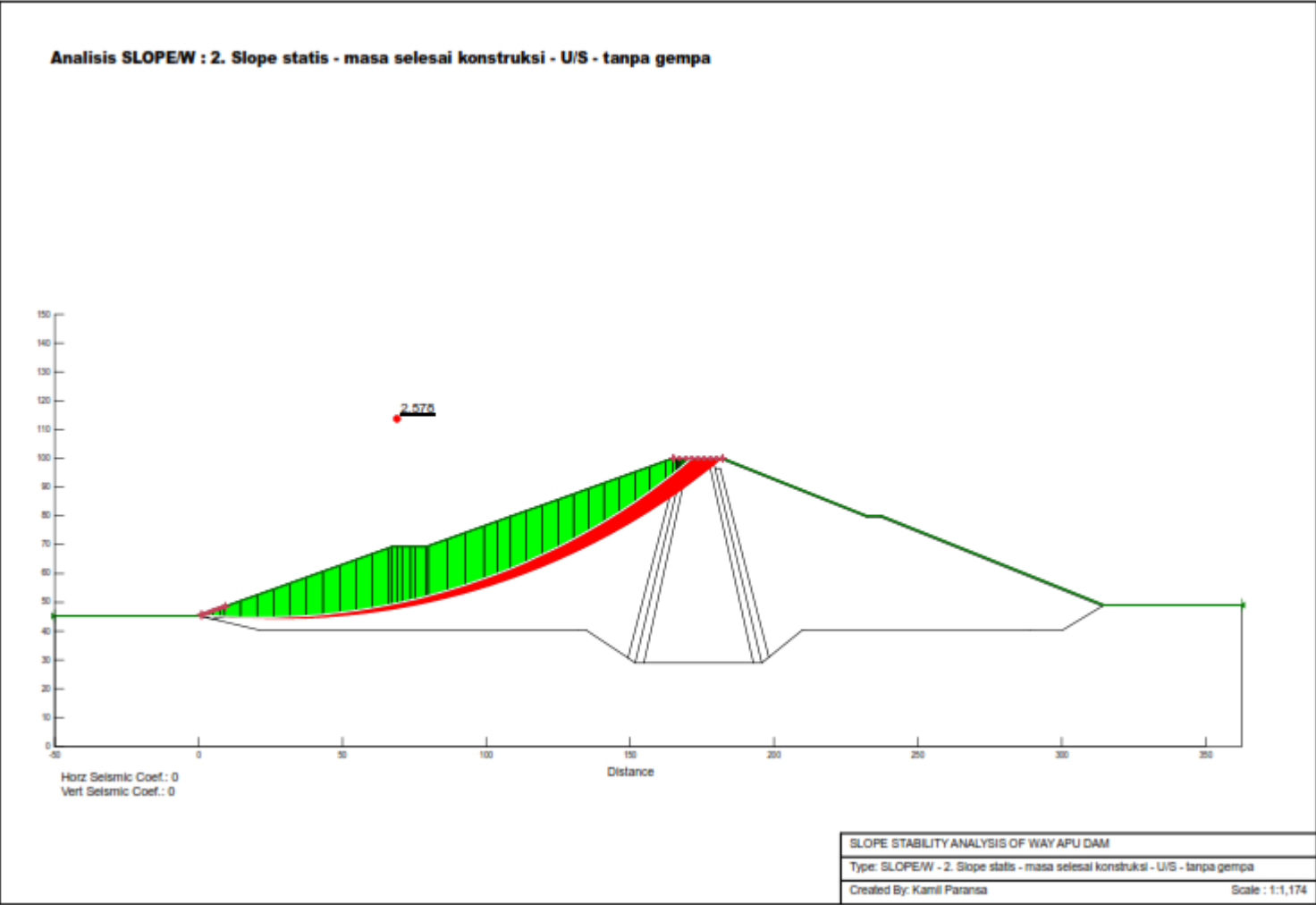


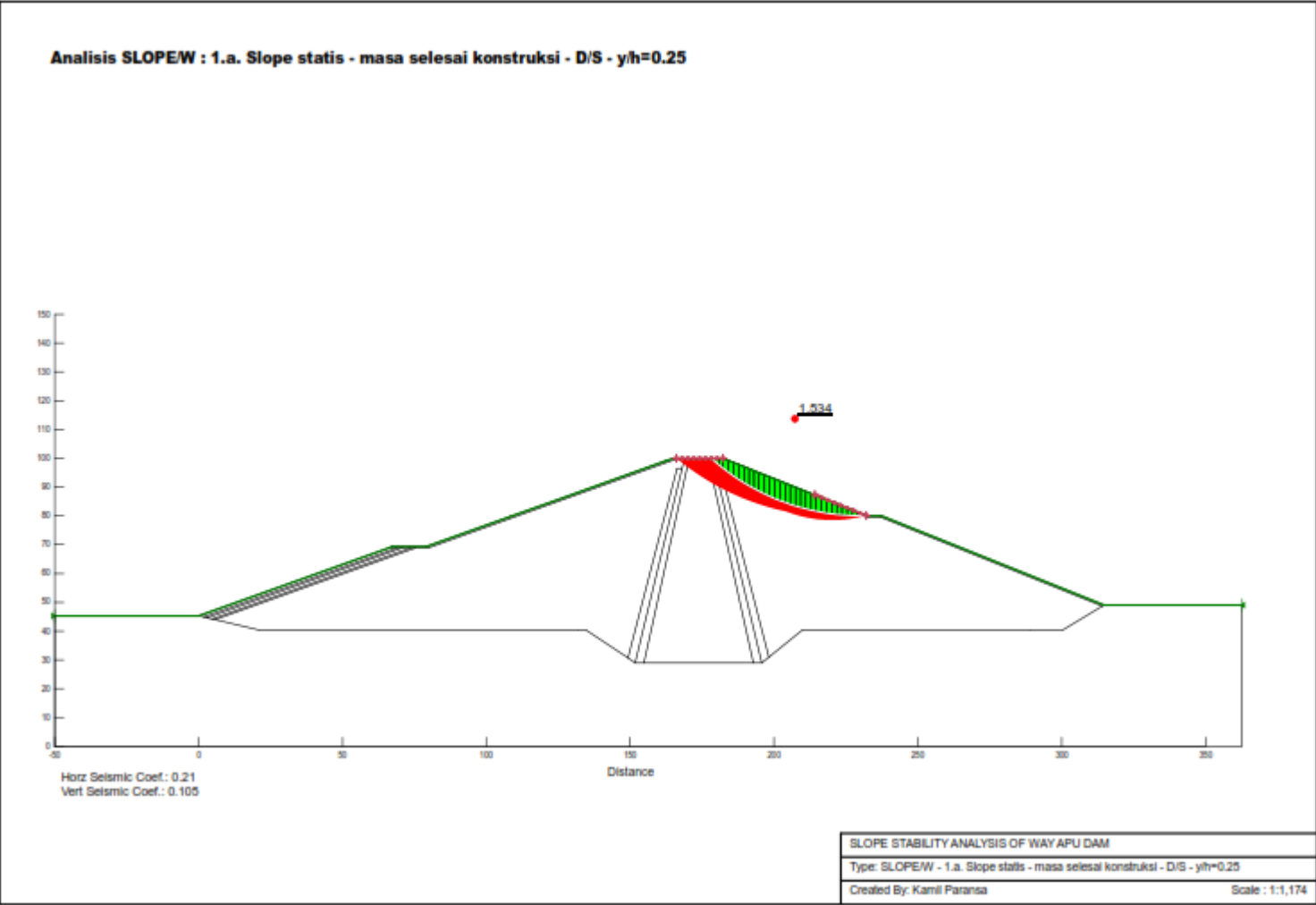
PETA PERCEPATAN PUNCAK PROBABILITAS TERLAMPAUI 10% DALAM 50 TAHUN



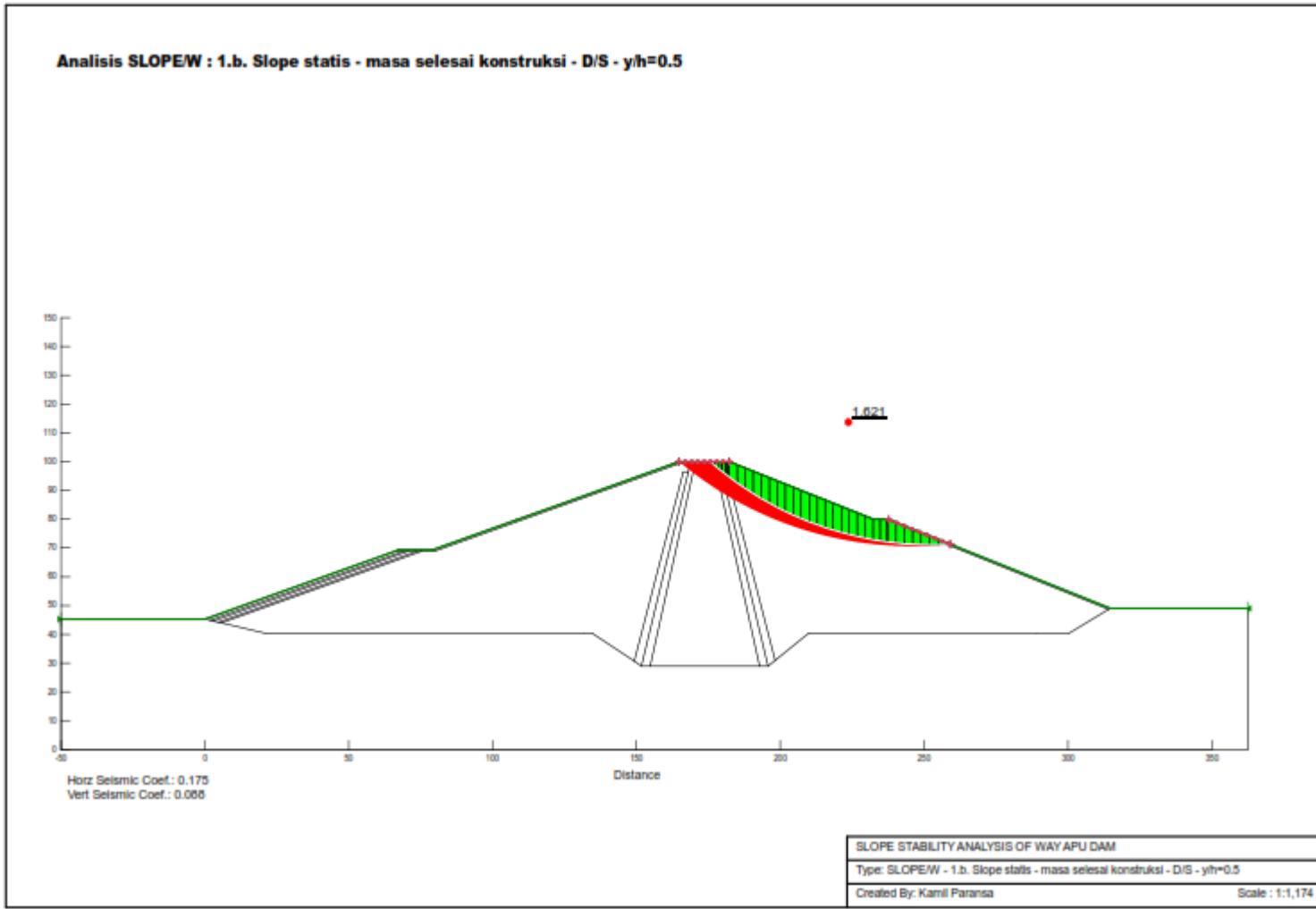
Lampiran 3 Hasil Analisis Statis dengan GeoStudio

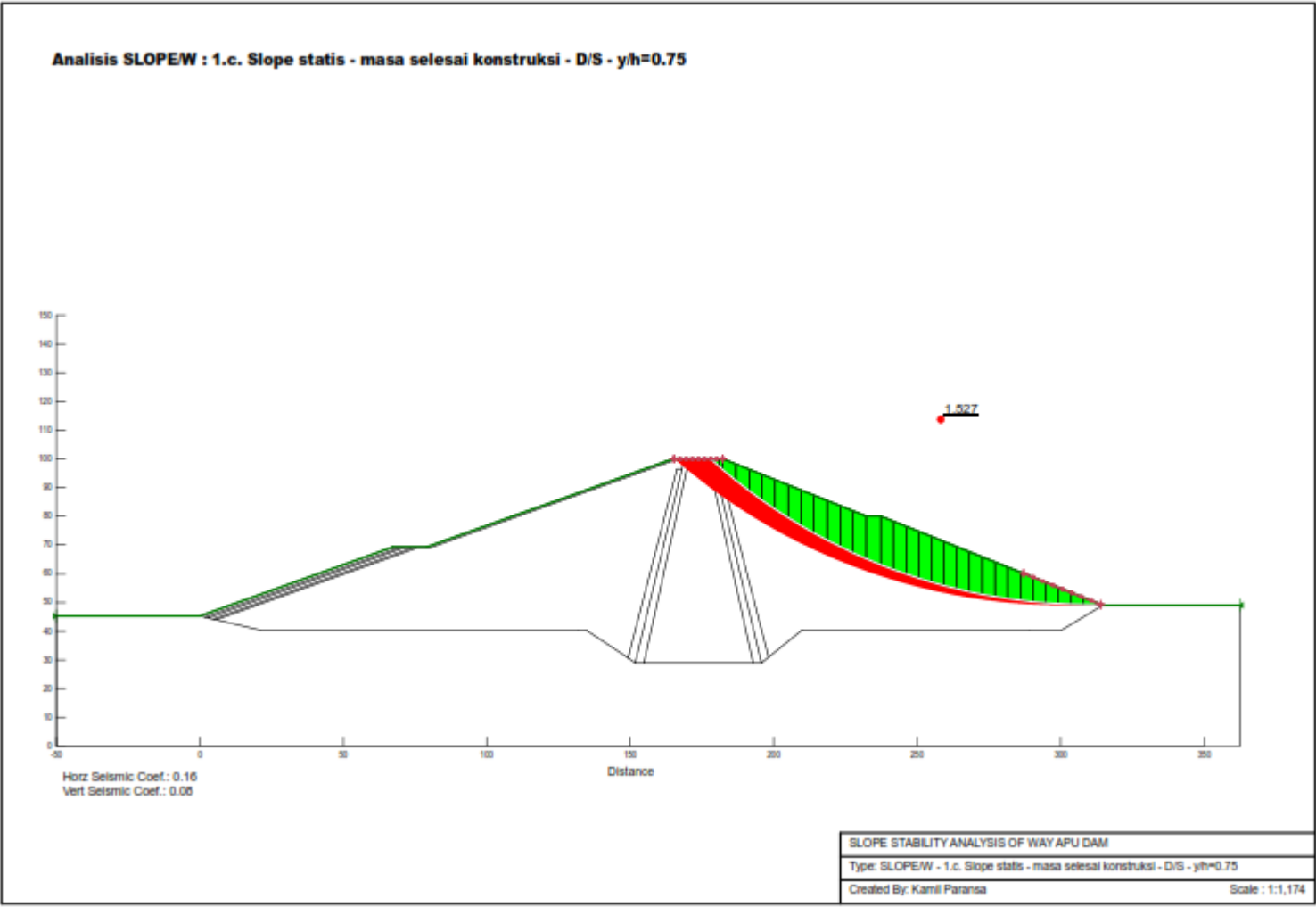




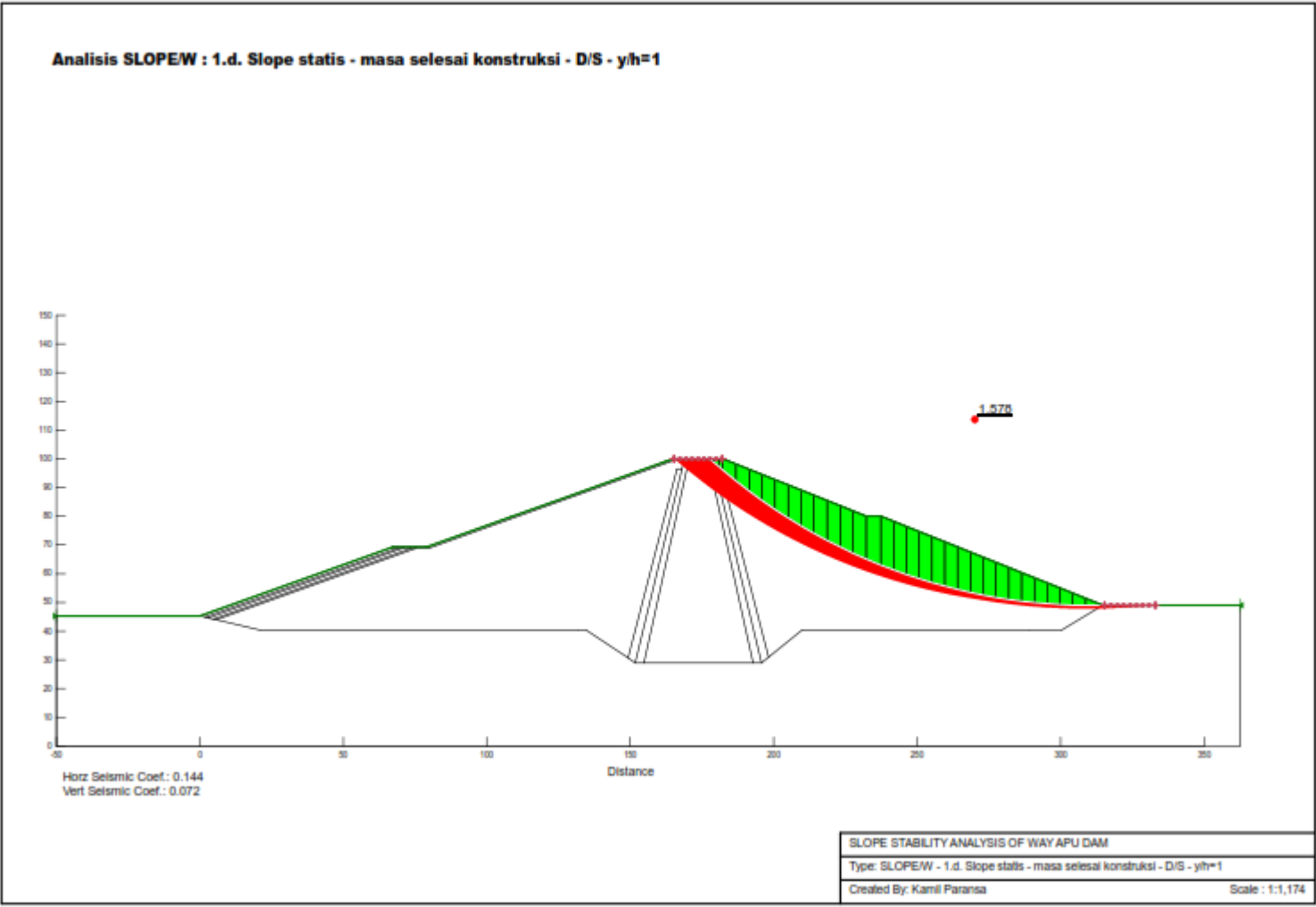


اجتازہ شدہ

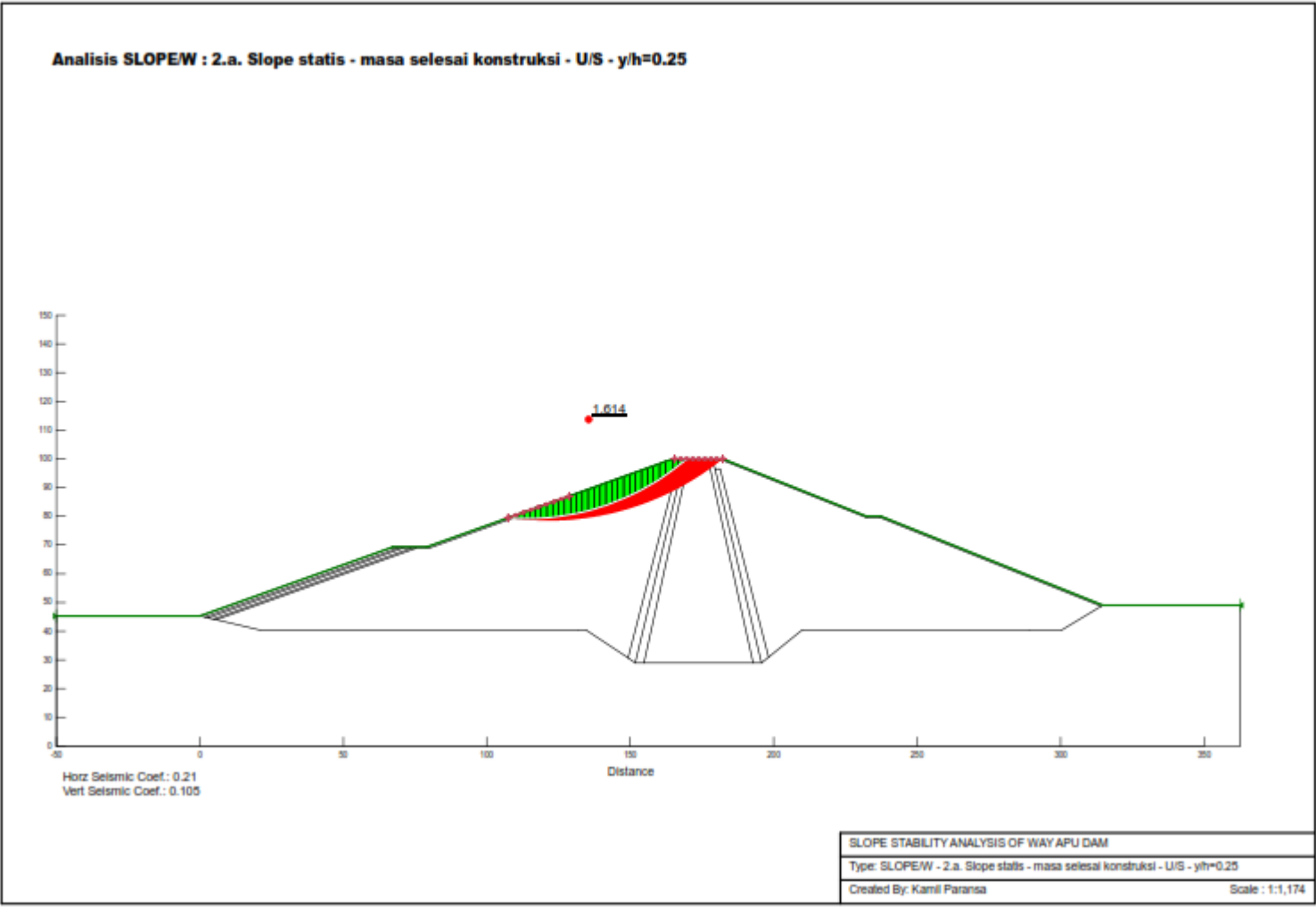




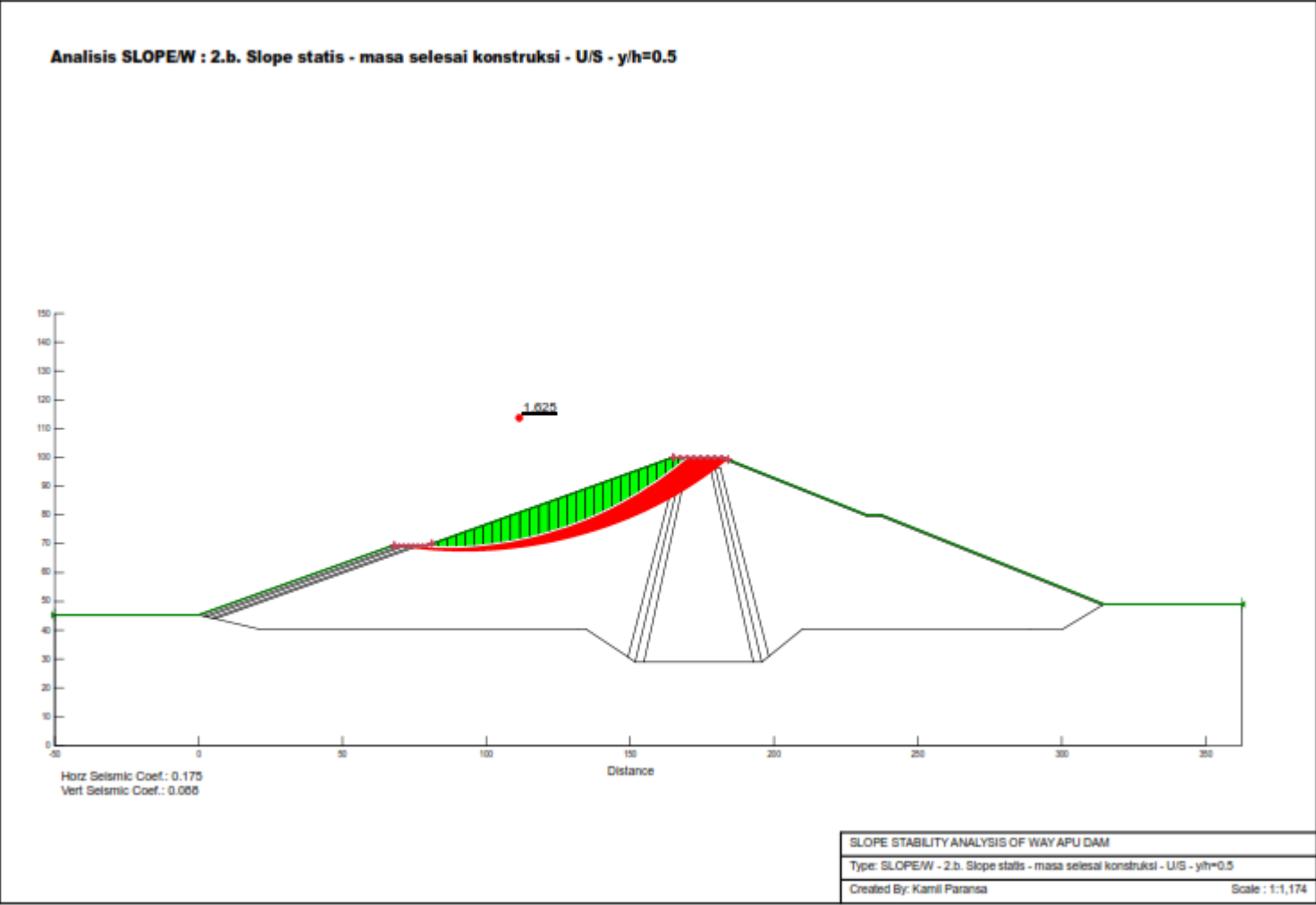
اجتازت دالاندو



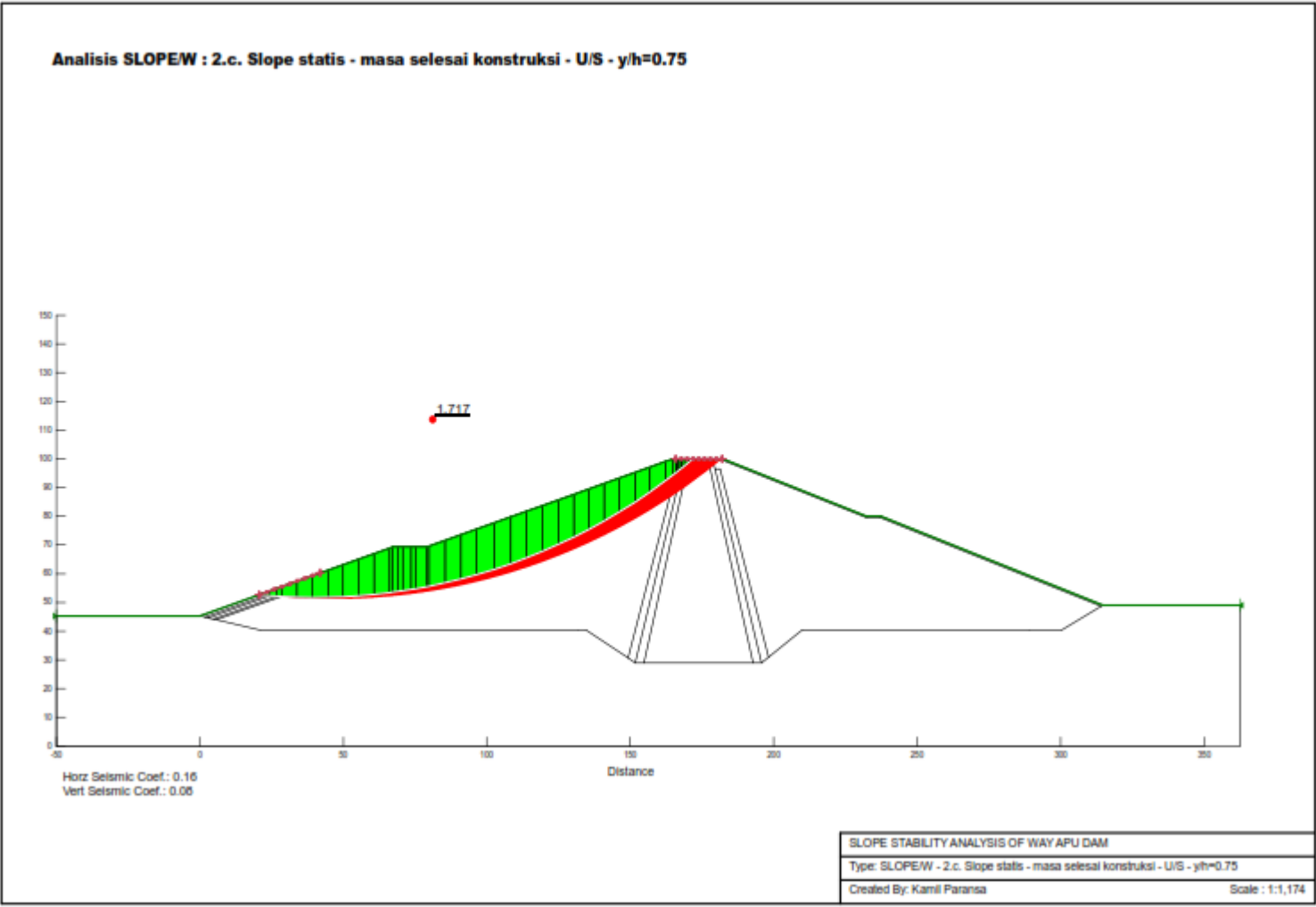
اجتازہ امتحان



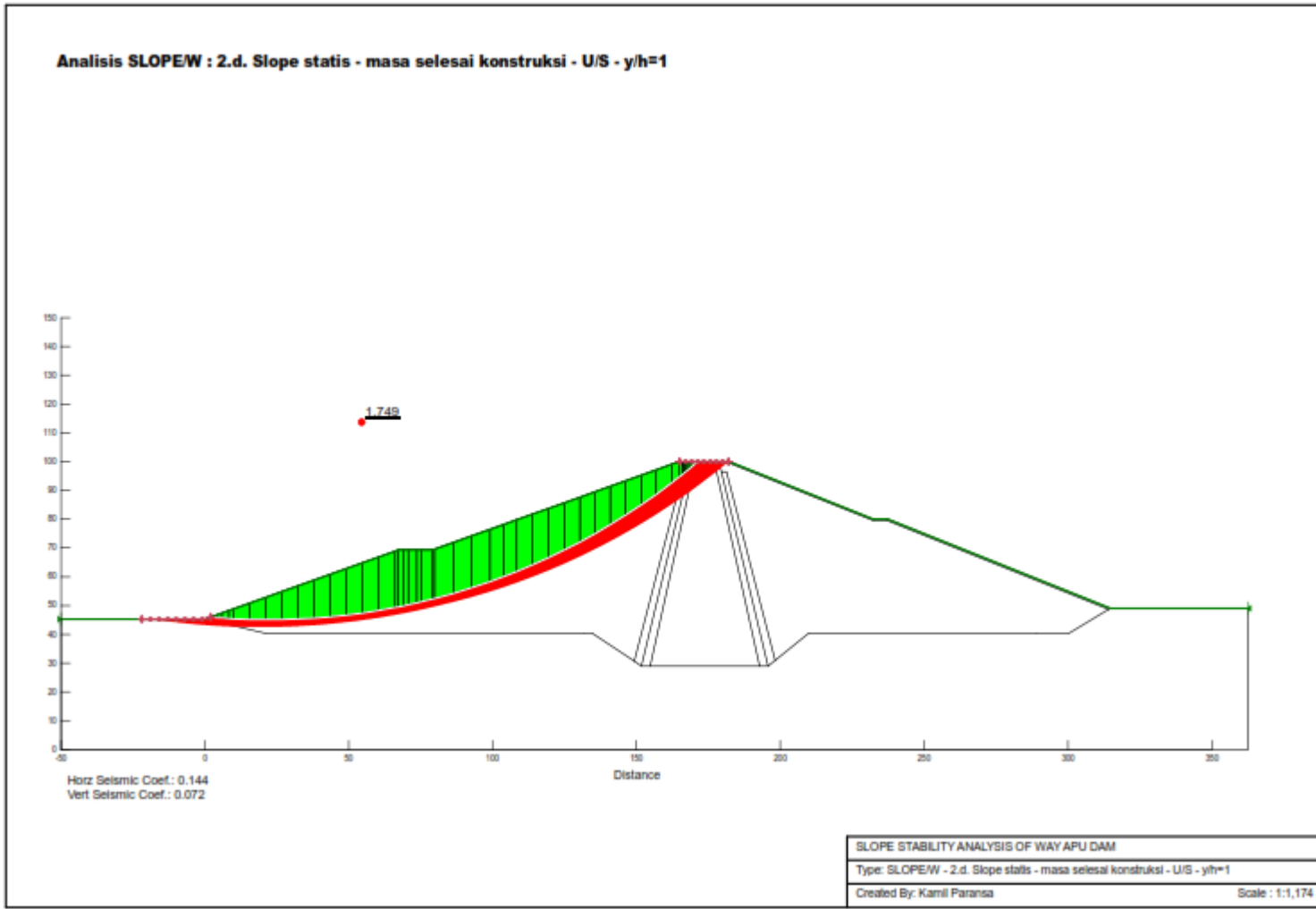
اجتازہ شدہ



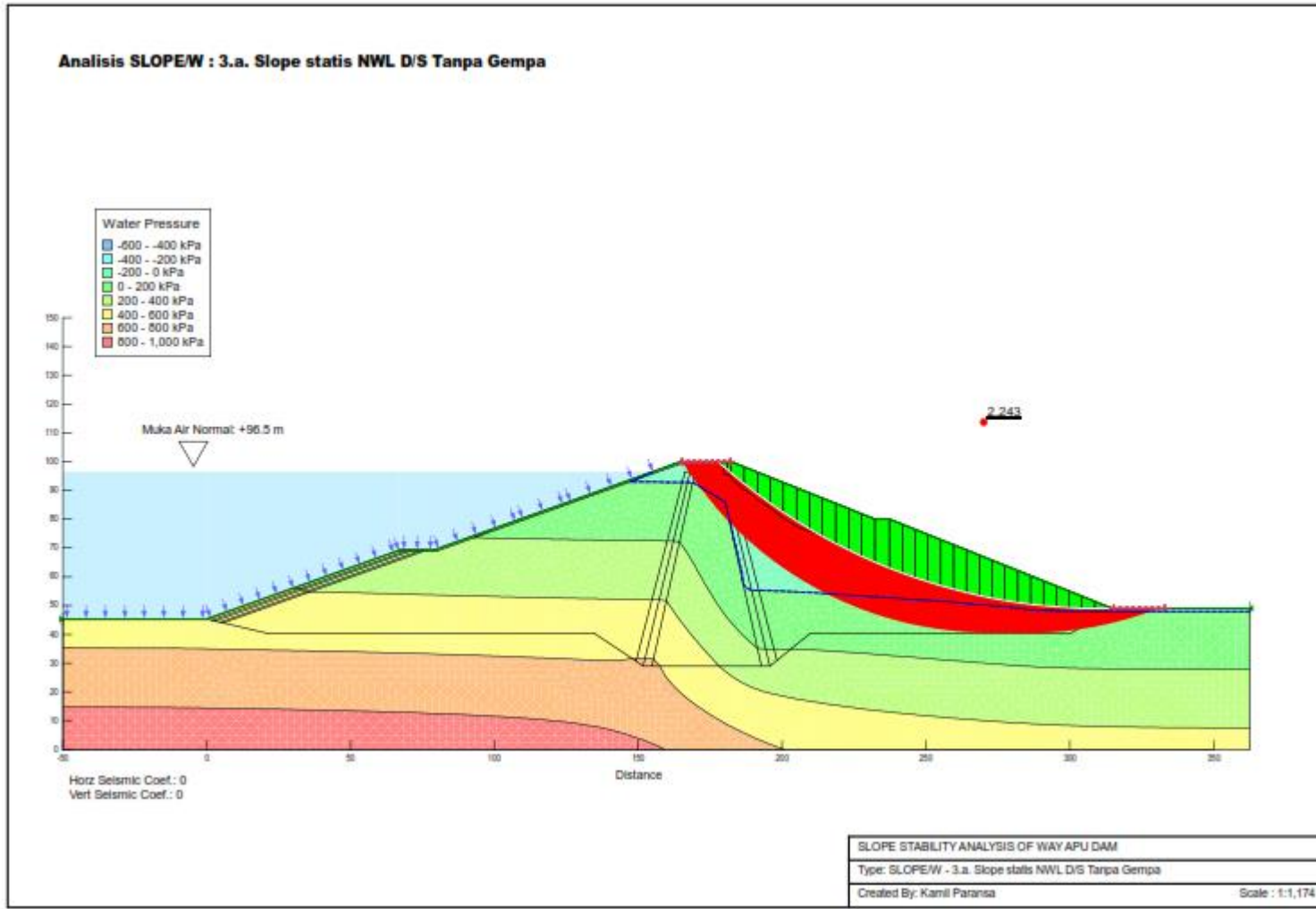
اجتازہ شدہ



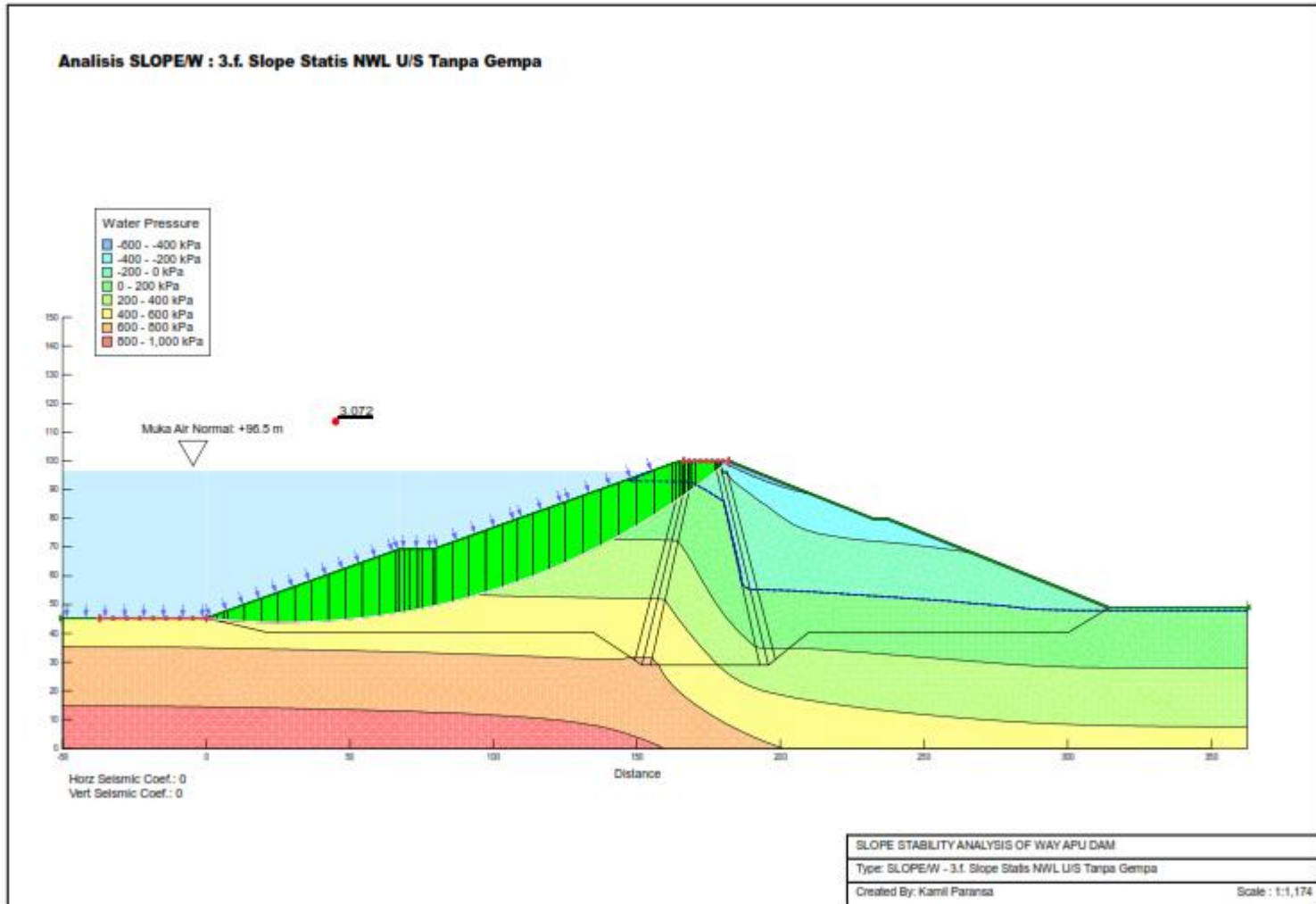
اجتازت امتحان

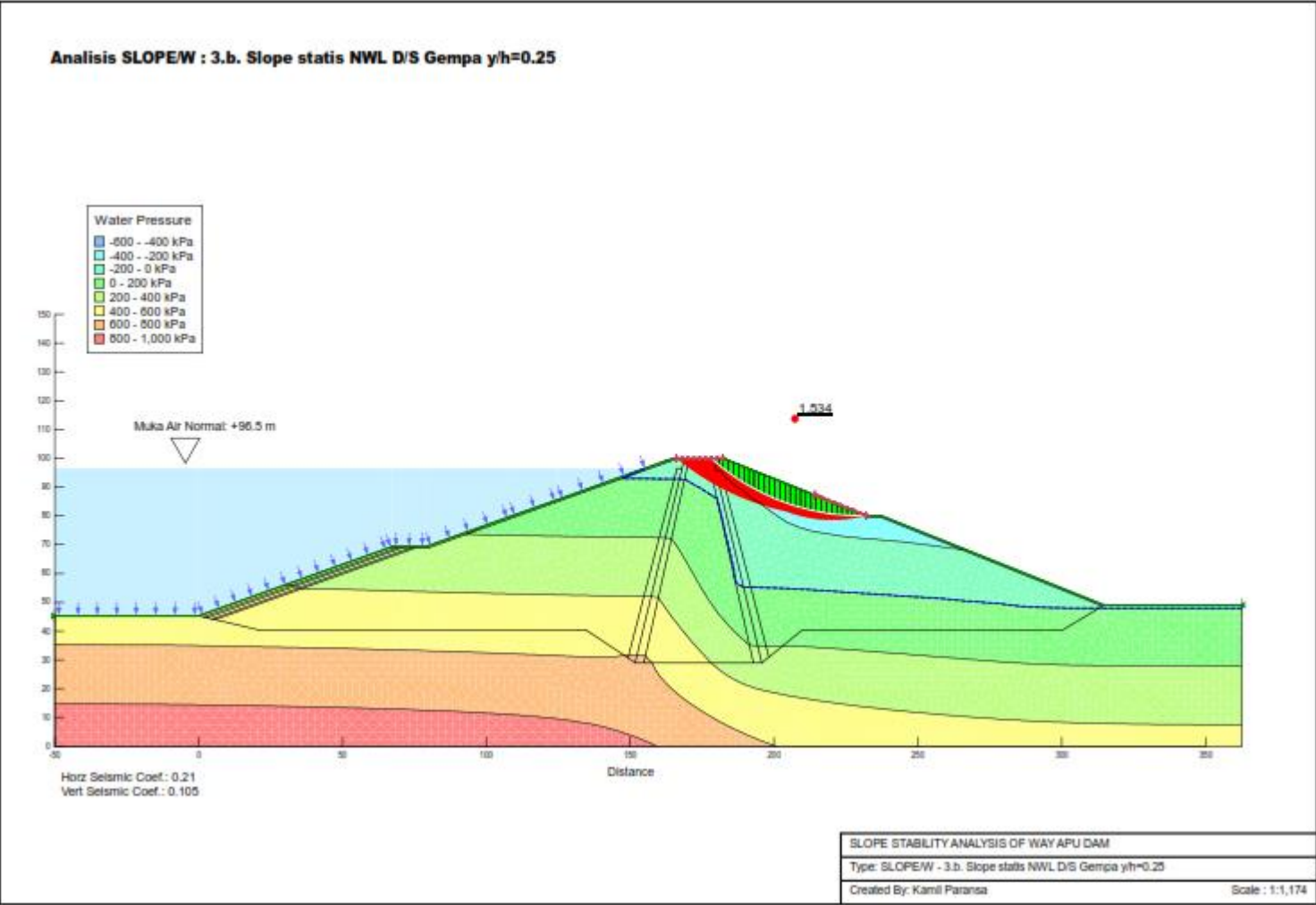


اجتازہ شدہ

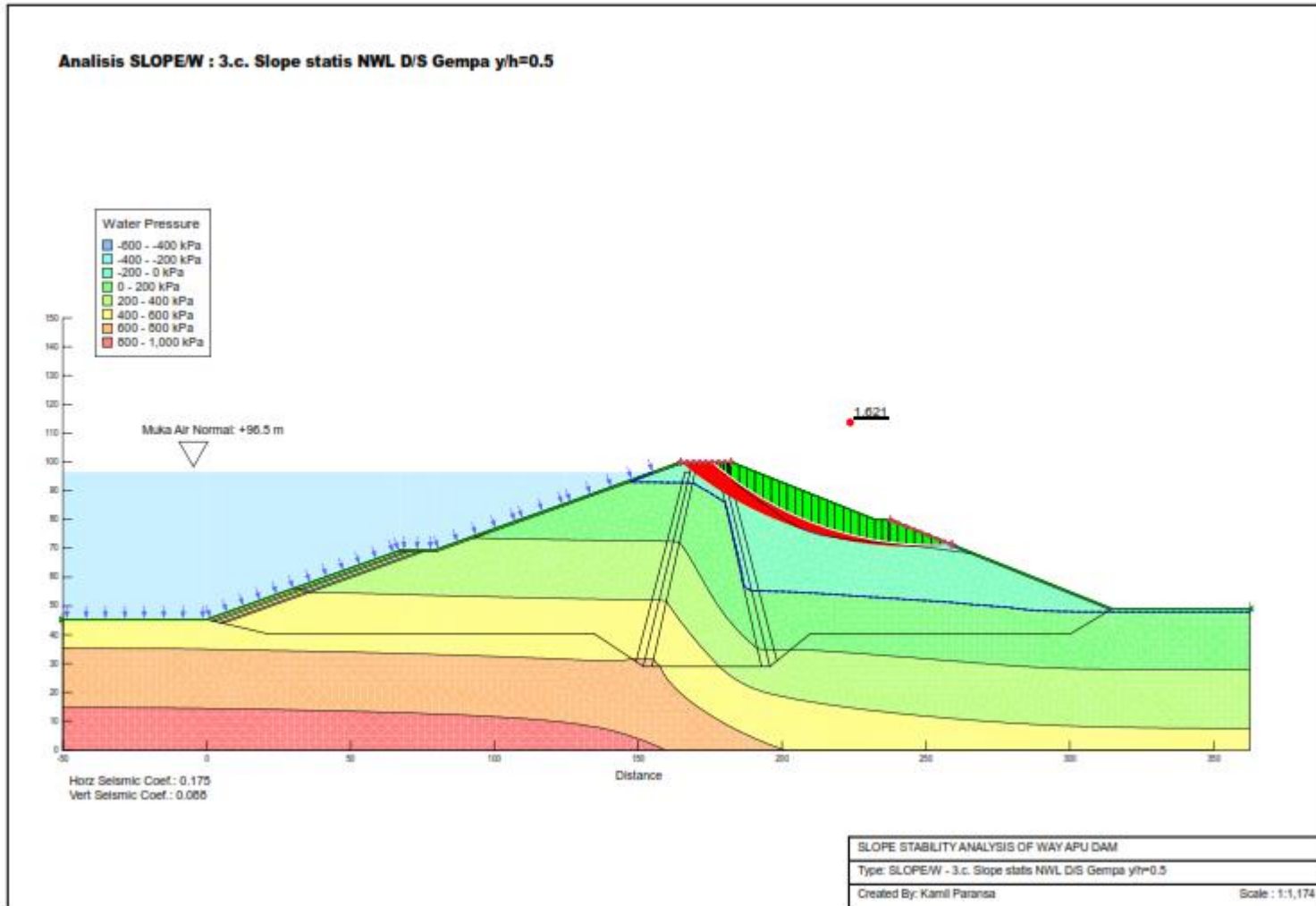


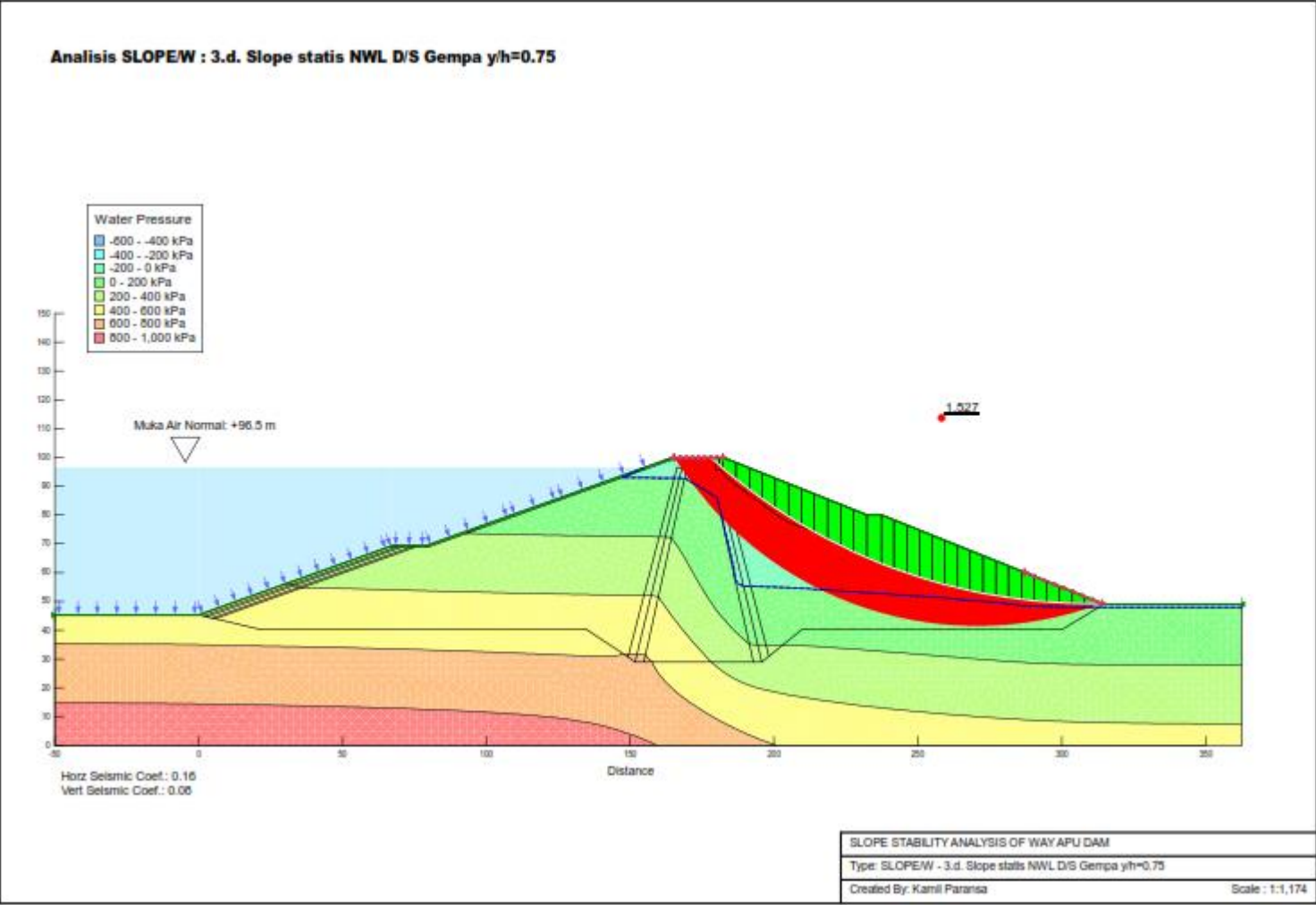
اجتاز استاد ابلاندو



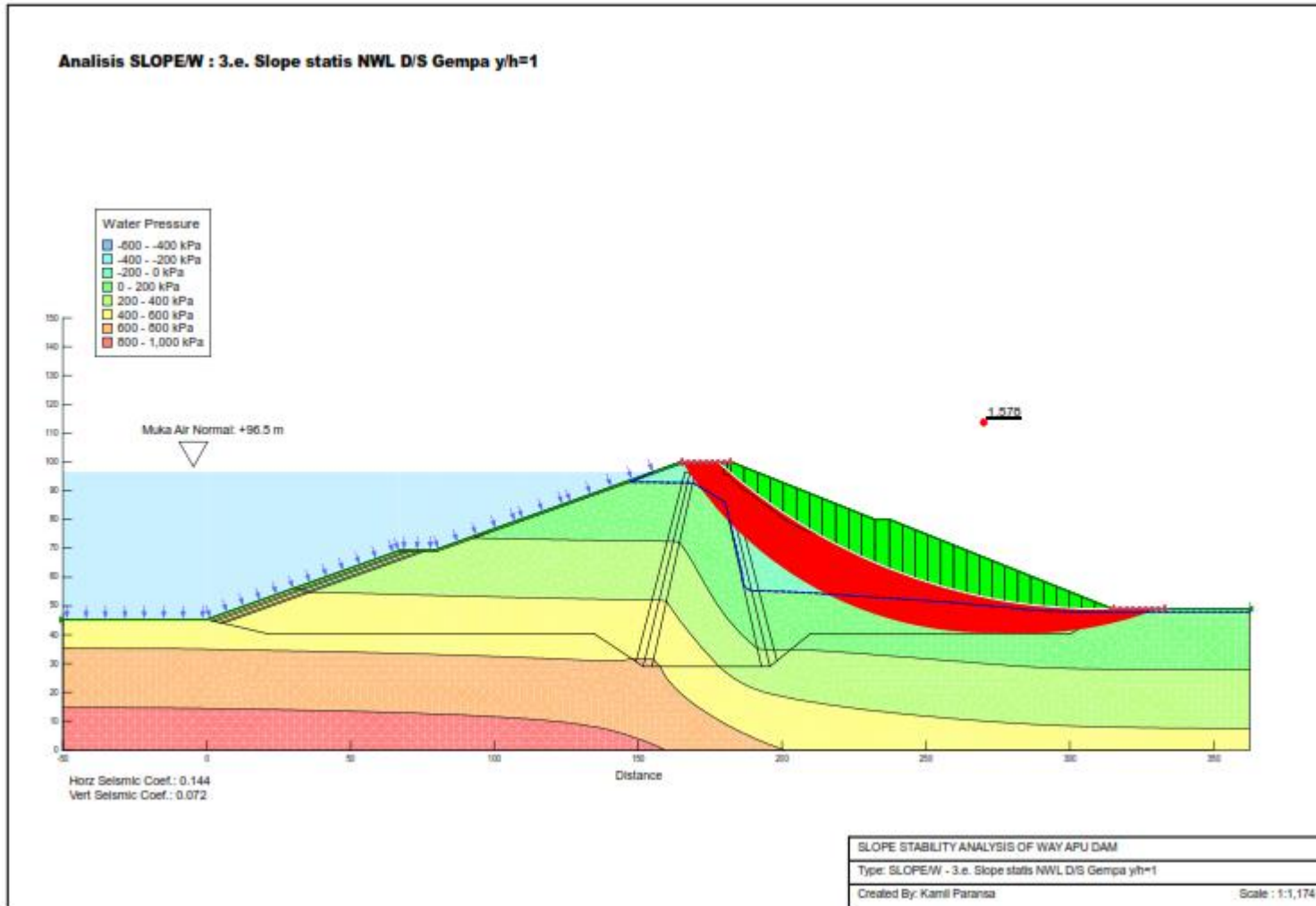


اجتاز استداد پلان

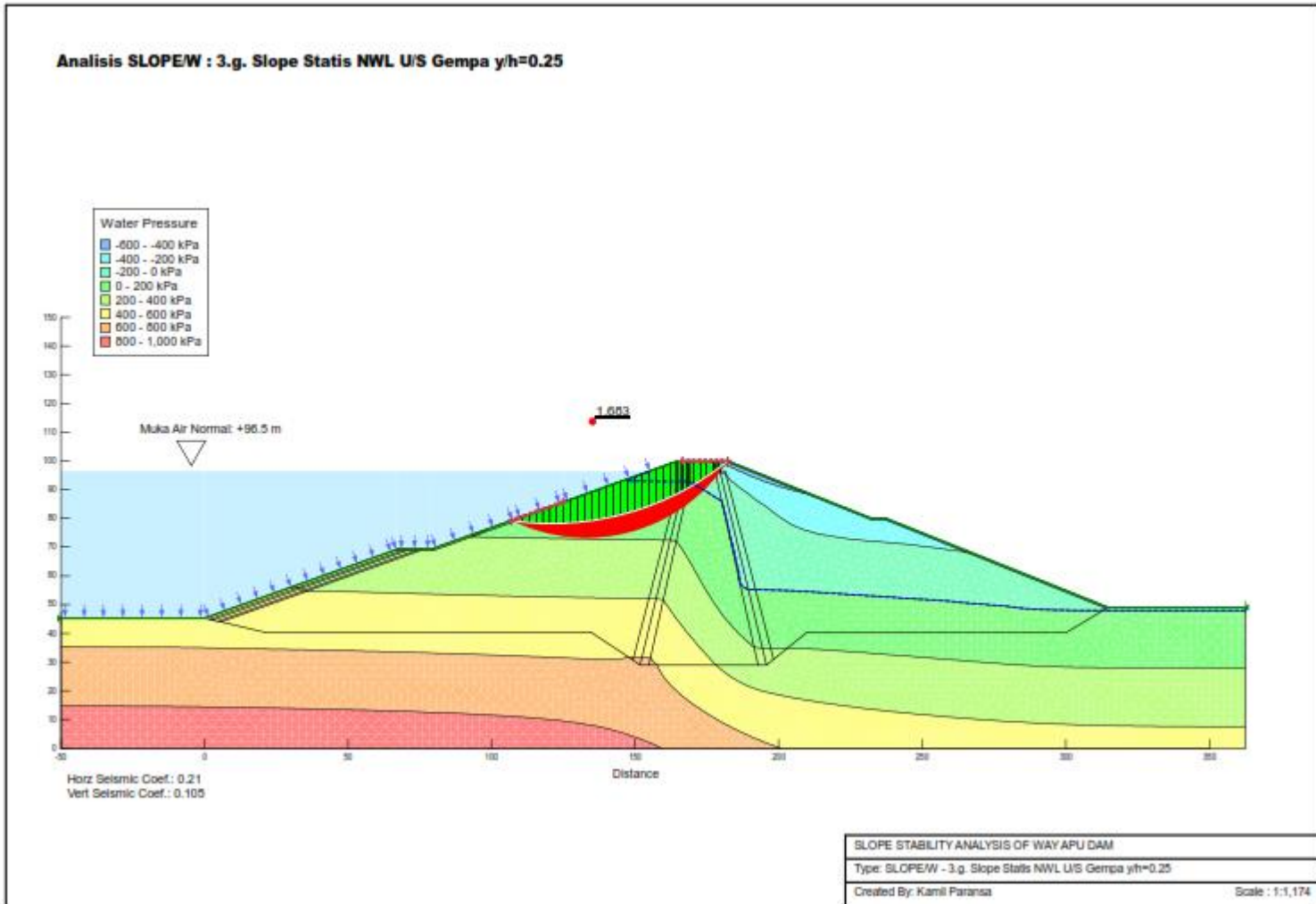




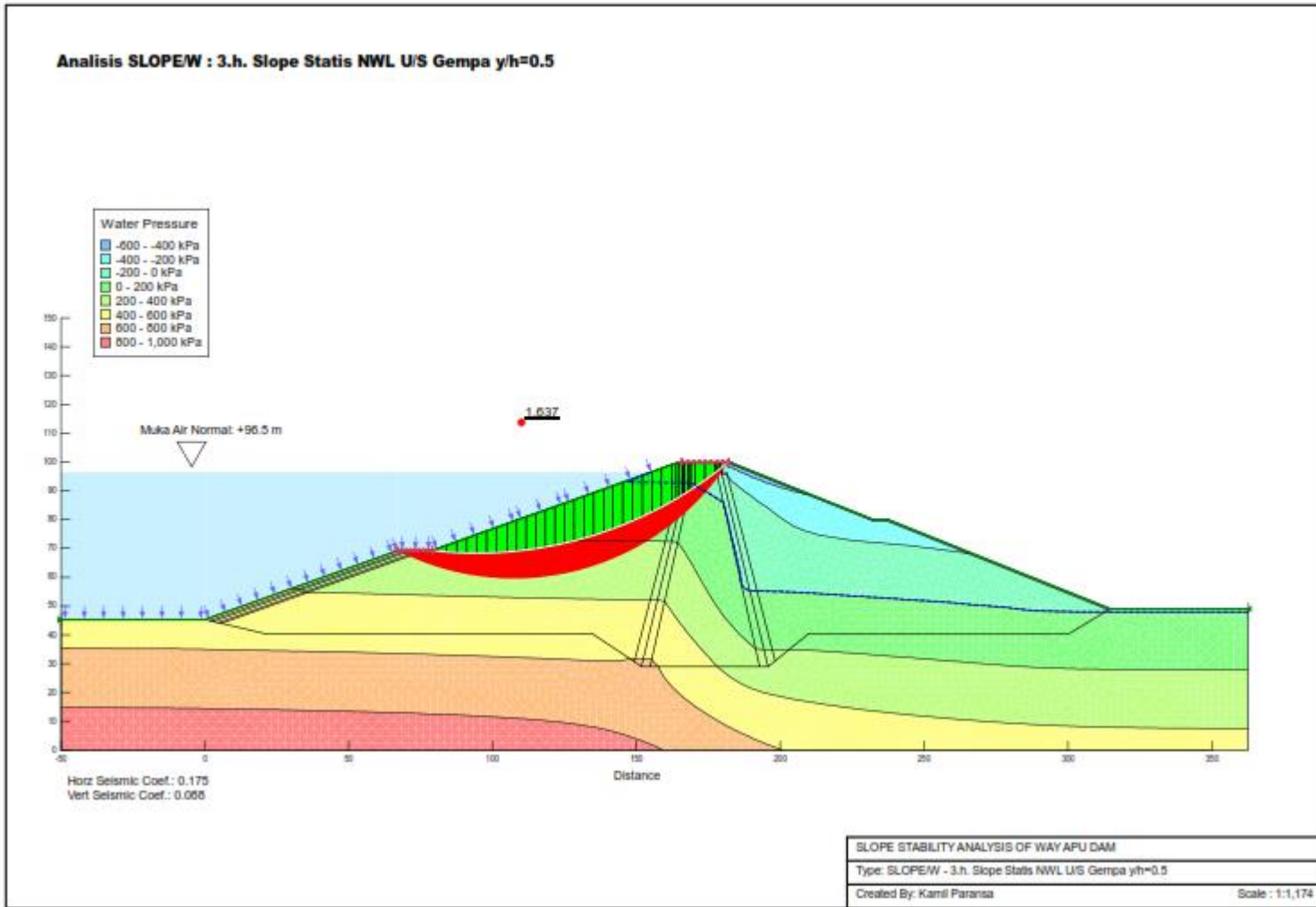
اجتاز استداد الازد



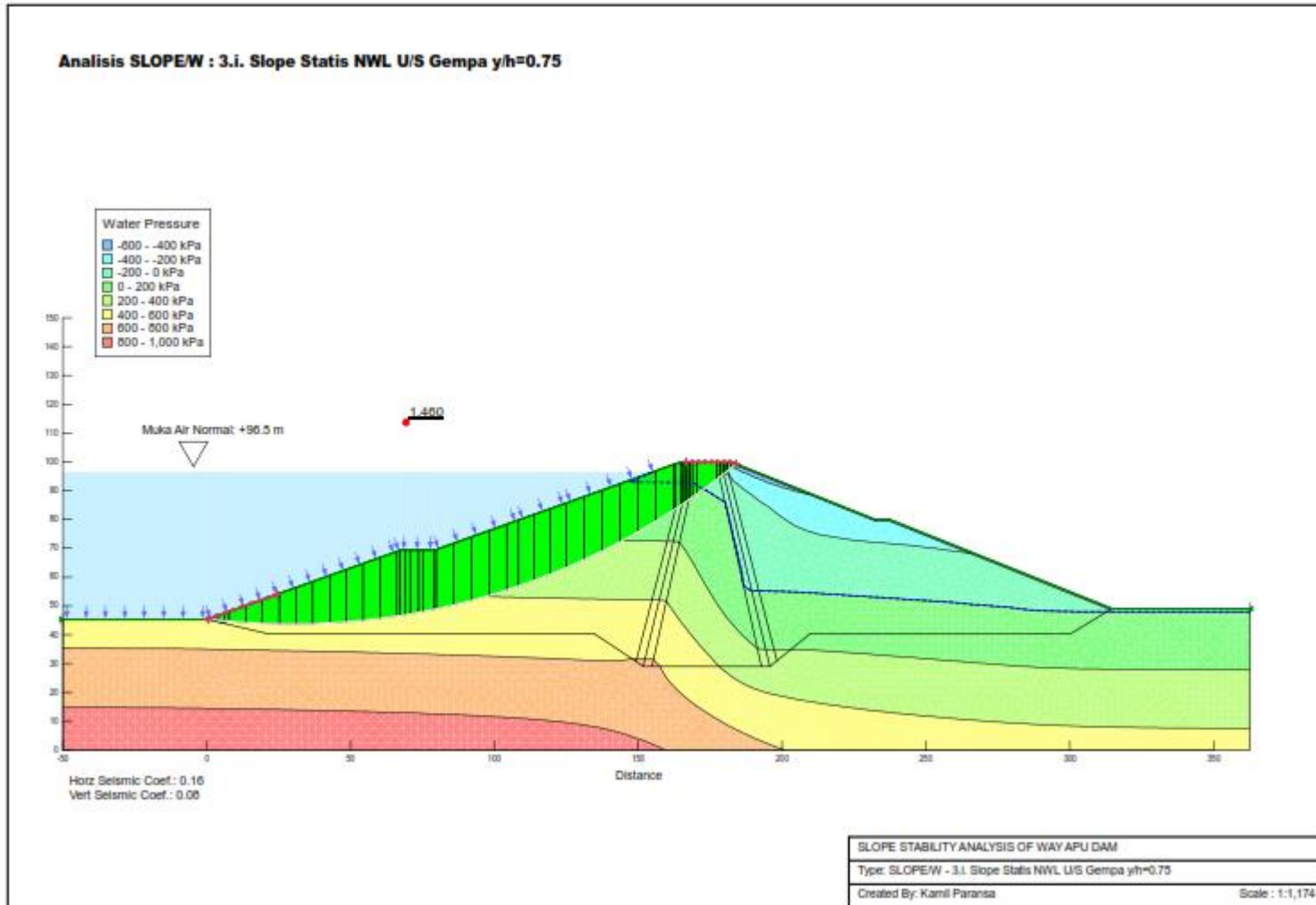
اجتازہ امتحان



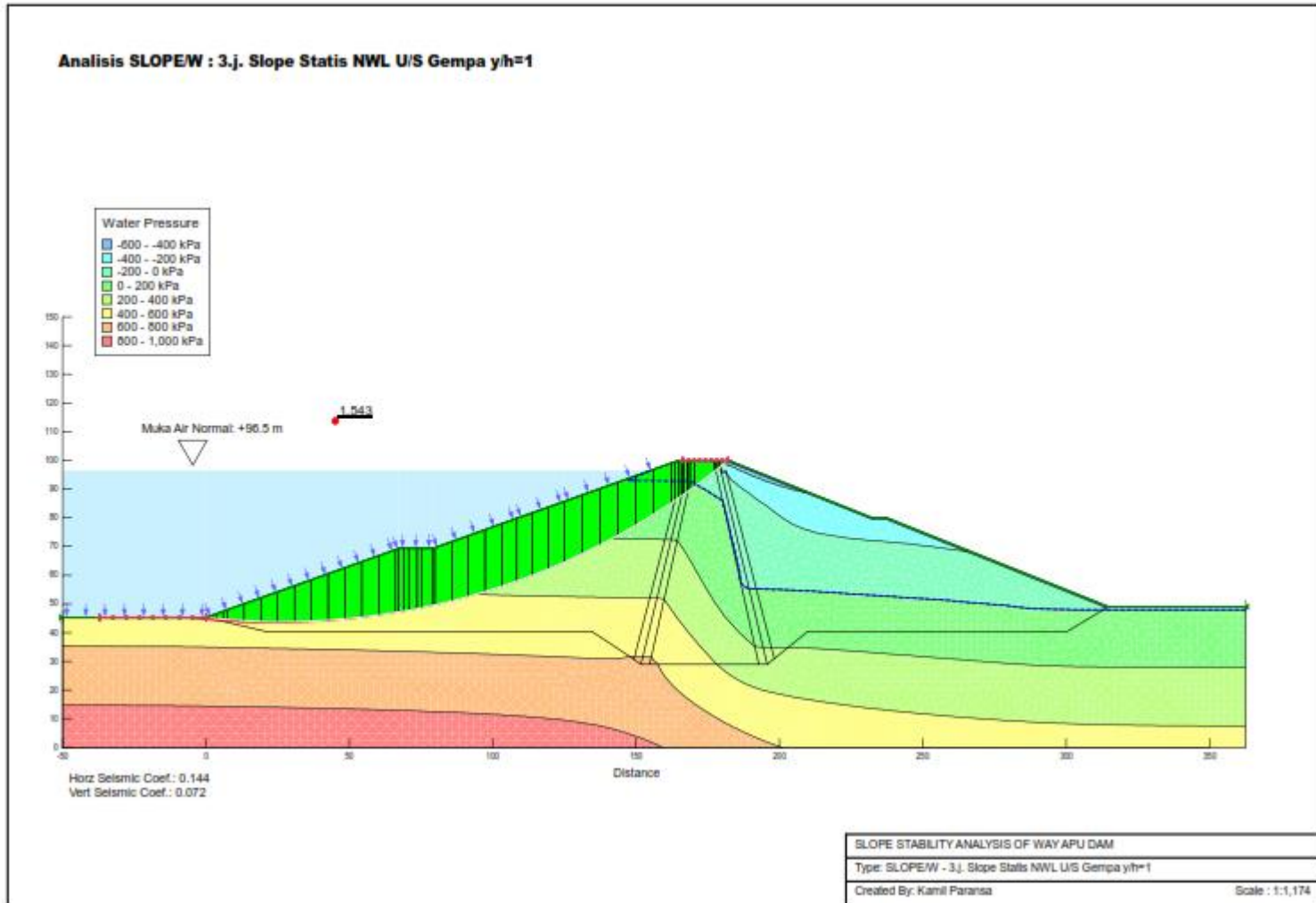
اجتازہ امتحان



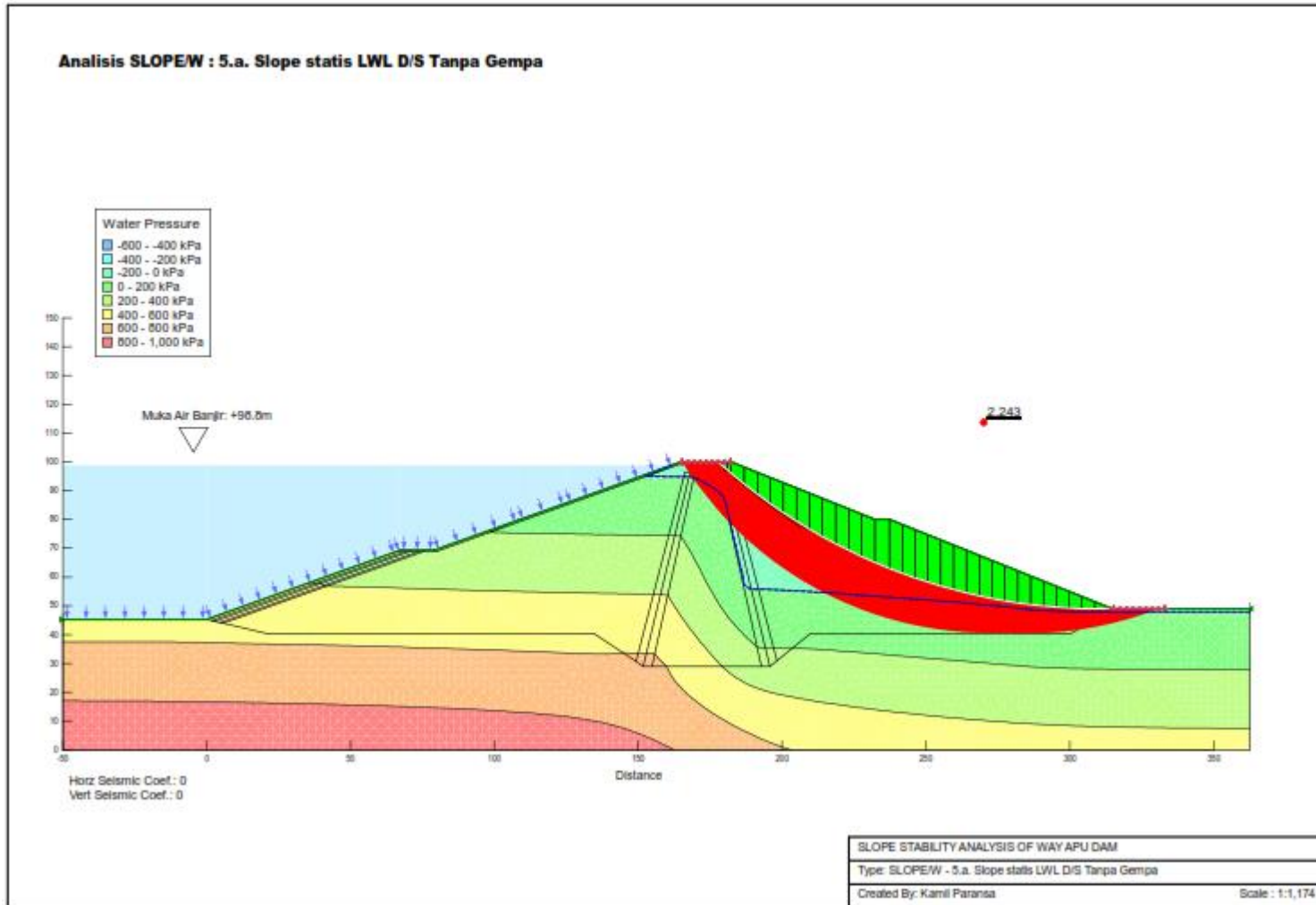
اجتازہ سندھ



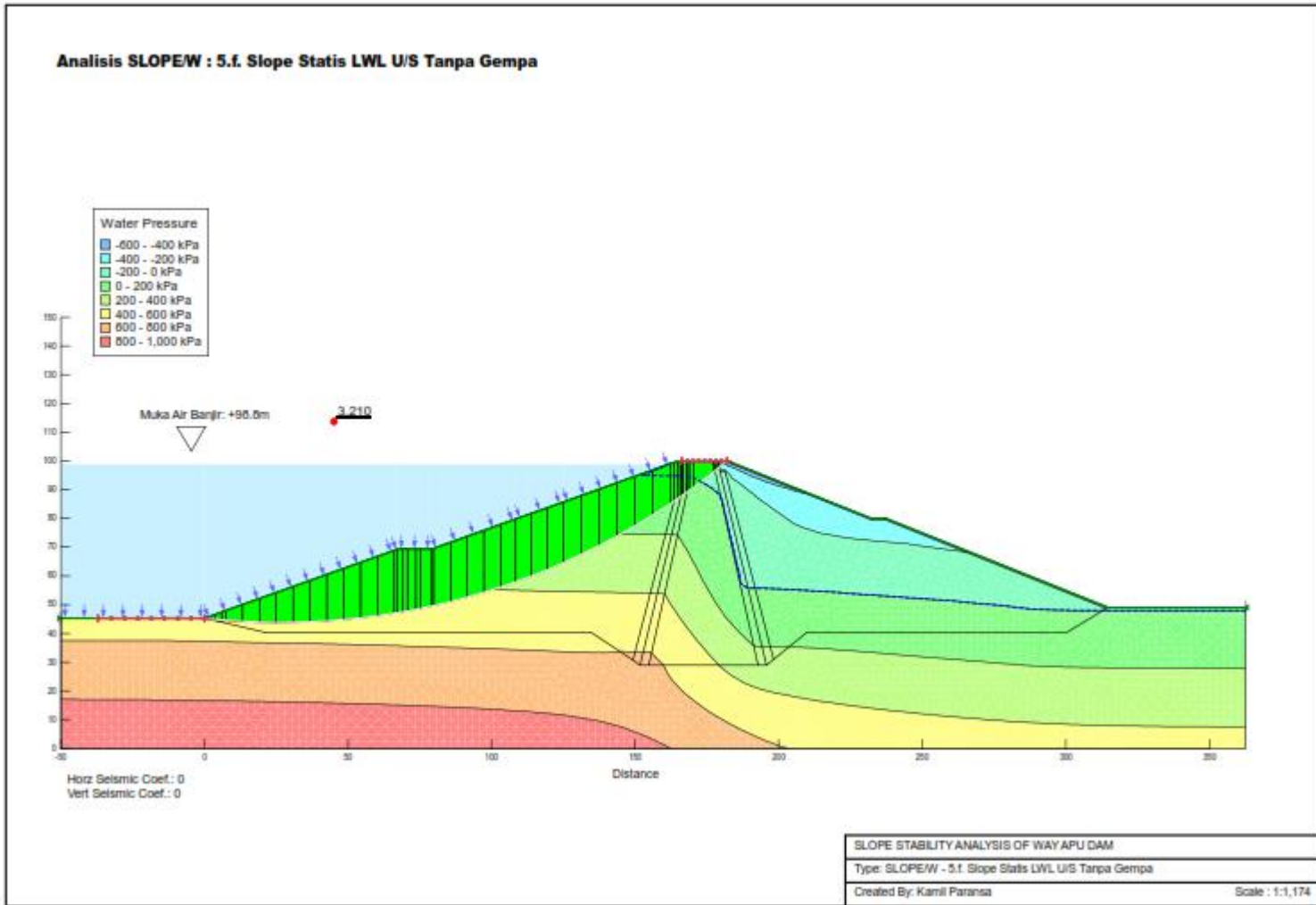
اجتاز استاد بزرگوار



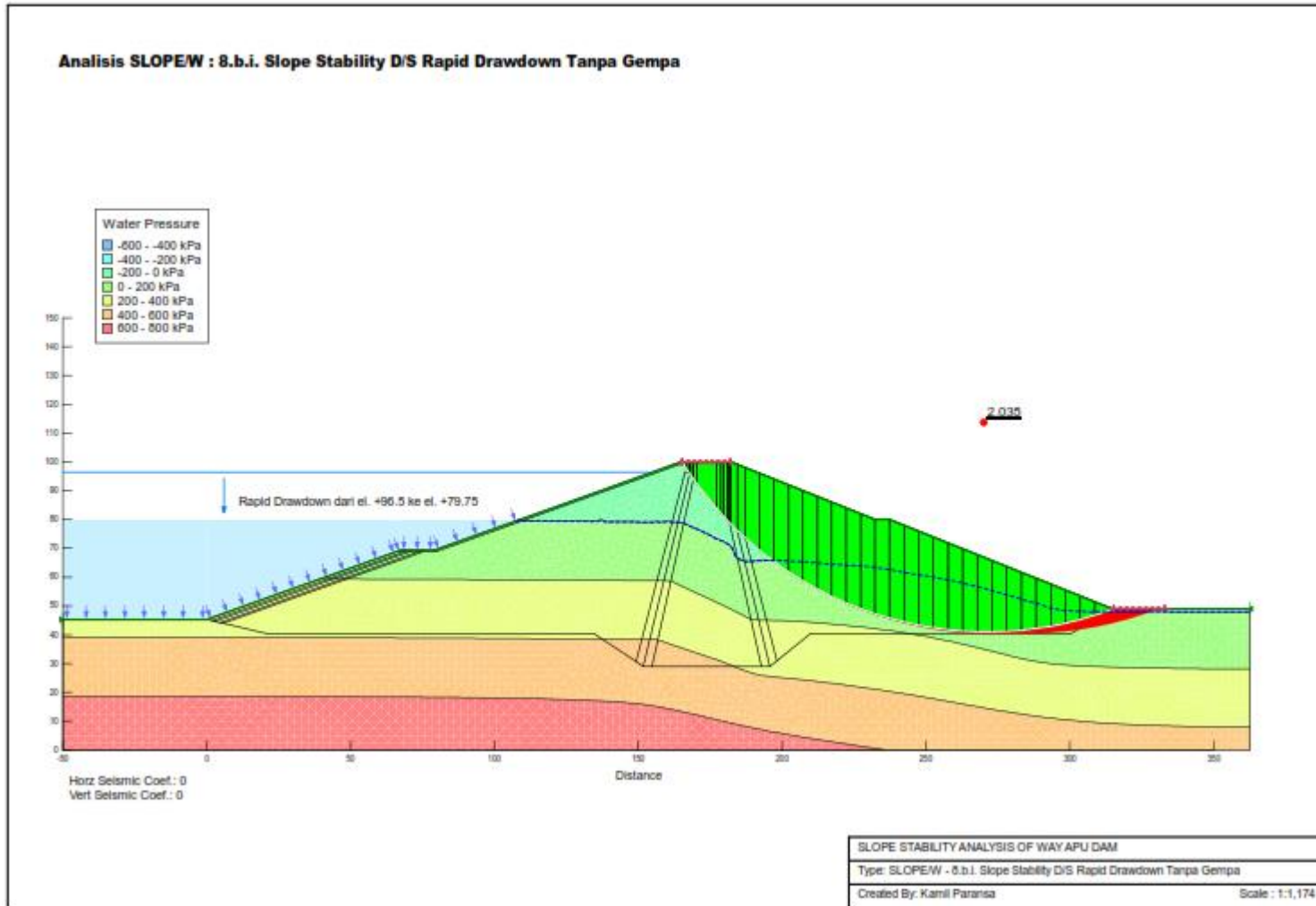
اجتاز استاد بزرگوار



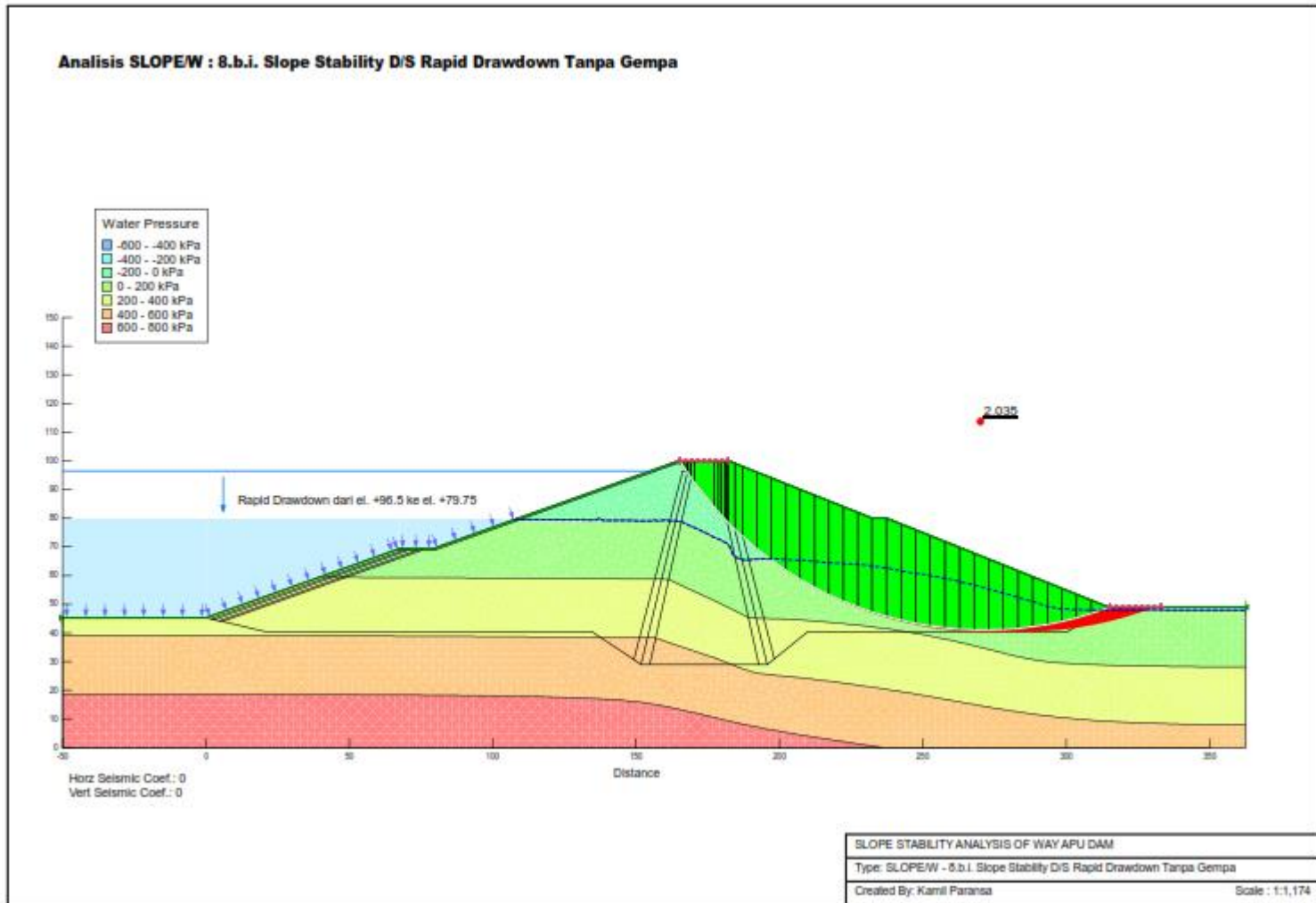
اجتازہ شدہ ادارہ



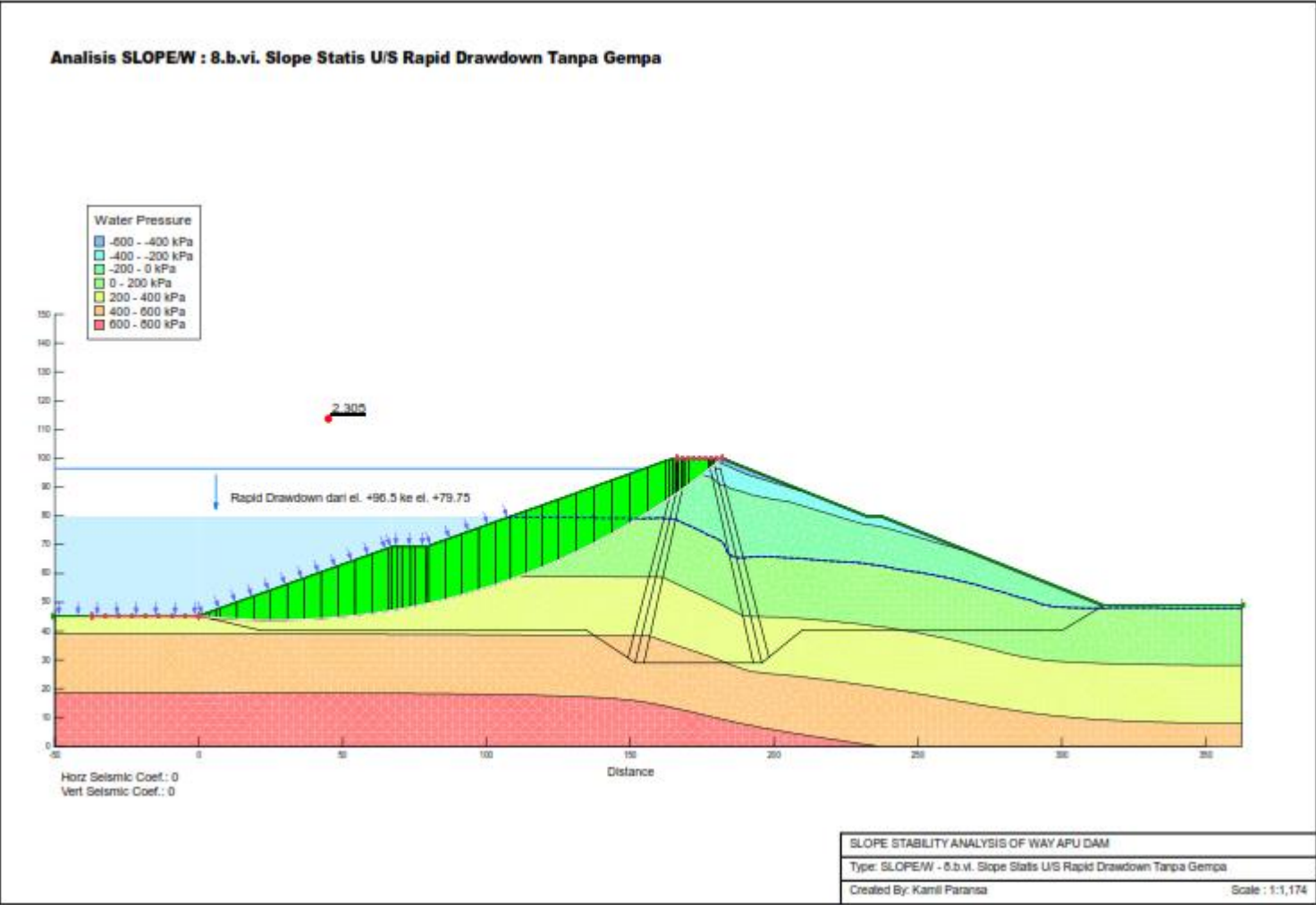
اجتاز استداران



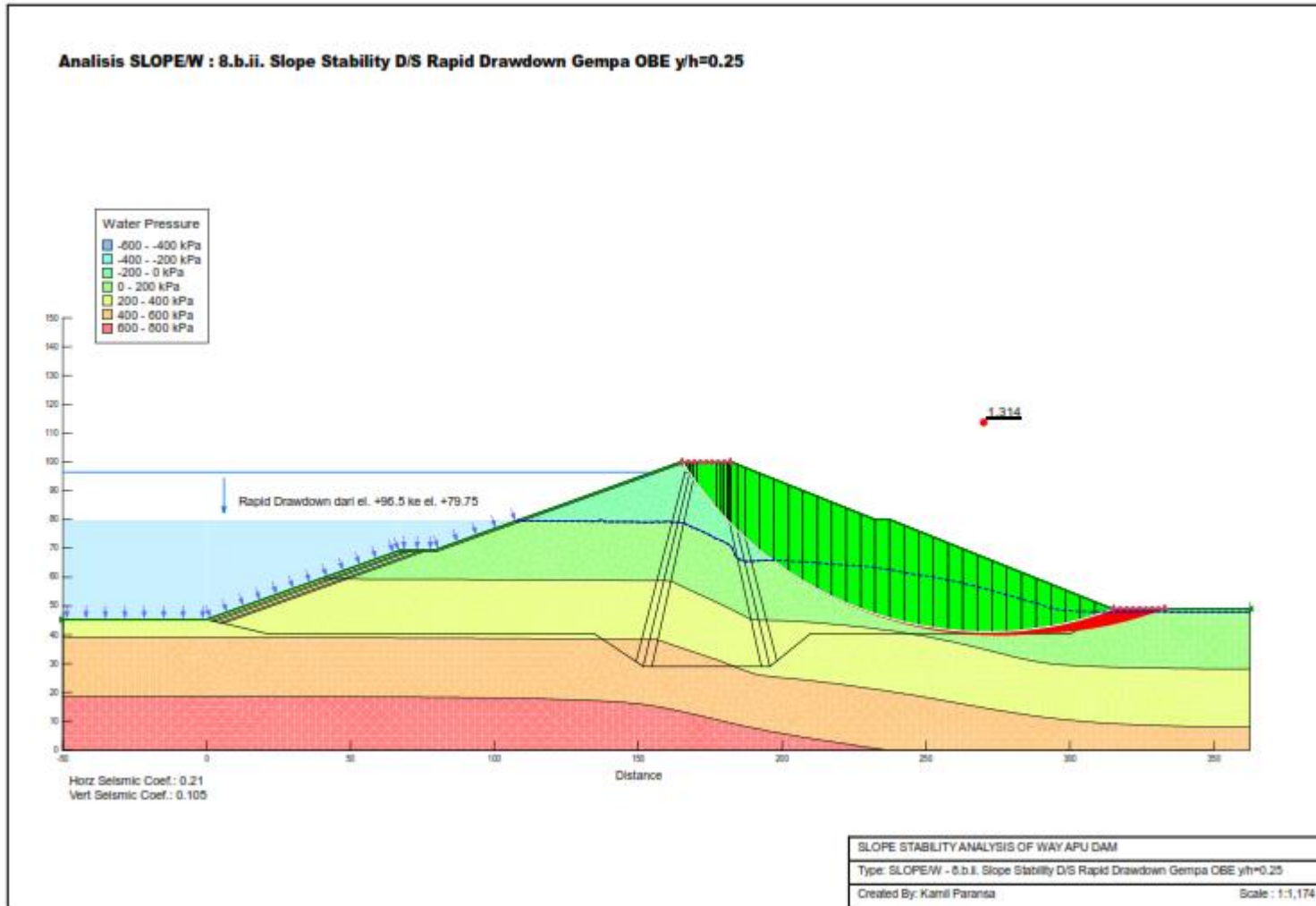
اجتاز استداد ابلاندو



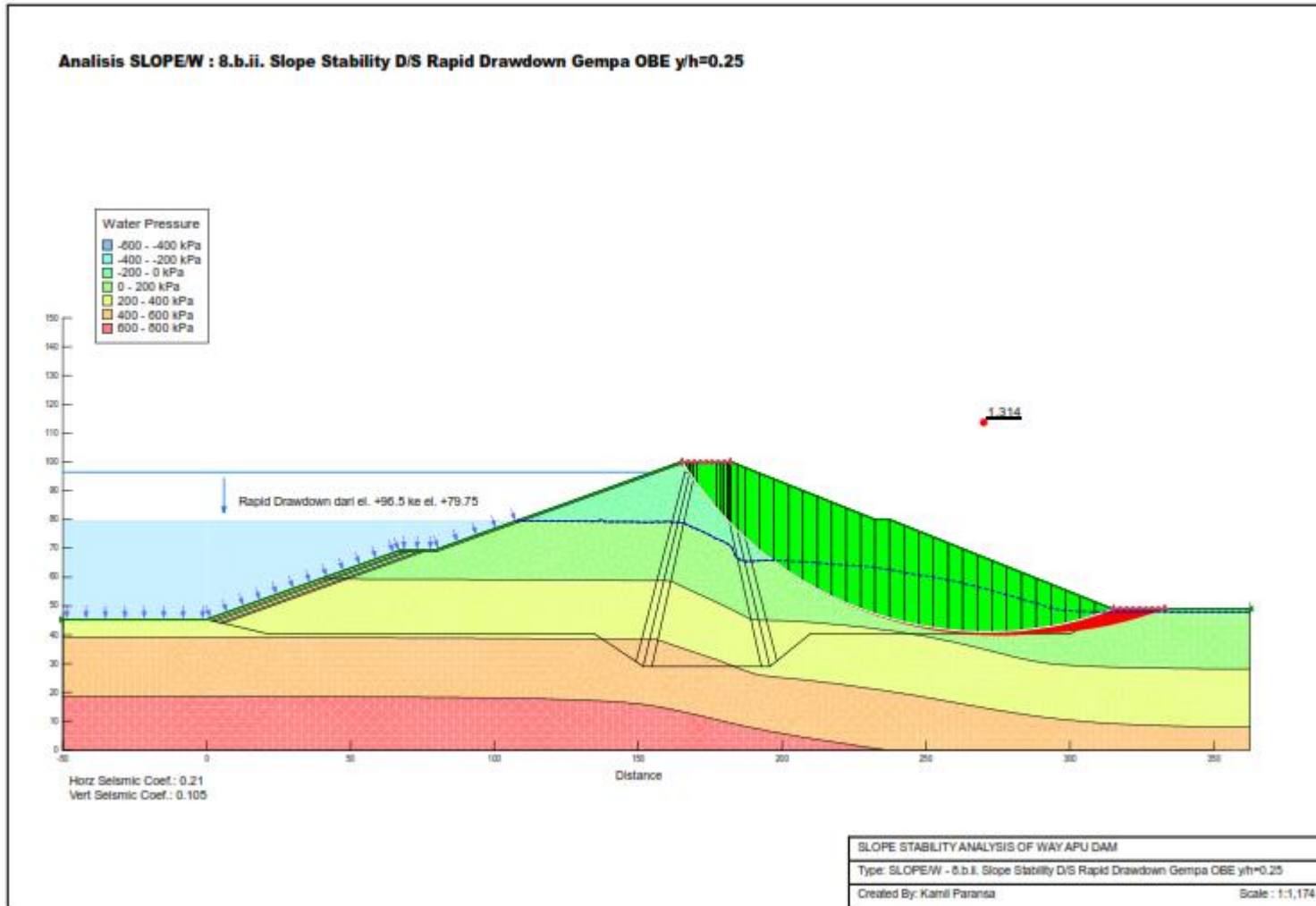
اجتاز استاد بزرگوار



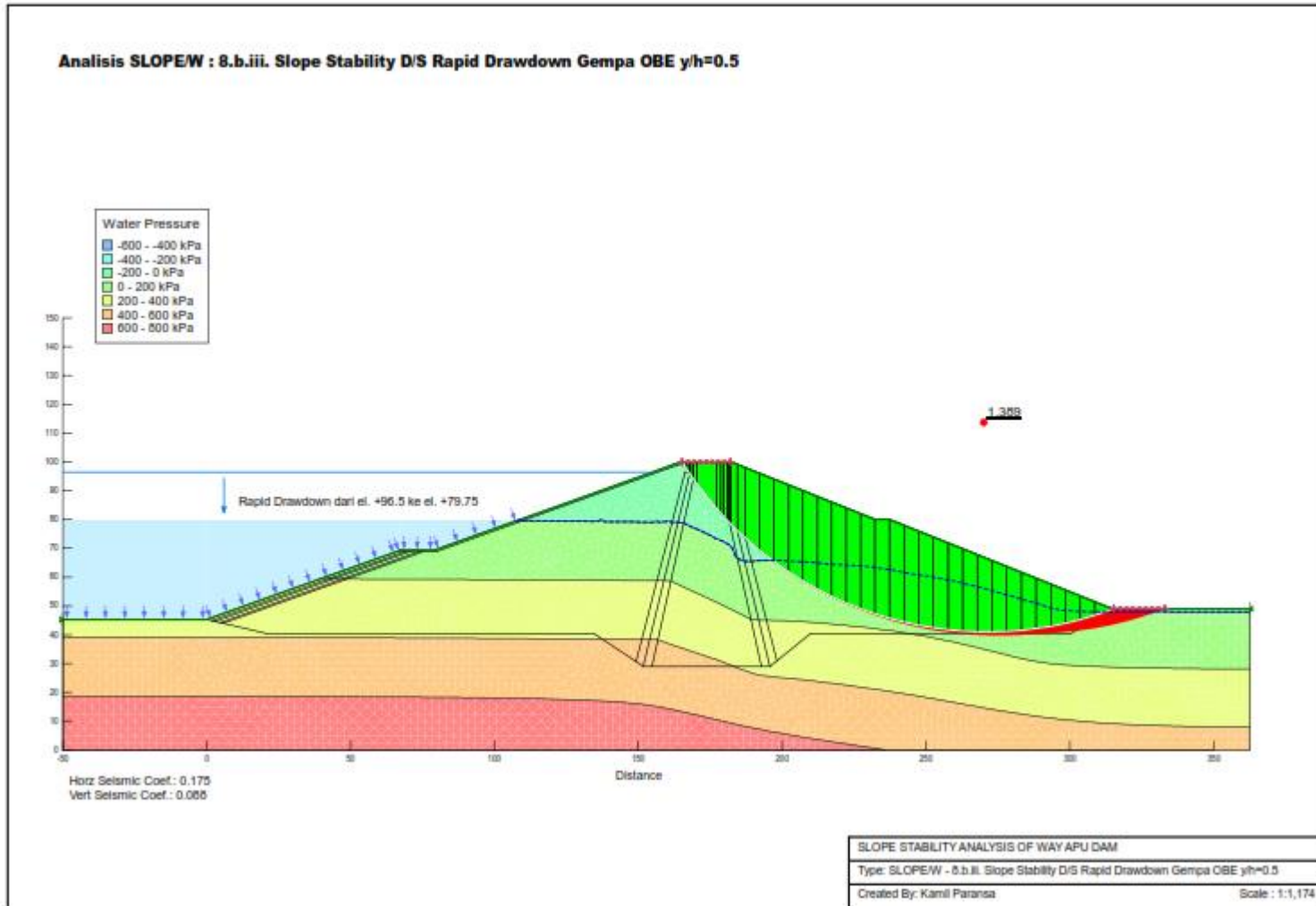
اجتاد استاد ابلاندو



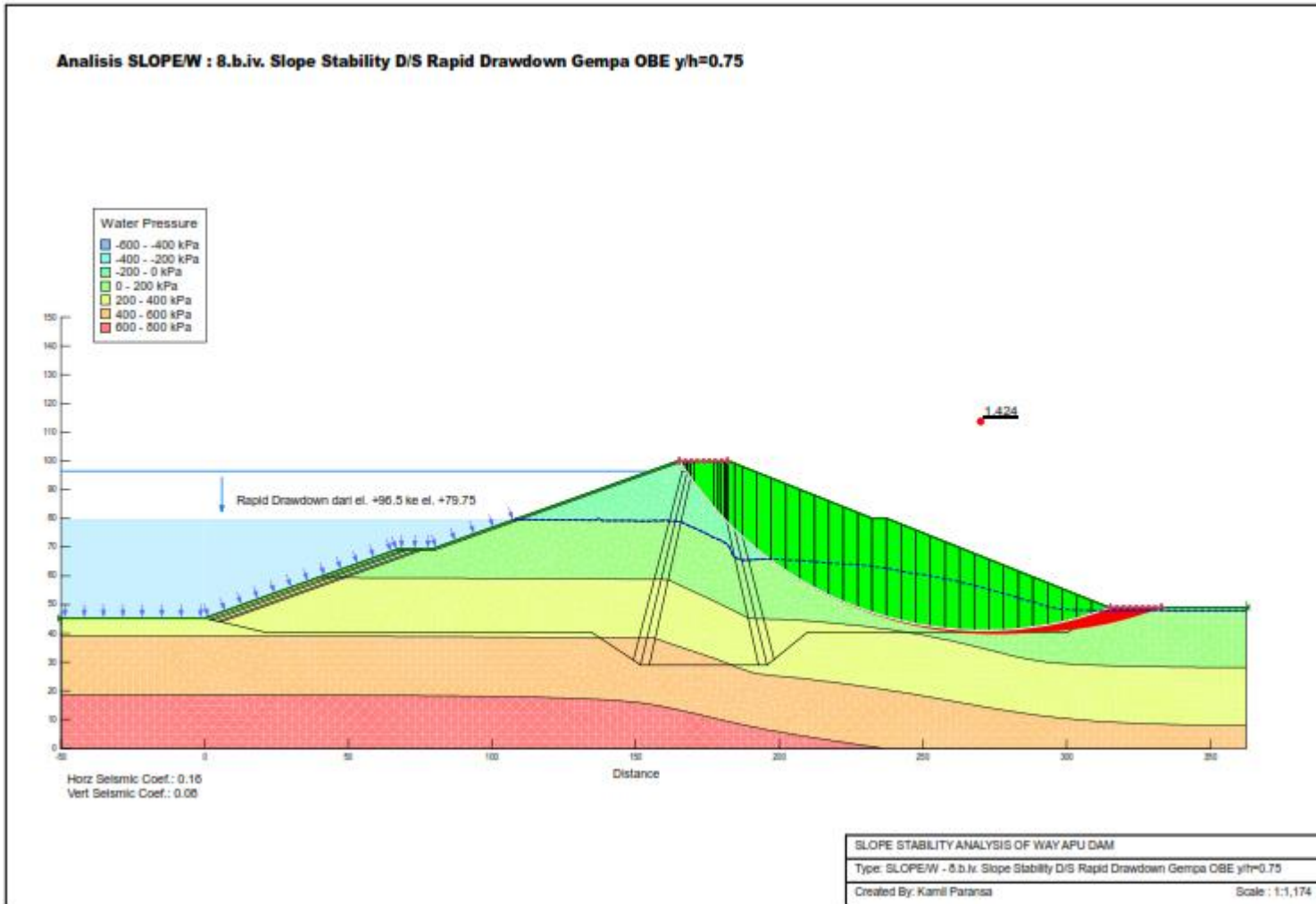
اجتاز استاد ایلاندر



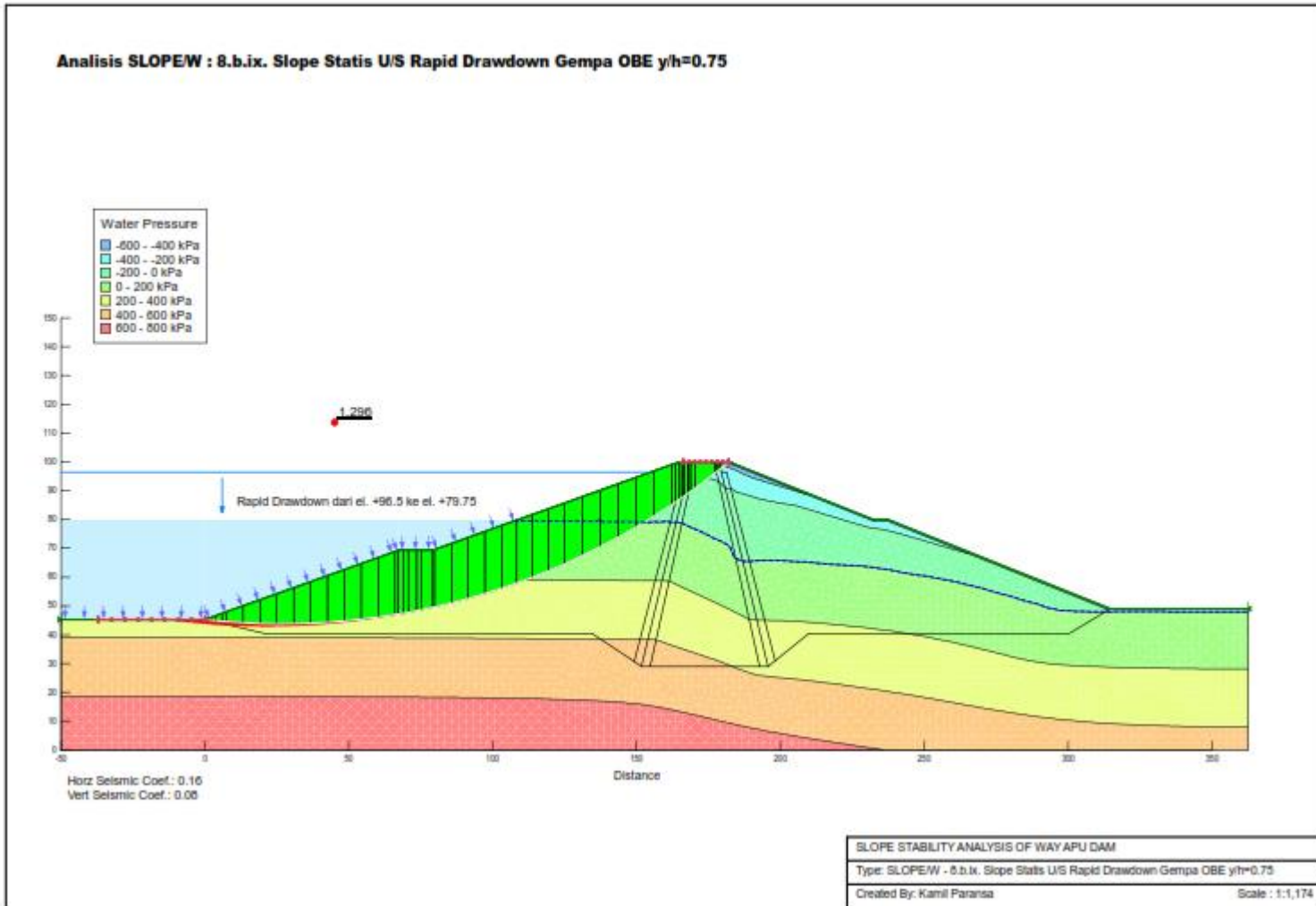
اجتاز استاد ایلاندر



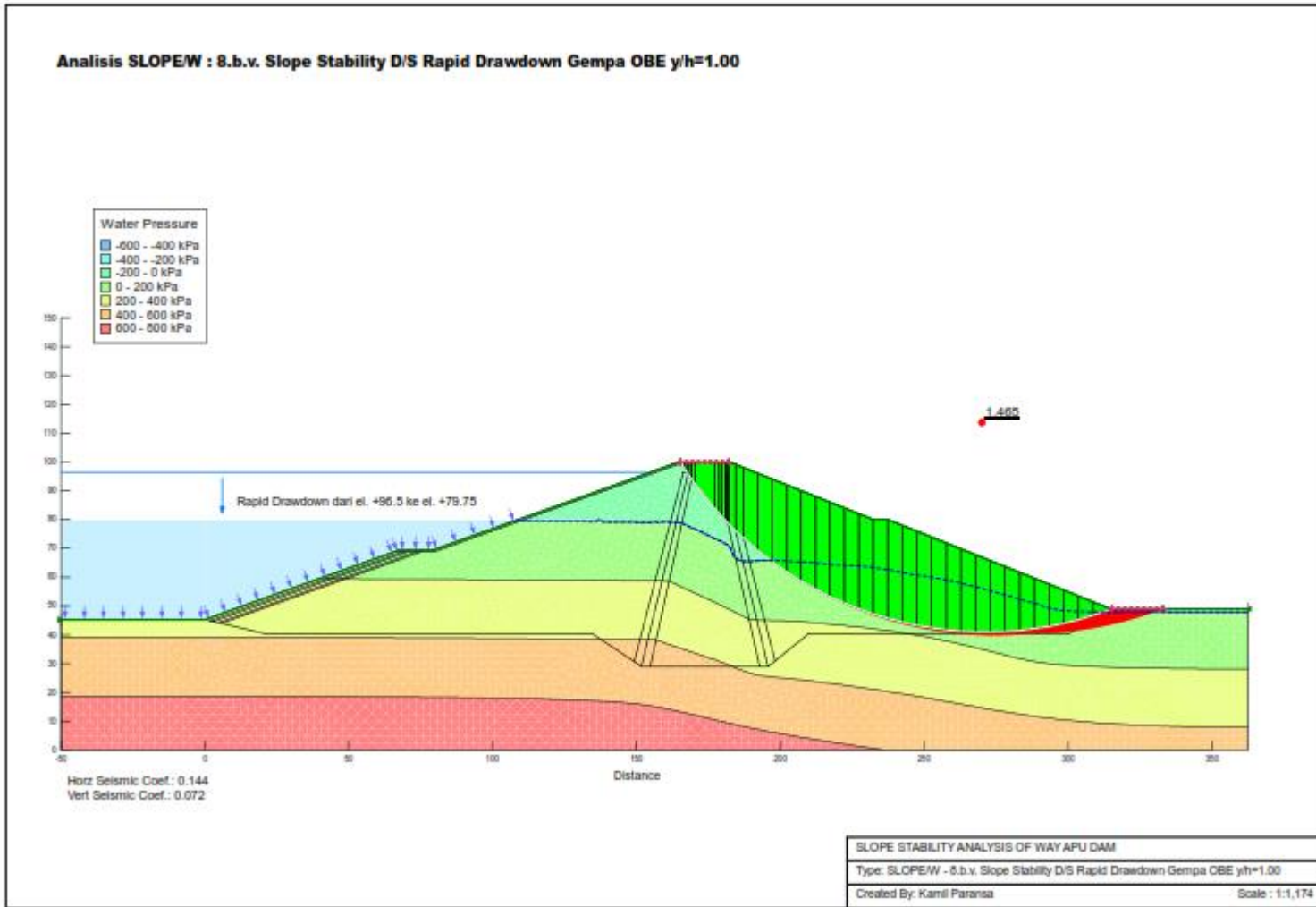
اجتاز استاد پند



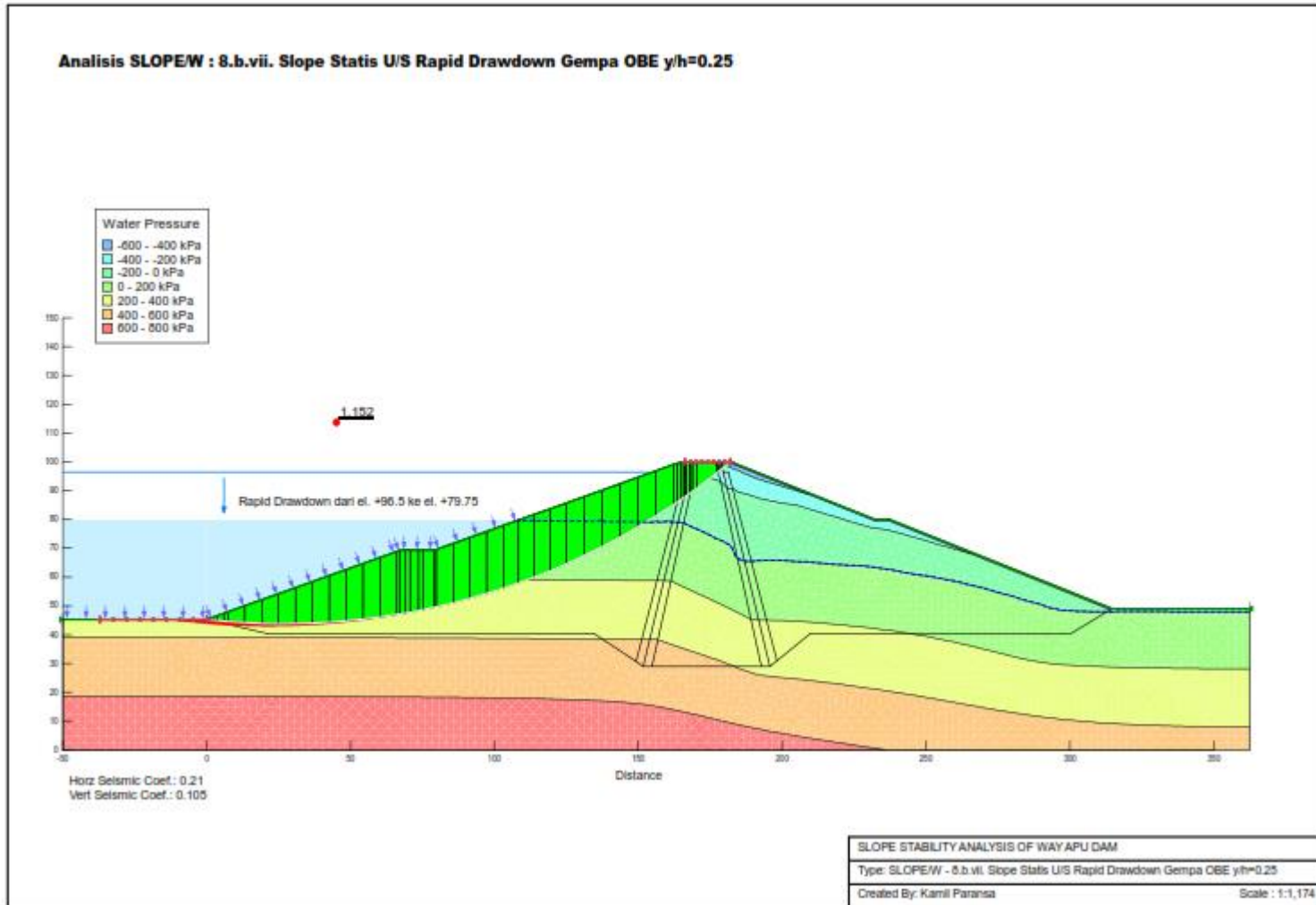
اجتاز استداد الازد

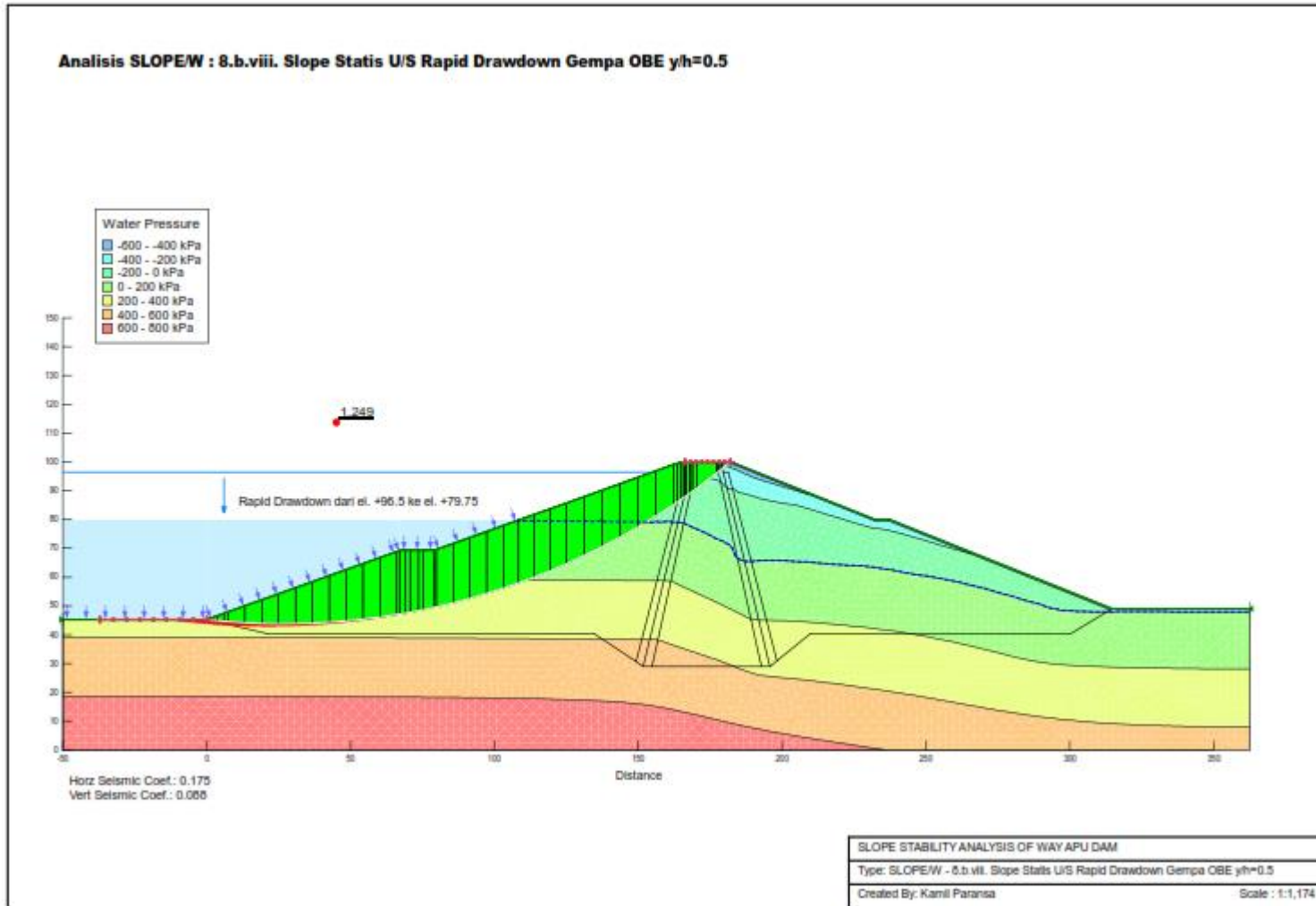


اجتاز استاد بزرگوار

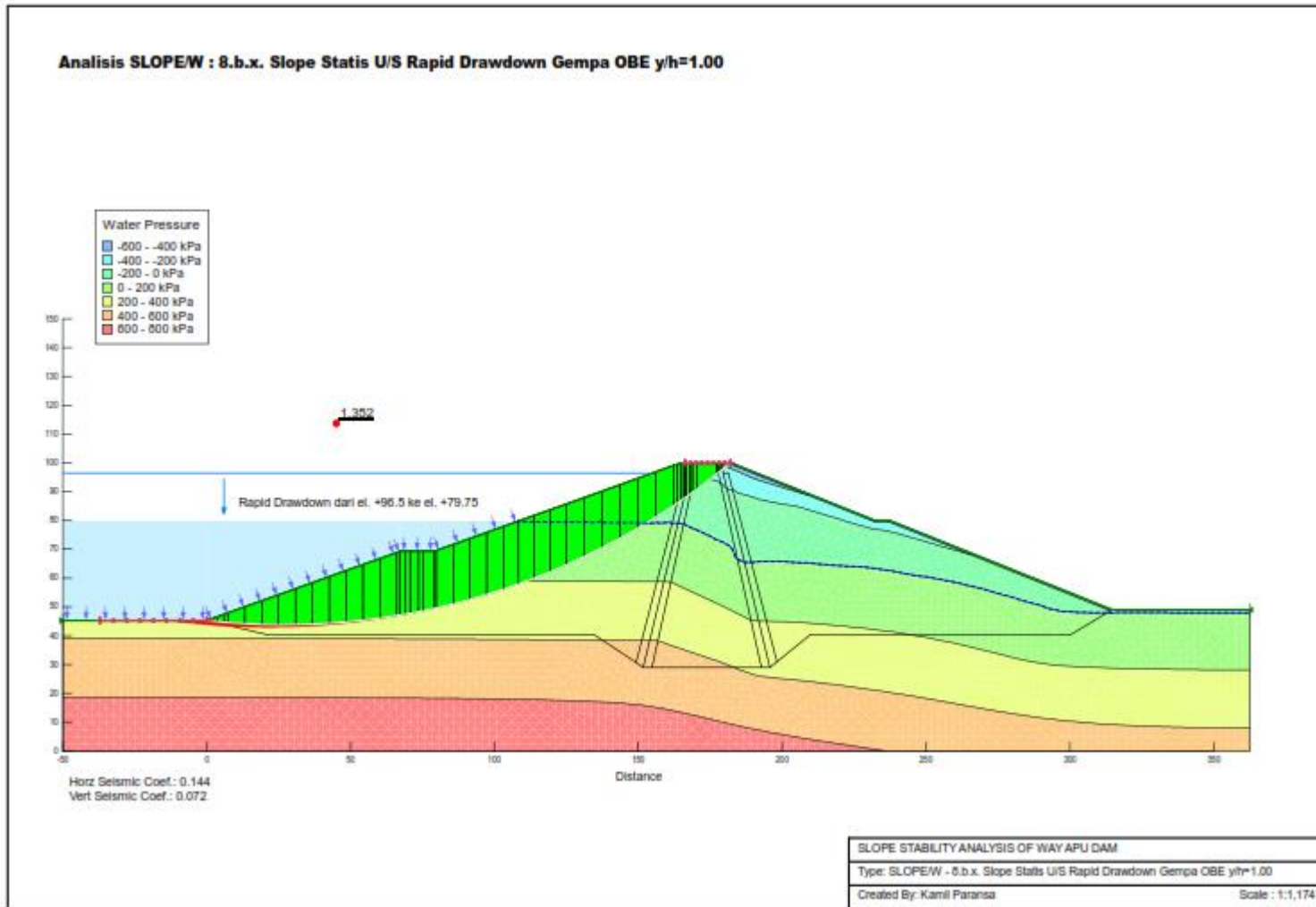


اجتاز استاد بزرگوار

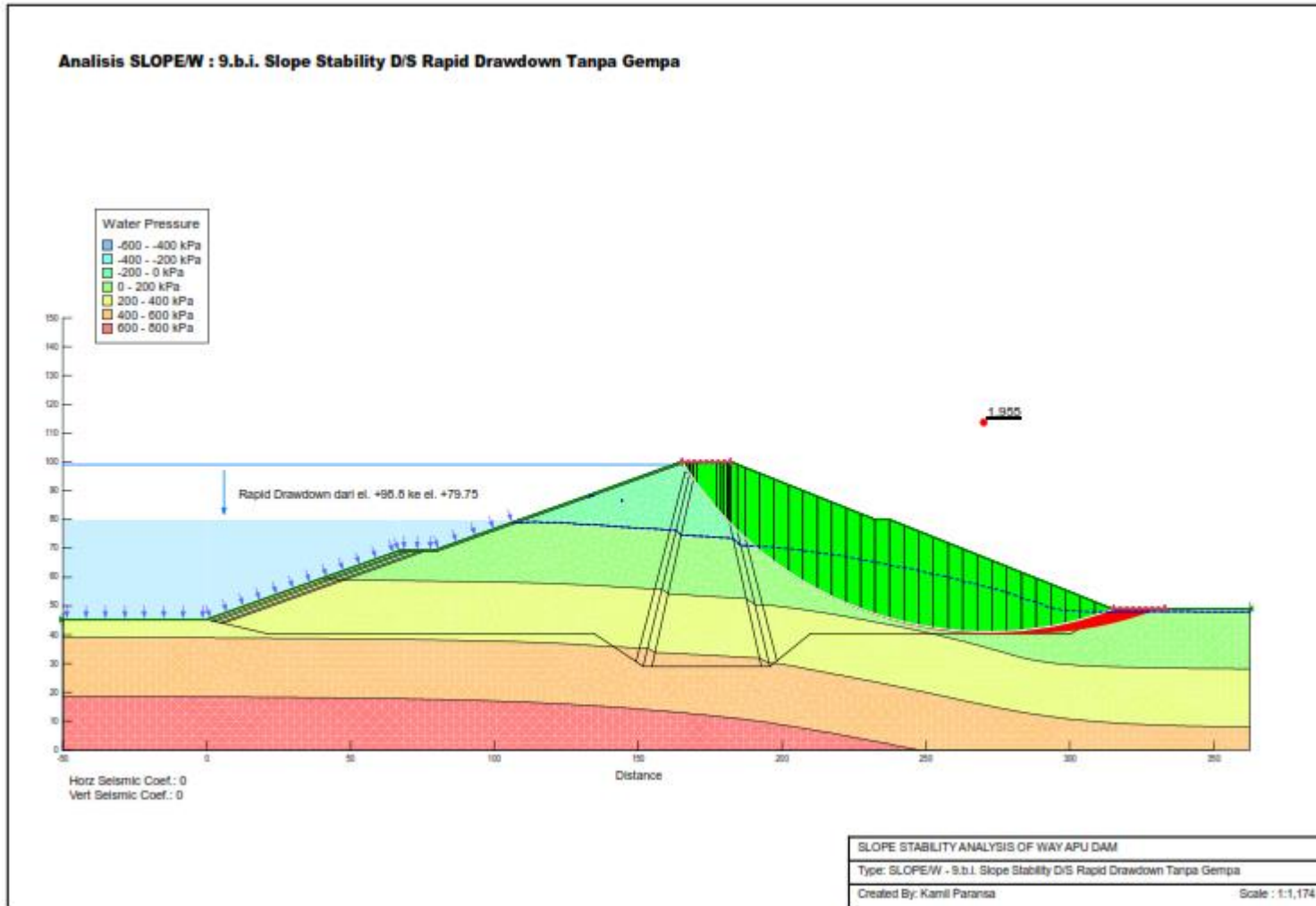




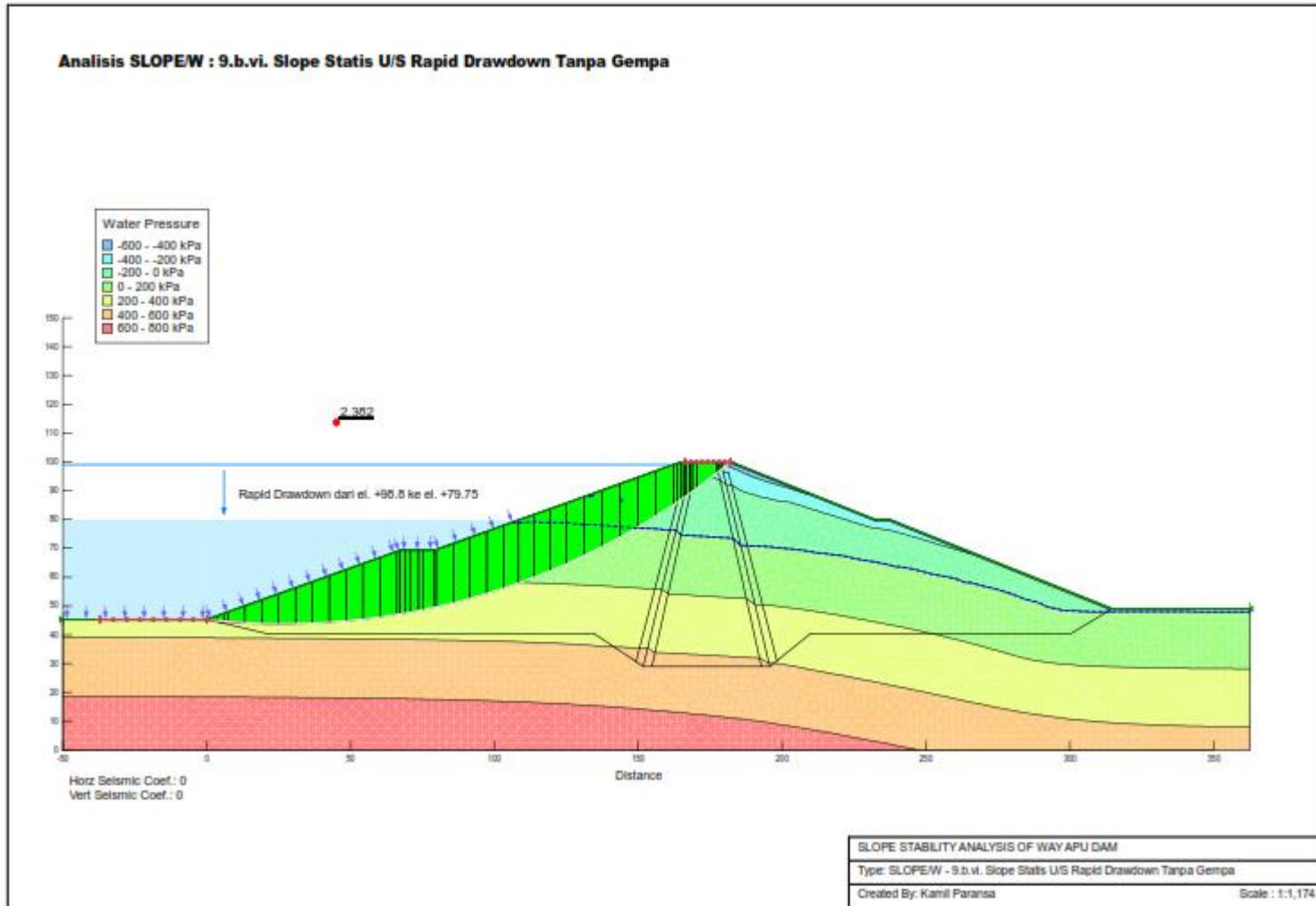
اجتاز استاد ارشد



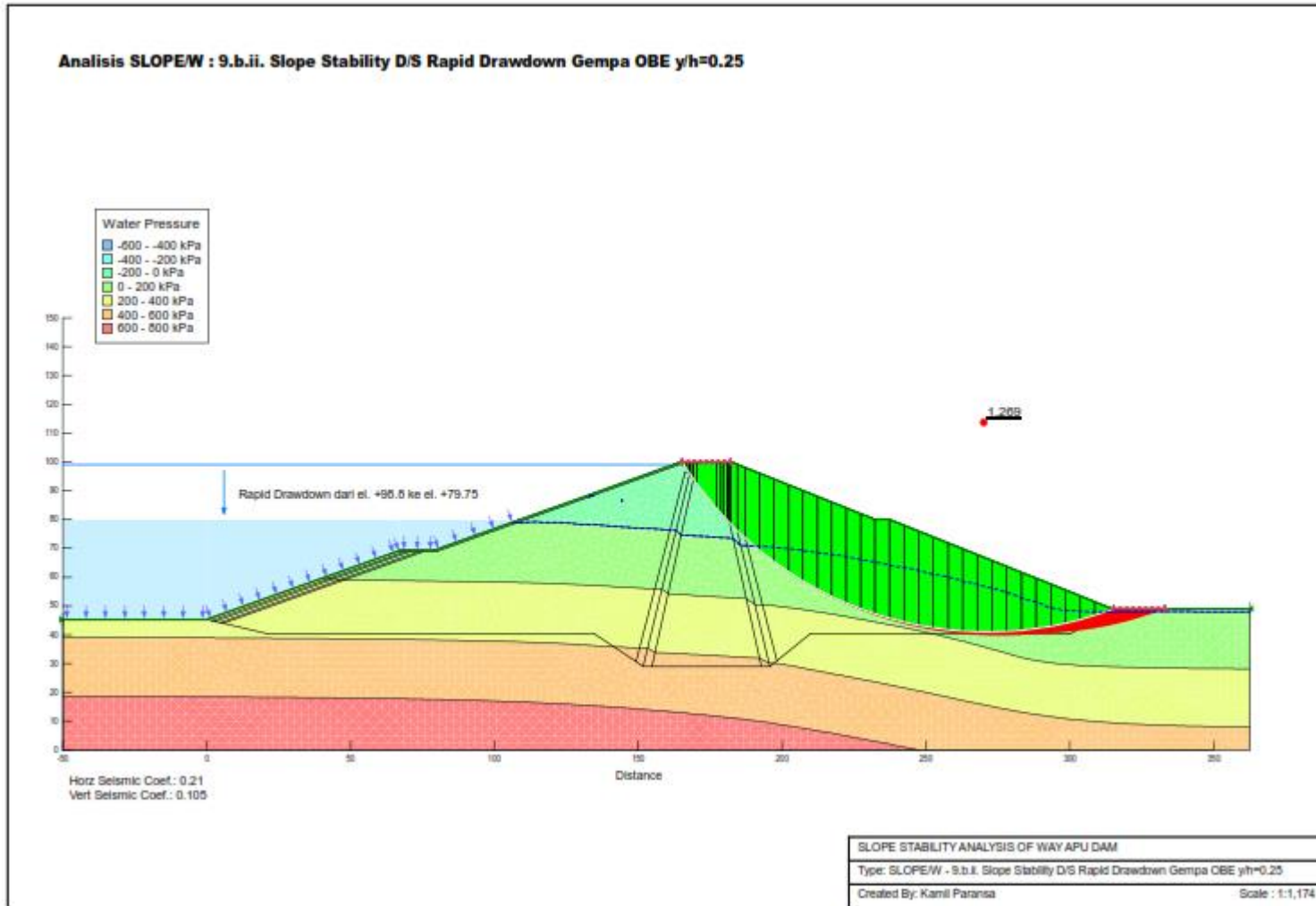
اجتاز استاد بزرگوار



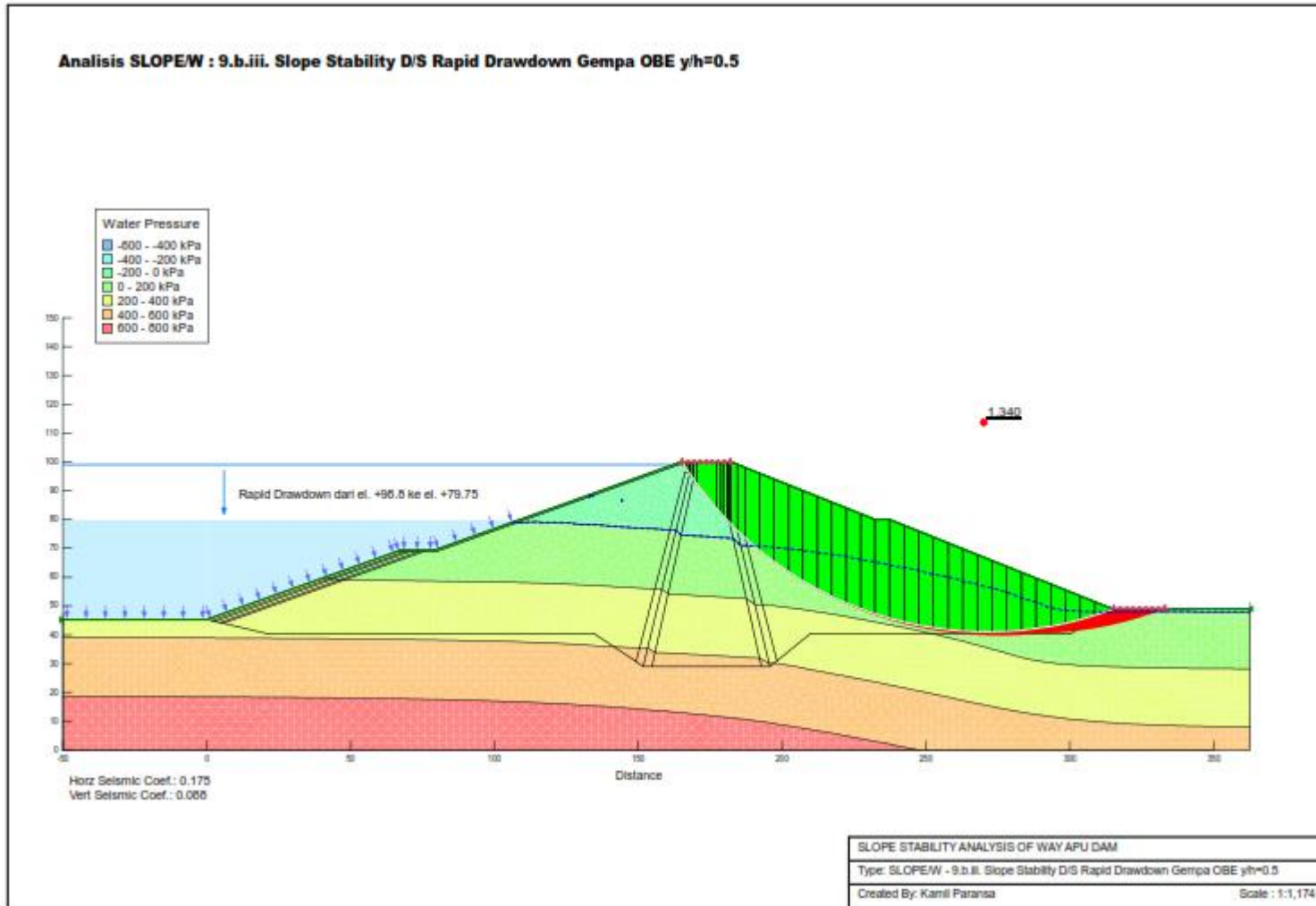
اجتاز استاد ایلدز



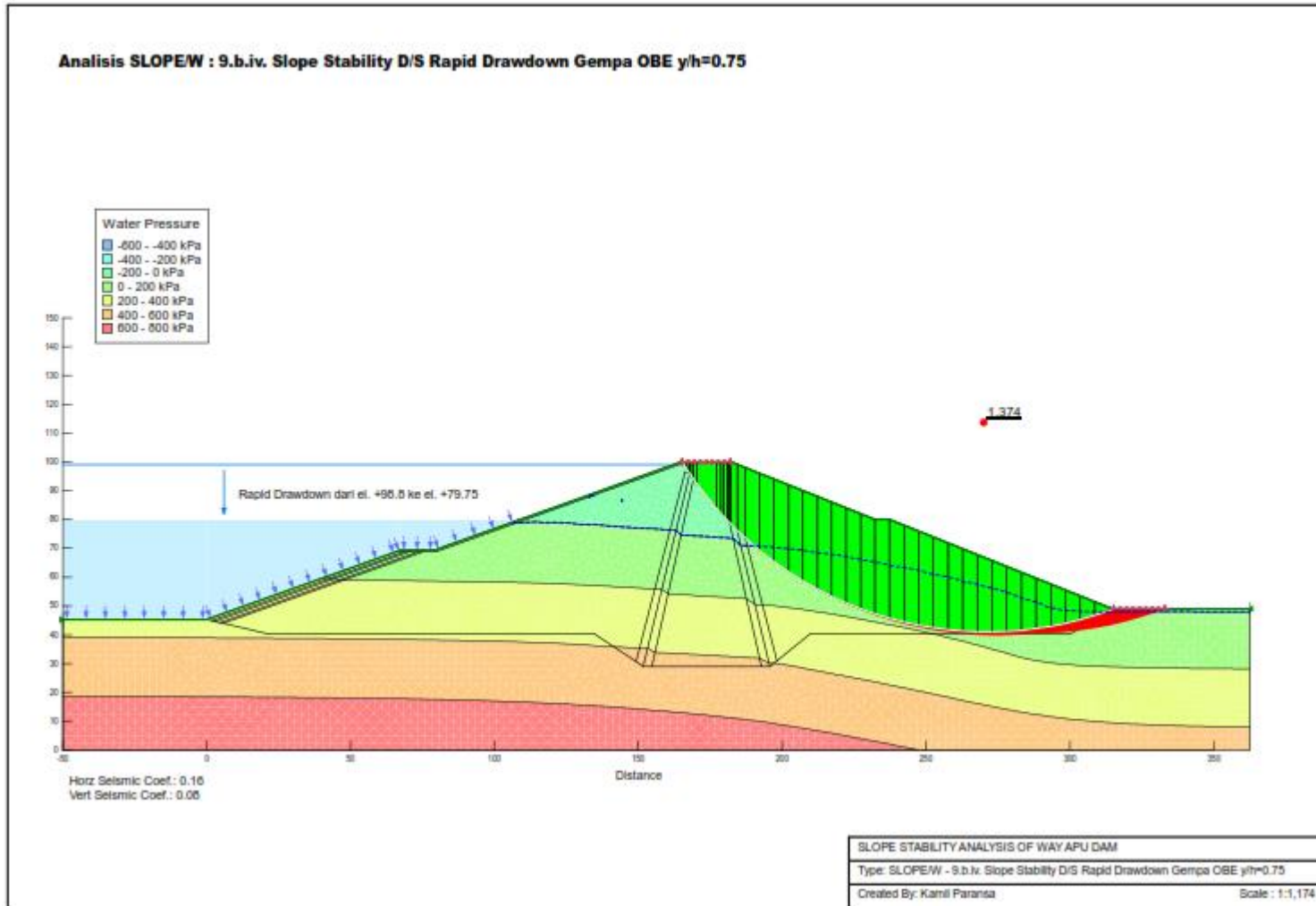
اجتاز استاد بزرگوار



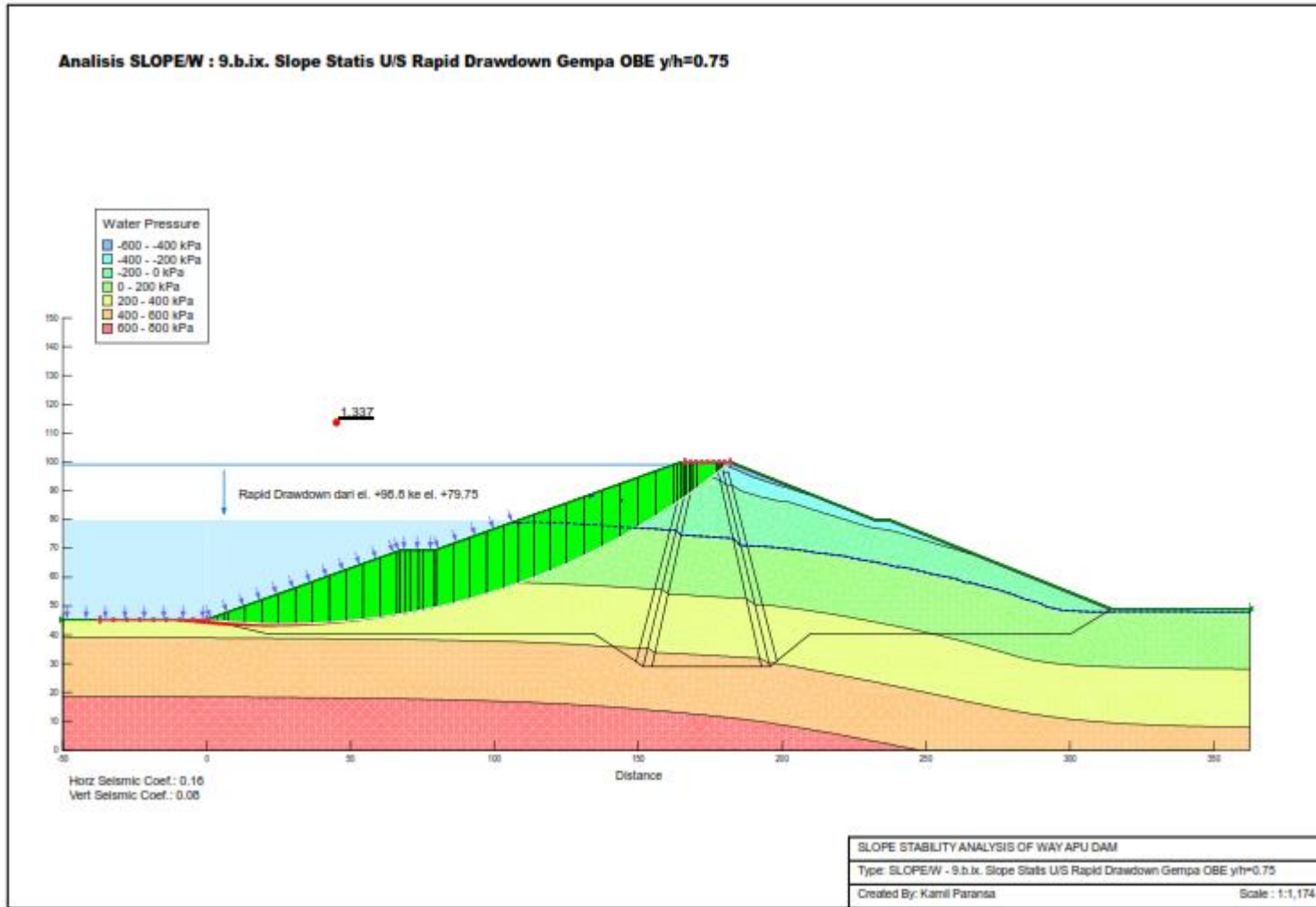
اجتاز استاد ایداد



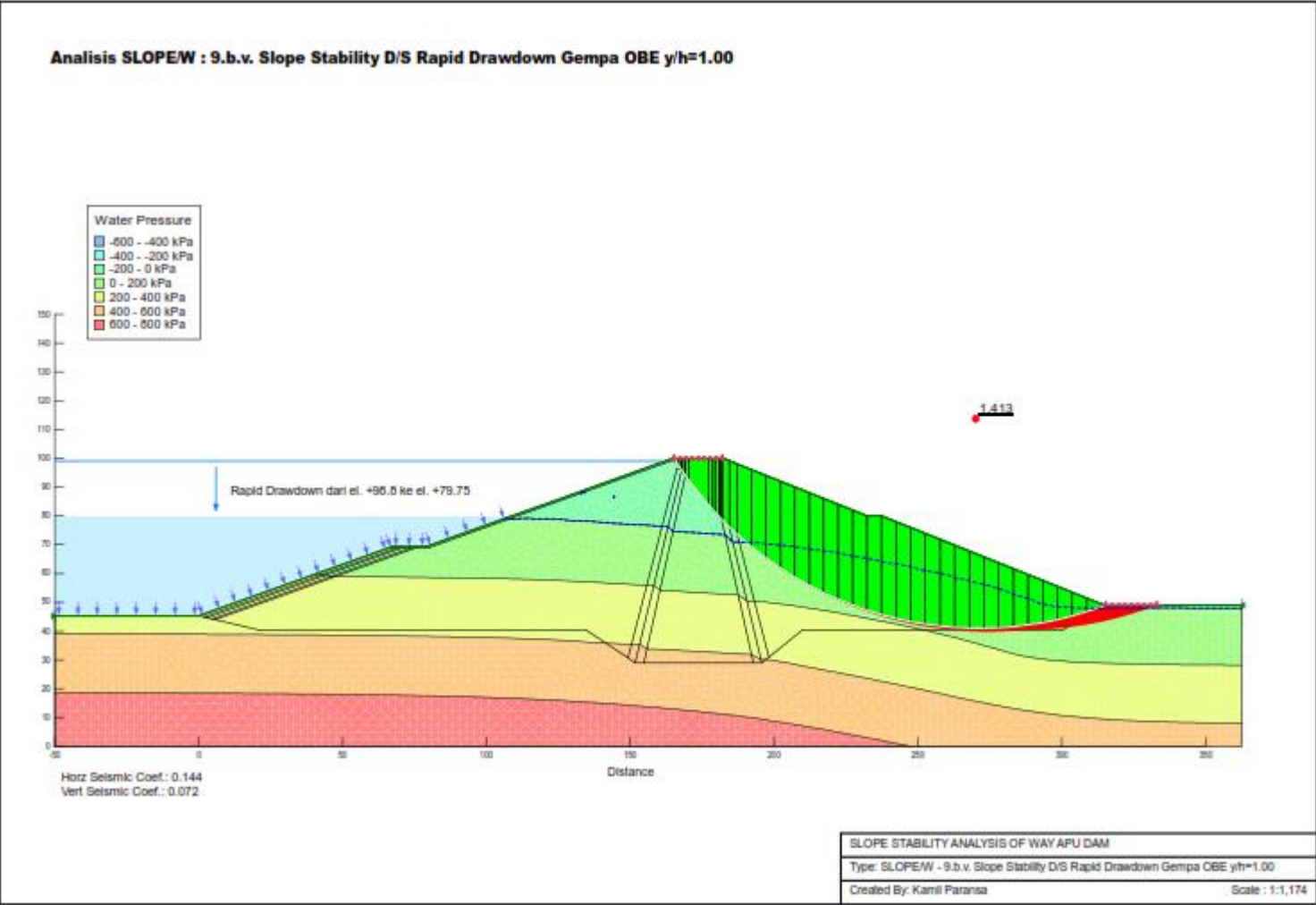
اجتاز استاد ایلدو



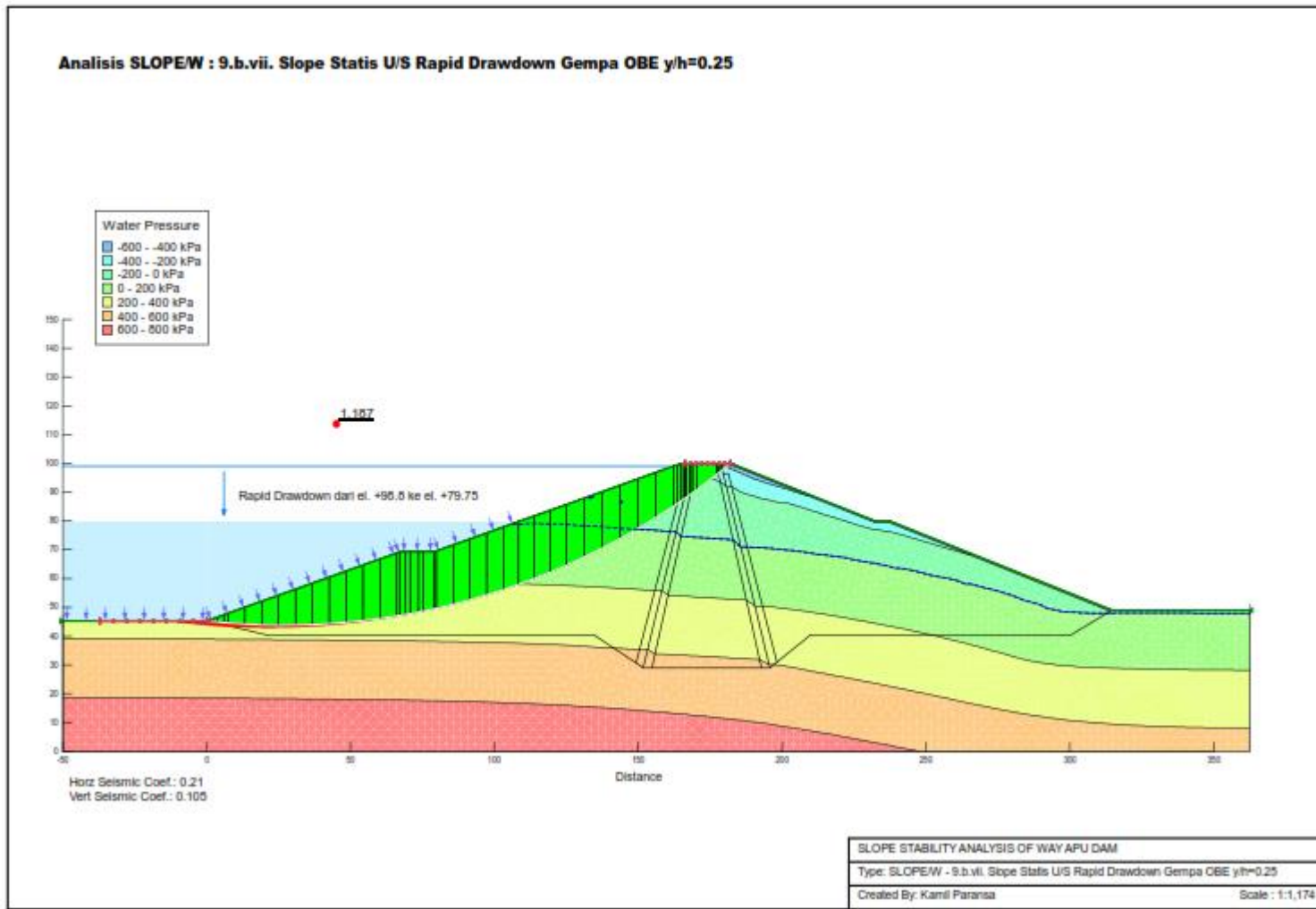
اجتاز استاد ایلدز



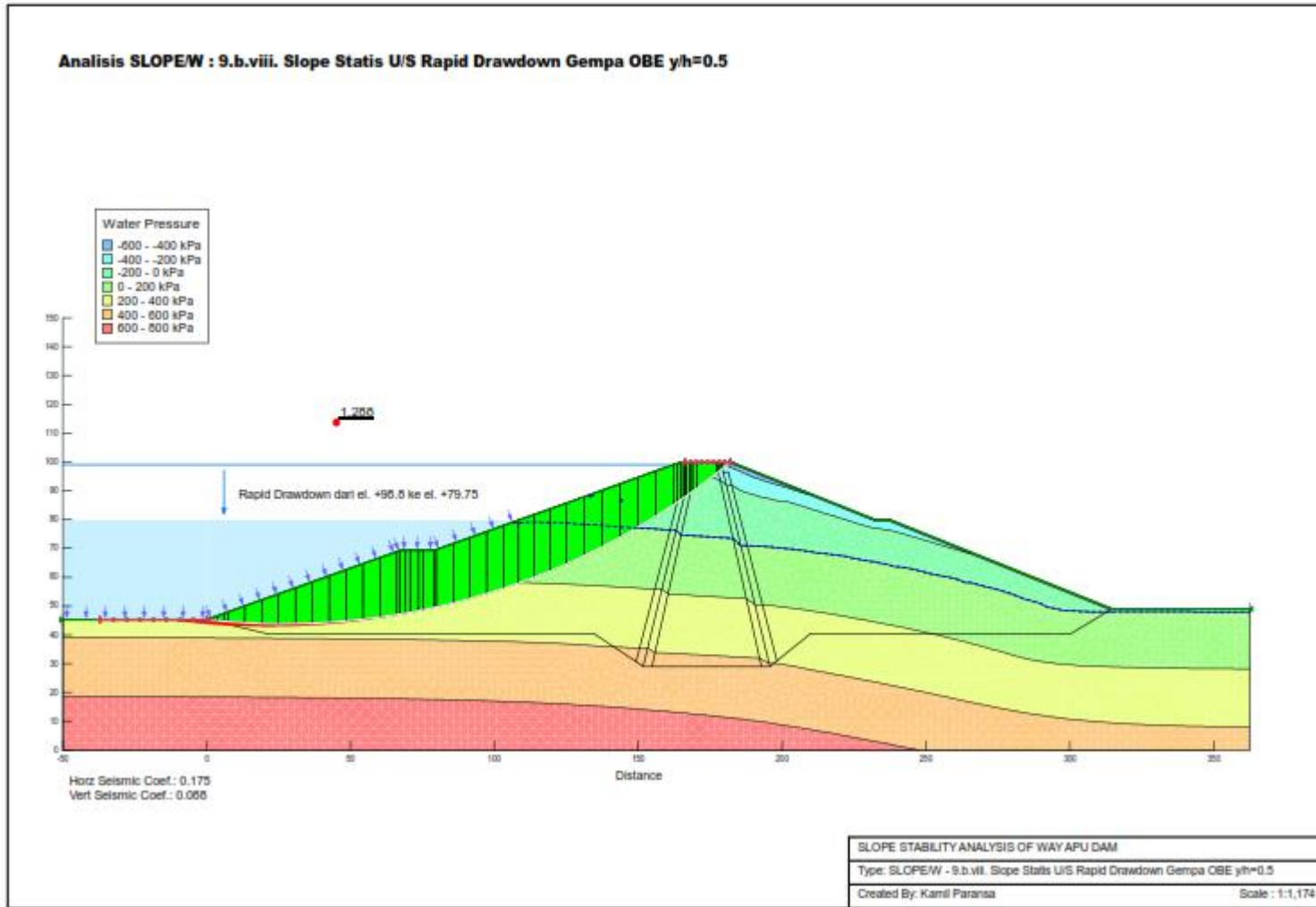
اجتاز استاد بزرگوار



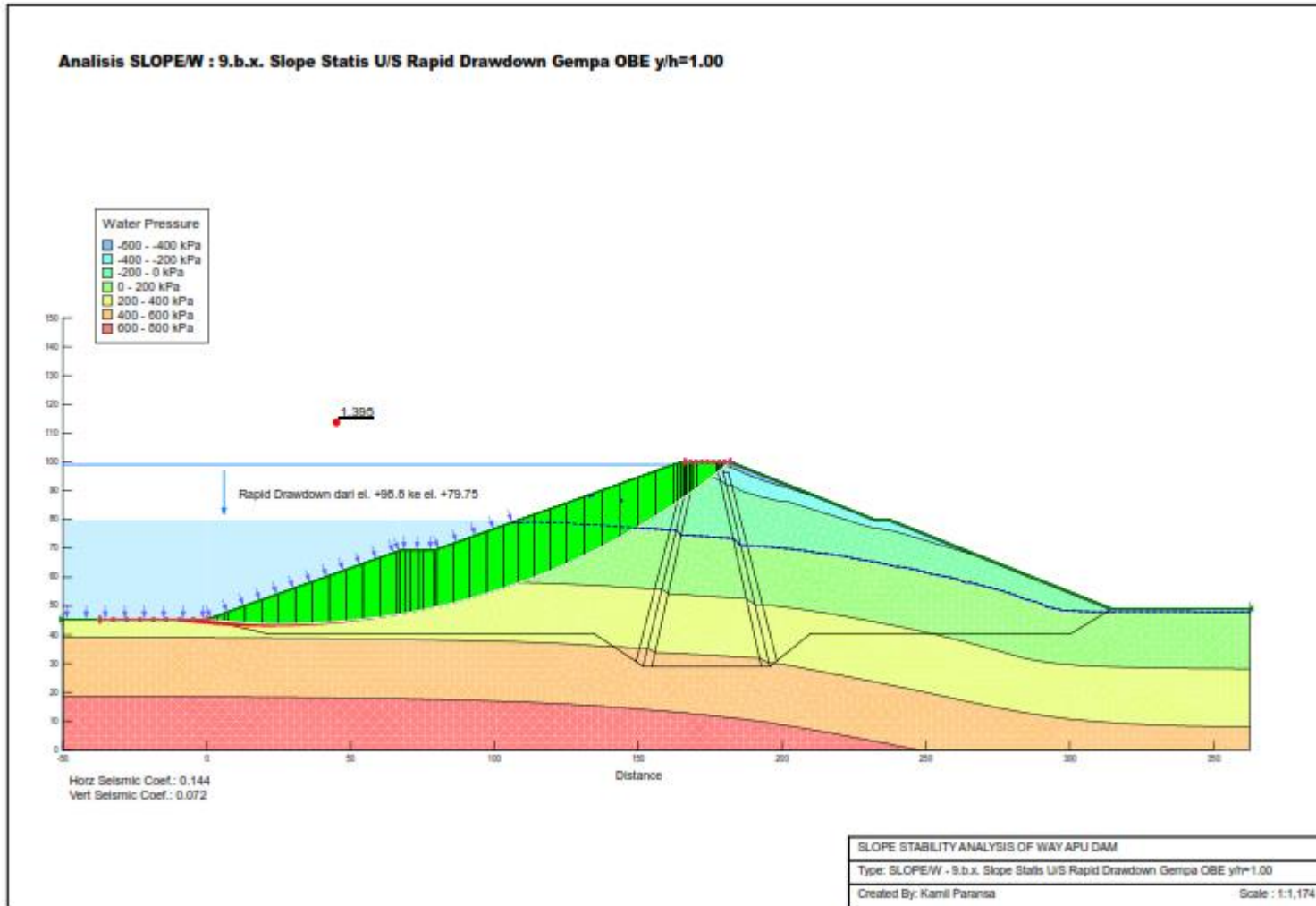
اجتازہ ایسٹڈیا



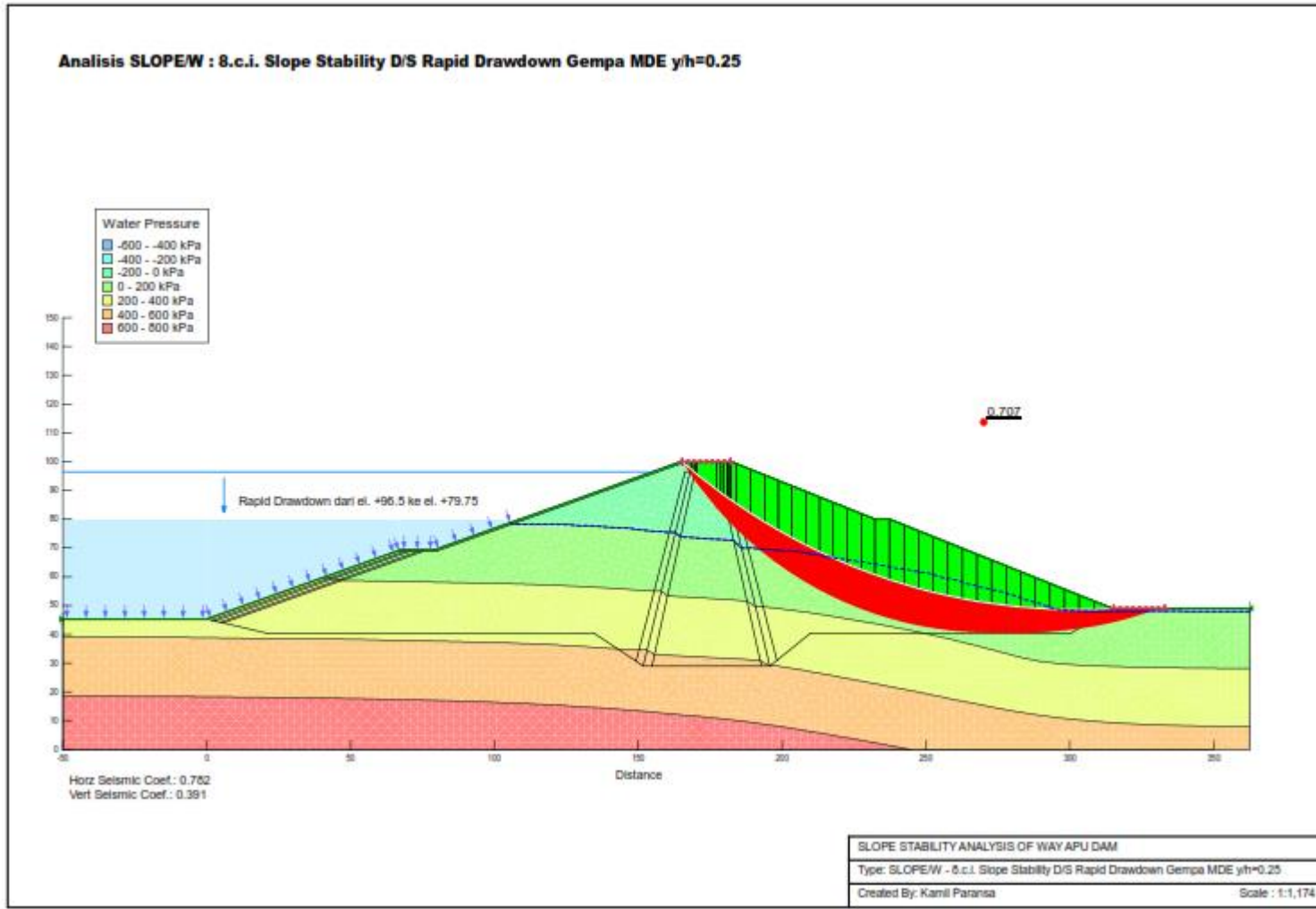
اجتاز استداران



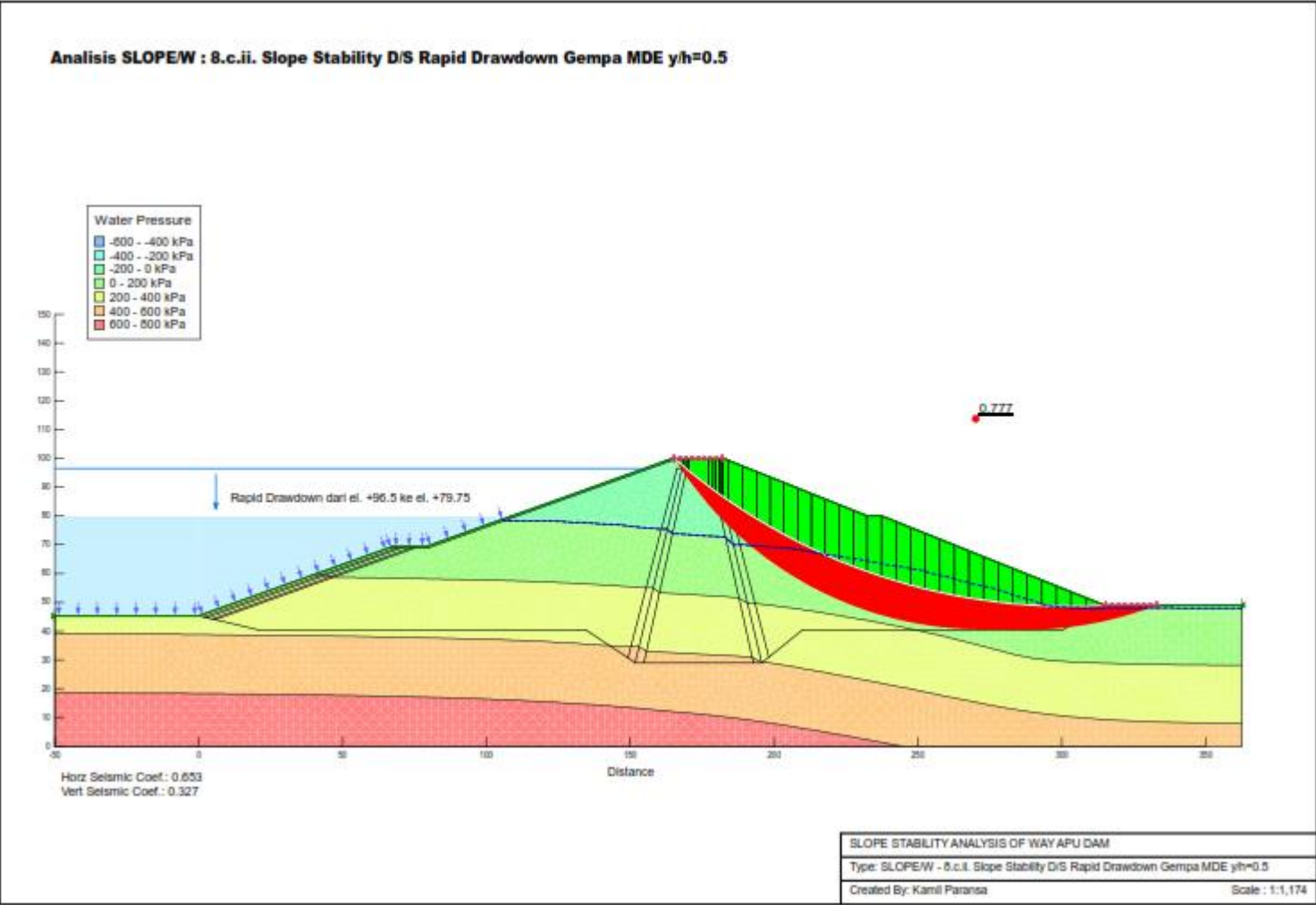
اجتازہ سندھ



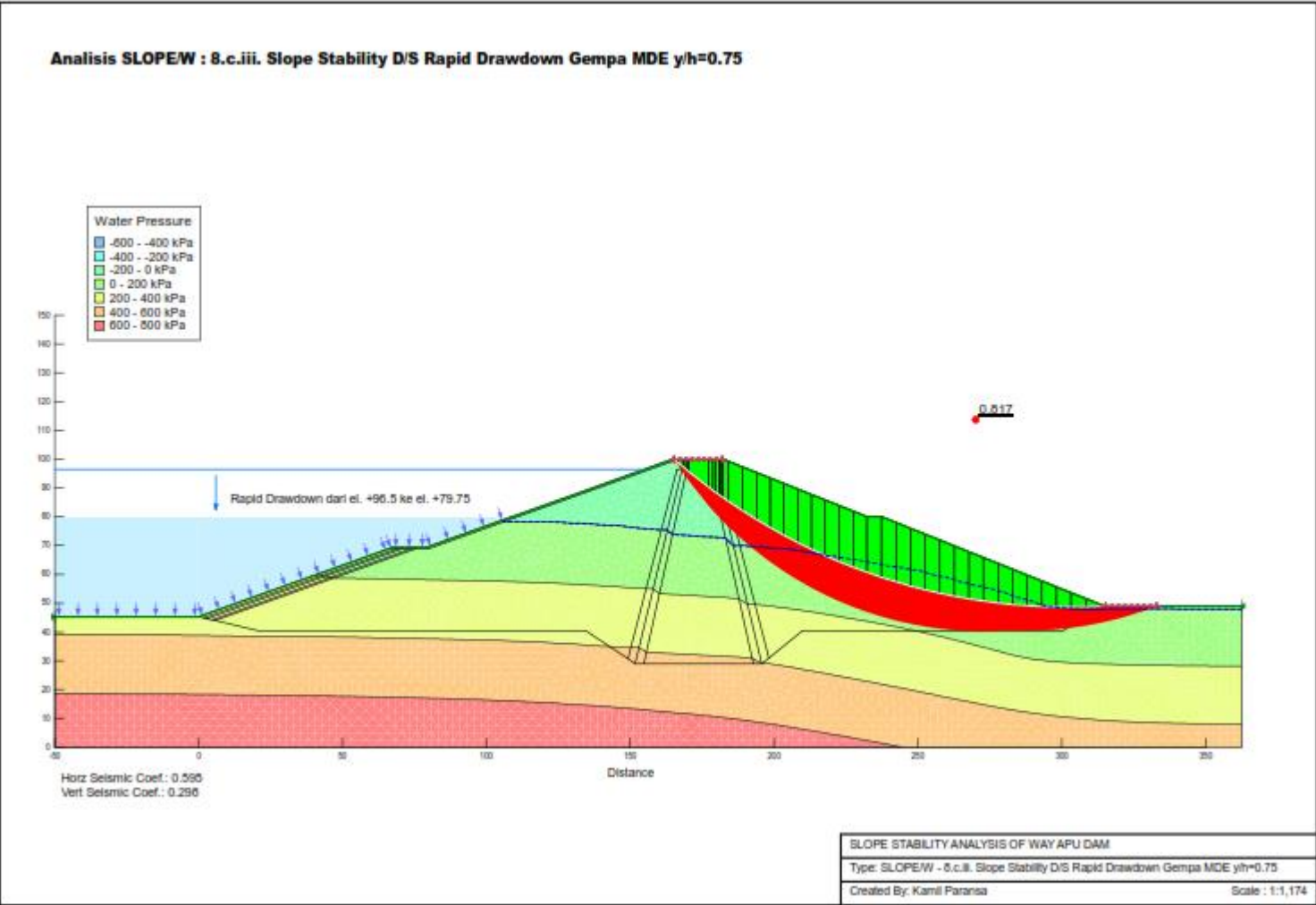
اجتاز استاد بزرگوار



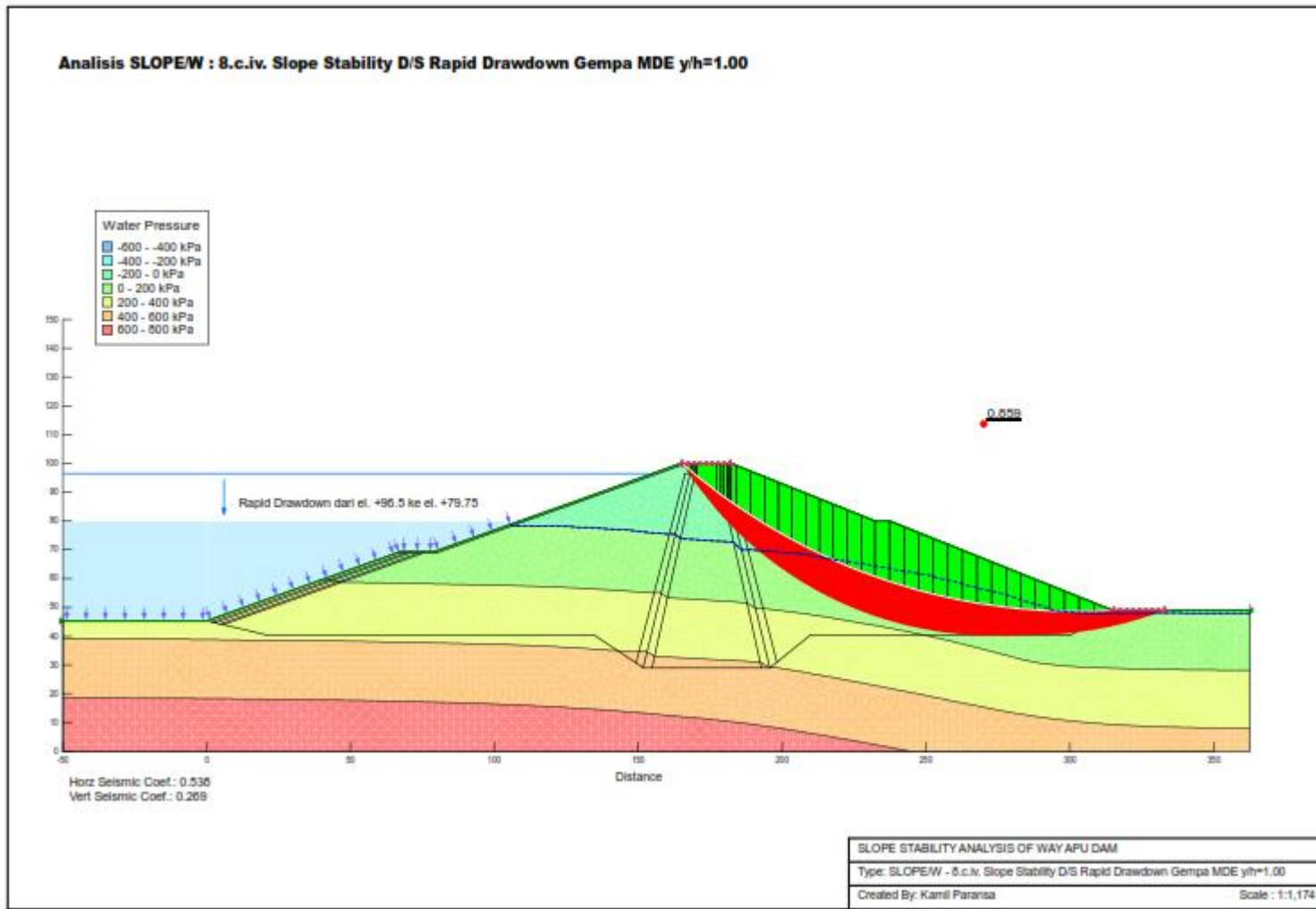
اجتاز استاد ابلاندو



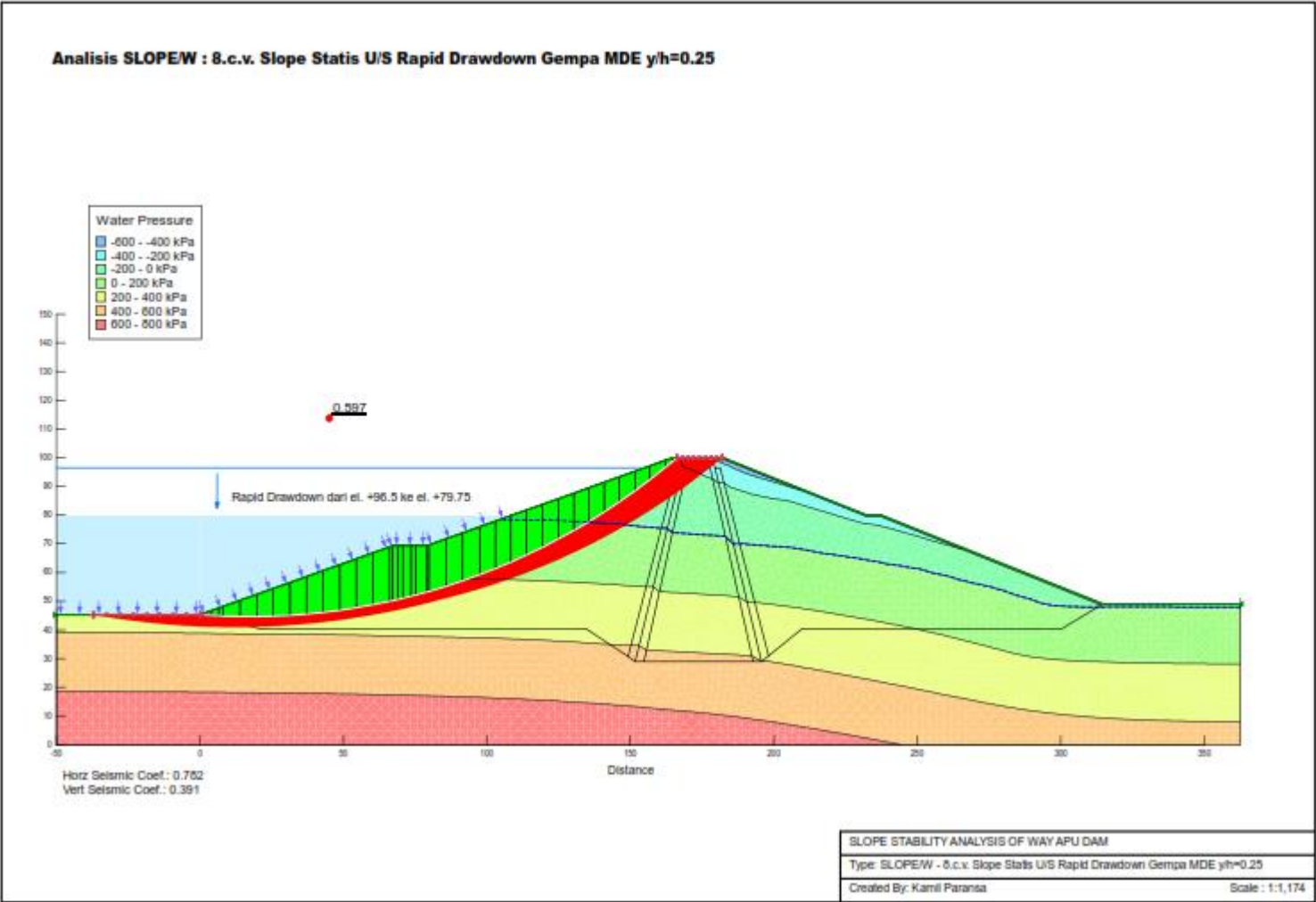
اجتاز استاد ابلاندو



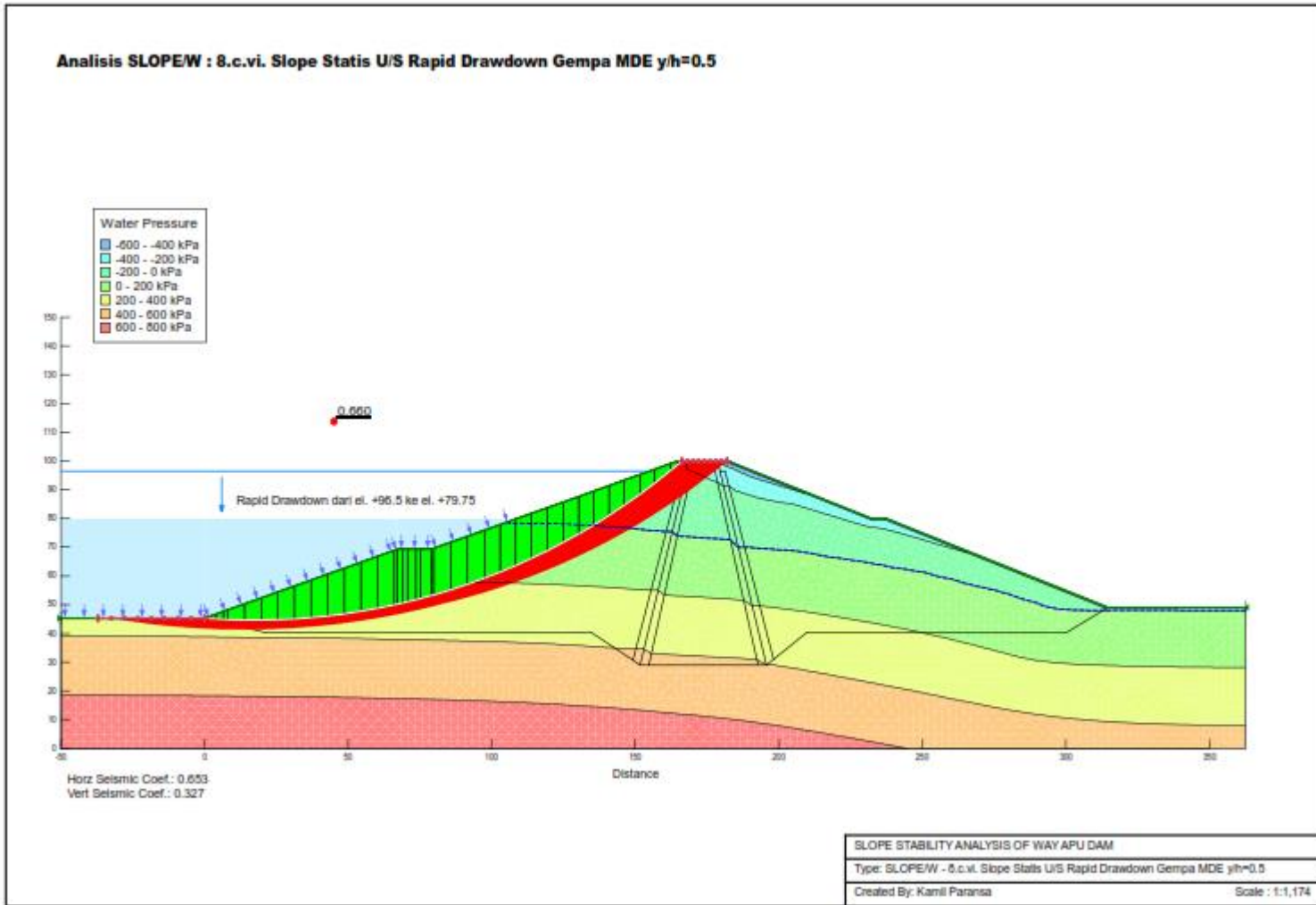
اجتازہ سندھ

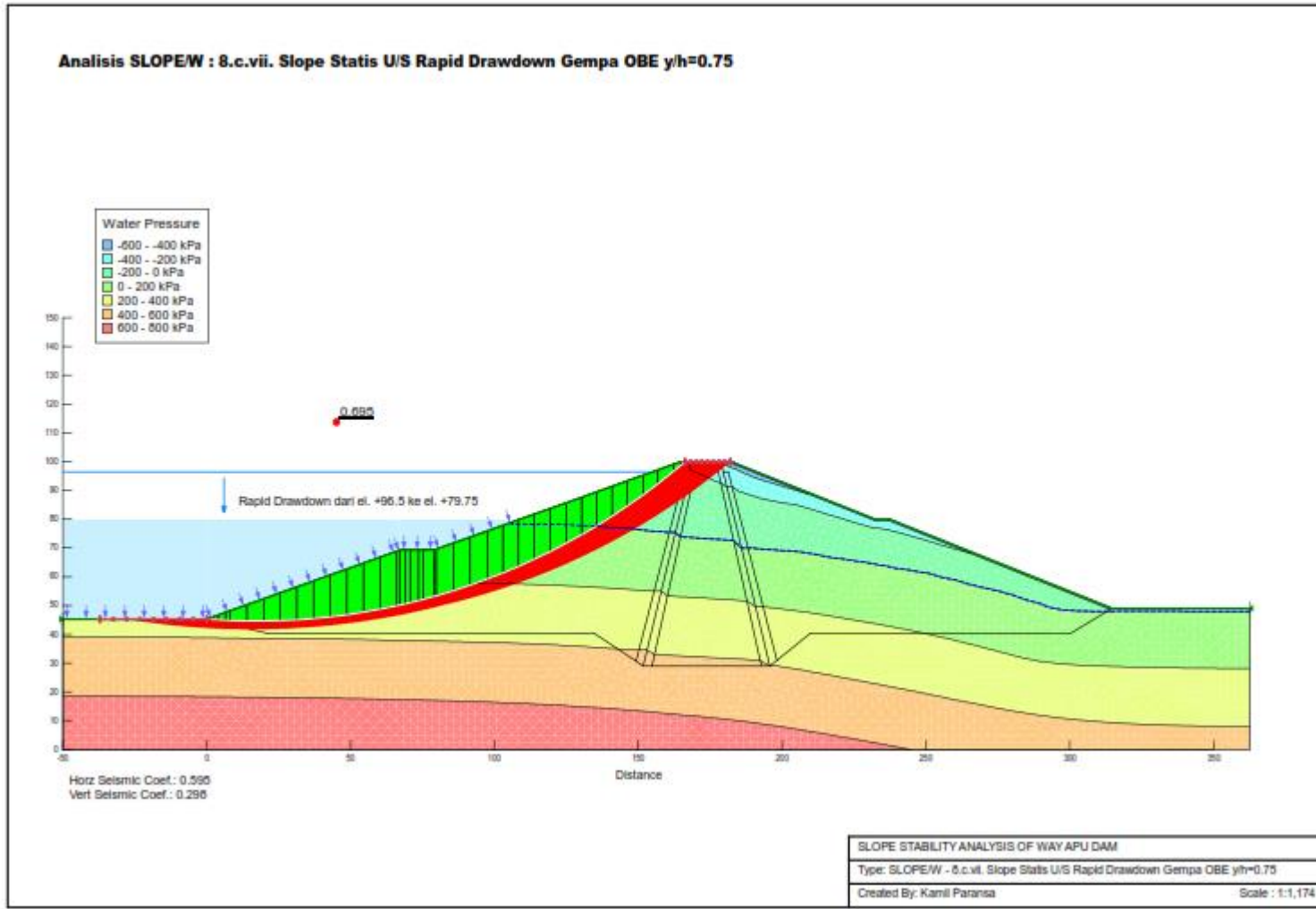


اجتاز استاد ایدو

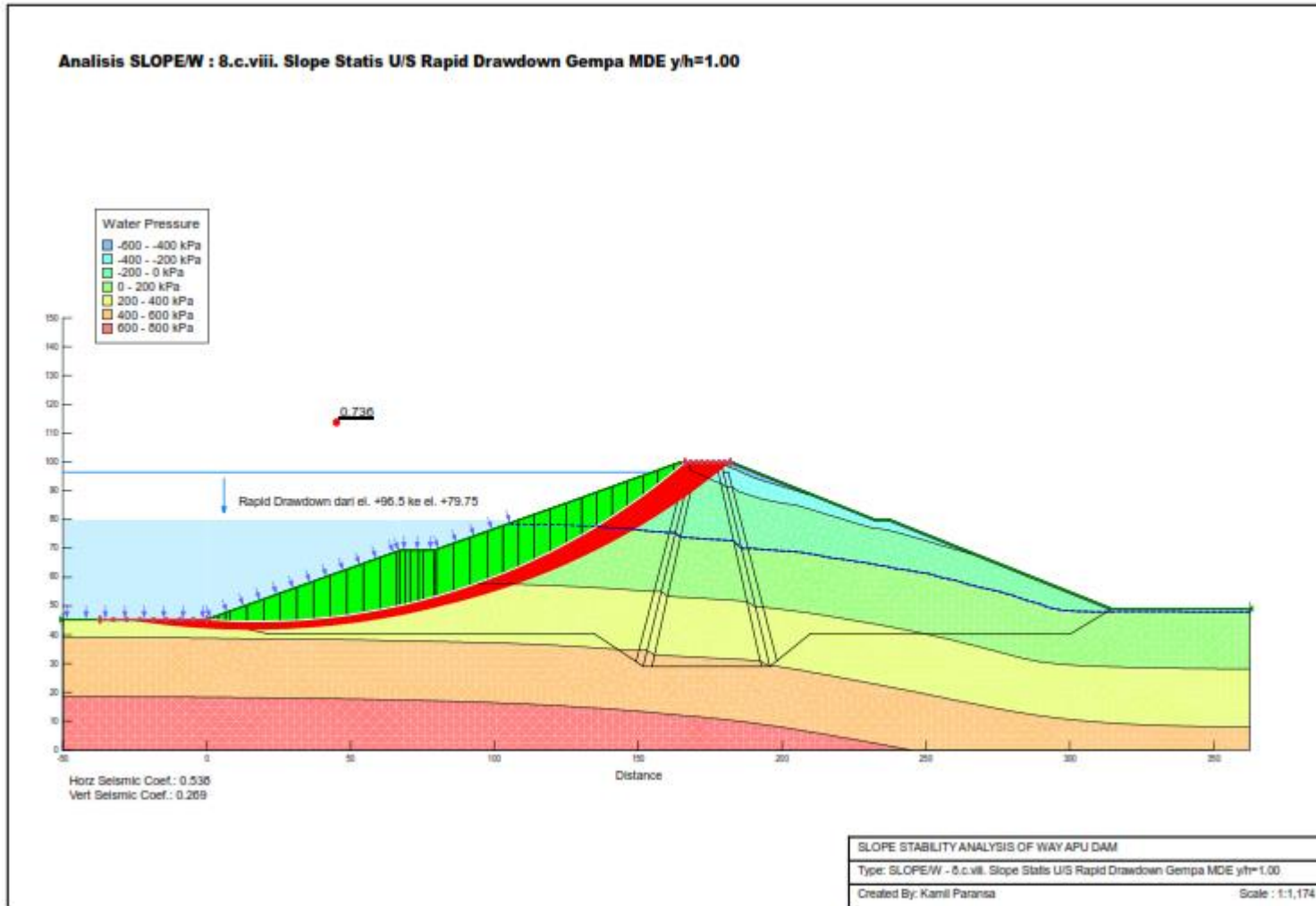


اجتاز استاد بزرگوار





اجتاز استاد ایلانزو



اجتاز استاد ایدو

Lampiran 4 Hasil Analisis Dinamik dengan GeoStudio

Muka Air Normal			Muka Air Kosong			Rapid Draw Down		
Node 742 (170.51479, 100)			Node 742 (170.51479, 100)			Node 742 (170.51479, 100)		
Time (sec)	X-Displacement (m)	Y-Displacement (m)	Time (sec)	X-Displacement (m)	Y-Displacement (m)	Time (sec)	X-Displacement (m)	Y-Displacement (m)
0.200	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000
0.400	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000
0.600	0.000	0.000	0.600	0.000	0.000	0.600	0.000	0.000
0.800	0.000	0.001	0.800	0.000	0.001	0.800	0.000	0.001
1.000	0.000	0.004	1.000	0.000	0.004	1.000	0.000	0.004
1.200	-0.002	0.000	1.200	-0.002	0.000	1.200	-0.002	0.000
1.400	-0.006	-0.018	1.400	-0.007	-0.018	1.400	-0.007	-0.018
1.600	-0.035	-0.037	1.600	-0.037	-0.037	1.600	-0.037	-0.037
1.800	-0.120	-0.069	1.800	-0.123	-0.069	1.800	-0.123	-0.069
2.000	-0.176	-0.098	2.000	-0.178	-0.098	2.000	-0.178	-0.098
2.040	-0.186	-0.102	2.040	-0.188	-0.102	2.040	-0.188	-0.102
2.060	-0.192	-0.104	2.060	-0.194	-0.104	2.060	-0.194	-0.104
2.080	-0.199	-0.105	2.080	-0.200	-0.105	2.080	-0.200	-0.105
2.200	-0.253	-0.104	2.200	-0.253	-0.105	2.200	-0.253	-0.105
2.220	-0.264	-0.104	2.220	-0.264	-0.104	2.220	-0.264	-0.104
2.240	-0.276	-0.104	2.240	-0.276	-0.104	2.240	-0.276	-0.104
2.260	-0.289	-0.104	2.260	-0.288	-0.105	2.260	-0.288	-0.105
2.400	-0.351	-0.119	2.400	-0.348	-0.120	2.400	-0.348	-0.120
2.420	-0.351	-0.122	2.420	-0.348	-0.123	2.420	-0.348	-0.123
2.460	-0.344	-0.126	2.460	-0.340	-0.127	2.460	-0.340	-0.127
2.480	-0.338	-0.128	2.480	-0.334	-0.128	2.480	-0.334	-0.128
2.600	-0.281	-0.119	2.600	-0.276	-0.118	2.600	-0.276	-0.118
2.640	-0.265	-0.115	2.640	-0.260	-0.115	2.640	-0.260	-0.115
2.800	-0.280	-0.144	2.800	-0.279	-0.144	2.800	-0.279	-0.144
3.000	-0.288	-0.098	3.000	-0.284	-0.097	3.000	-0.284	-0.097
3.200	-0.208	-0.052	3.200	-0.204	-0.049	3.200	-0.204	-0.049
3.300	-0.174	-0.037	3.300	-0.169	-0.037	3.300	-0.169	-0.037
3.400	-0.132	-0.041	3.400	-0.127	-0.044	3.400	-0.127	-0.044
3.600	-0.006	-0.046	3.600	-0.008	-0.049	3.600	-0.008	-0.049
3.800	0.020	-0.010	3.800	0.011	-0.007	3.800	0.011	-0.007
4.000	0.035	0.035	4.000	0.028	0.039	4.000	0.028	0.039
4.200	-0.010	0.053	4.200	-0.013	0.048	4.200	-0.013	0.048
4.280	0.003	0.042	4.280	0.002	0.038	4.280	0.002	0.038
4.400	0.025	0.022	4.400	0.024	0.020	4.400	0.024	0.020
4.600	0.010	0.010	4.600	0.009	0.013	4.600	0.009	0.013
4.700	0.002	0.001	4.700	0.000	0.003	4.700	0.000	0.003
4.800	-0.001	0.009	4.800	-0.004	0.008	4.800	-0.004	0.008
4.880	-0.005	0.023	4.880	-0.005	0.021	4.880	-0.005	0.021
4.960	-0.021	0.031	4.960	-0.017	0.030	4.960	-0.017	0.030
5.000	-0.034	0.031	5.000	-0.028	0.031	5.000	-0.028	0.031
5.100	-0.070	0.027	5.100	-0.062	0.027	5.100	-0.062	0.027
5.200	-0.098	0.022	5.200	-0.093	0.022	5.200	-0.093	0.022
5.400	-0.042	0.022	5.400	-0.039	0.025	5.400	-0.039	0.025
5.600	-0.012	0.042	5.600	-0.009	0.041	5.600	-0.009	0.041
5.800	0.044	0.118	5.800	0.048	0.116	5.800	0.048	0.116
6.000	0.188	0.153	6.000	0.193	0.147	6.000	0.193	0.147
6.200	0.306	0.125	6.200	0.301	0.128	6.200	0.301	0.128
6.400	0.300	0.137	6.400	0.286	0.145	6.400	0.286	0.145
6.600	0.233	0.177	6.600	0.226	0.177	6.600	0.226	0.177
6.800	0.207	0.137	6.800	0.210	0.128	6.800	0.210	0.128
7.000	0.145	0.078	7.000	0.143	0.072	7.000	0.143	0.072
7.200	0.060	0.091	7.200	0.058	0.099	7.200	0.058	0.099
7.400	0.020	0.156	7.400	0.023	0.164	7.400	0.023	0.164
7.600	0.071	0.167	7.600	0.080	0.160	7.600	0.080	0.160
7.800	0.136	0.120	7.800	0.149	0.115	7.800	0.149	0.115
8.000	0.191	0.102	8.000	0.192	0.113	8.000	0.192	0.113
8.200	0.217	0.125	8.200	0.212	0.128	8.200	0.212	0.128
8.400	0.196	0.104	8.400	0.192	0.091	8.400	0.192	0.091
8.600	0.103	0.081	8.600	0.094	0.078	8.600	0.094	0.078
8.800	-0.018	0.086	8.800	-0.030	0.094	8.800	-0.030	0.094
9.000	-0.063	0.088	9.000	-0.065	0.092	9.000	-0.065	0.092
9.100	-0.073	0.084	9.100	-0.072	0.080	9.100	-0.072	0.080
9.200	-0.089	0.065	9.200	-0.083	0.057	9.200	-0.083	0.057
9.400	-0.066	0.060	9.400	-0.051	0.054	9.400	-0.051	0.054
9.600	0.014	0.059	9.600	0.021	0.068	9.600	0.021	0.068
9.800	0.064	0.082	9.800	0.065	0.091	9.800	0.065	0.091
10.000	0.090	0.089	10.000	0.097	0.087	10.000	0.097	0.087

