

**EVALUASI KEAMANAN TUBUH BENDUNGAN  
PRA DAN PASCA IMPOUNDING MENGGUNAKAN  
DATA INSTRUMENTASI PADA BENDUNGAN RAKNAMO  
DI PROVINSI NUSA TENGGARA TIMUR**

**TESIS**

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK PENGAIRAN  
KONSENTRASI MANAJEMEN SUMBER DAYA AIR**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Magister Teknik



**DEDY ARDIANTO FALLO**

**NIM. 186060400111012**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2021**

LEMBAR PENGESAHAN

EVALUASI KEAMANAN TUBUH BENDUNGAN  
PRA DAN PASCA IMPOUNDING MENGGUNAKAN  
DATA INSTRUMENTASI PADA BENDUNGAN RAKNAMO  
DI PROVINSI NUSA TENGGARA TIMUR

TESIS

TEKNIK PENGAIRAN

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Magister Teknik



**DEDY ARDIANTO FALLO**  
**NIM : 186060400111012**

Tesis ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
Pada tanggal 20 Juli 2021

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Andre Primantyo H, ST.,MT.  
NIP. 19710312 200112 1 002

Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST.,MT  
NIP. 2011027712032001

Mengetahui

Ketua Program Studi Magister Teknik Pengairan



Dr. Eng. Ir. Rivanto Harbowo, ST., MT.,IPM.  
NIP. 19770424 200312 1 001





*Ucapan Terima Kasih Kepada  
Kedua Orangtua dan Adik - adik Tercinta  
Atas Do'a, Motivasi, Serta Dukungannya*

*Saya akan belajar dan berusaha seperti bayi,  
terus berusaha hingga sampai bisa berdiri.*

## PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam Naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku. (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 20 Juli 2021

Mahasiswa,



Dedy Ardianto Fallo

186060400111012



**DAFTAR RIWAYAT HIDUP****1. Biodata**

Nama : Dedy Ardianto Fallo

Tempat/Tanggal Lahir : Kupang, 24 Desember 1992

Agama : Kristen Protestan

Orang Tua:

Ayah : Yunus Fallo

Ibu : Victoria Lily

Anak ke : 1 dari 4 Bersaudara

Alamat : Jln. David Tobo, RT.031/RW.008, Kel. Lasiana, Kota Kupang

Nomor HP : 081231948964

Email : dedyfallo6@gmail.com

**2. Riwayat Pendidikan**

Sekolah Dasar : SD Inpres Lasiana (1998-2004)

Sekolah Menengah Pertama : SMP Negeri 10 Kupang (2004-2007)

Sekolah Menengah Kejuruan : SMK Negeri 2 Kupang (2007-2010)

Perguruan Tinggi : D3 – Jurusan Teknik Sipil/Bangunan Air, Politeknik Negeri Kupang (2010-2013)

S1 – Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya – Malang (2014-2016)

S2 – Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya – Malang (2018-2021)



## RINGKASAN

**Dedy Ardianto Fallo**, Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Evaluasi Keamanan Tubuh Bendungan Pra dan Pasca Impounding Menggunakan Data Instrumentasi pada Bendungan Raknamo di Propinsi Nusa Tenggara Timur*, Dosen Pembimbing : Dr.Eng. Andre Primantyo H, ST.,MT. dan Dr.Eng. Evi Nur Cahya, ST.,MT.

Keamanan pada bendungan tipe urugan sangat penting, maka perlu dilakukan pengecekan mengenai kinerja dan perilaku bendungan dengan cara pengamatan menggunakan peralatan atau instrumen. Instrumentasi dapat memberikan data evaluasi dalam program pemantauan dan pengawasan keamanan bendungan untuk keperluan pada masa mendatang. Ketika muka air waduk tinggi maka akan mempengaruhi semakin besar tekanan air pori dan juga akan berdampak pada peningkatan debit rembesan serta dapat mempengaruhi terjadinya *settlement* pada tubuh bendungan. Sehingga Tesis ini akan membahas keamanan bendungan sampai pada saat pola operasi waduk itu dilakukan.

Tesis ini ditulis untuk dapat mengevaluasi pola tekanan air pori, rembesan dan *settlement* yang terjadi pada tubuh bendungan Raknamo setelah konstruksi berdasarkan data instrumentasi dan hasil analisis *numeric*. Hasil analisis juga akan dievaluasi terhadap keamanan tubuh bendungan saat terjadi rembesan, *settlement*, dan kestabilan lereng. Analisis *numeric* yang dilakukan untuk mengetahui pola tekanan air pori, rembesan, *settlement*, dan kestabilan lereng pada tubuh bendungan Raknamo menggunakan aplikasi Geostudio 2012.

Berdasarkan hasil analisis *numeric* maupun *actual* di daerah studi pola tekanan air pori memiliki bentuk parabola terbuka ke bawah pada penampang MD.10, untuk instrumen (VP.05 - VP.09) mempunyai tren sama dengan perubahan muka air di waduk, sedangkan untuk instrumen (VP.10, VP.11) mempunyai tren yang berbeda dengan perubahan muka air di waduk. Sedangkan Pola tekanan air pori pada penampang MD.16 untuk instrumen (VP.05, VP.07, VP.09, VP.11) memiliki tren yang sama dengan perubahan muka air di waduk, sedangkan instrumen (VP.06, VP.08, VP.10, VP.12, VP.13, VP.14, VP.15) memiliki tren yang berbeda dengan perubahan muka air di waduk. Pola rembesan pada tubuh bendungan berdasarkan hasil *numeric* memiliki bentuk parabola terbuka ke bawah dan juga mempunyai tren yang sama dengan perubahan muka air di waduk, sedangkan hasil *actual* memiliki tren yang sedikit berbeda dengan perubahan muka air di waduk. Pola *settlement* pada penampang MD.11 untuk instrumen (SP.01, PM.01, PM.02) memiliki bentuk linear dan mempunyai tren cenderung sama selama 2 tahun, untuk instrumen (PM.03, PM.04, PM.05) memiliki tren cenderung berbeda selama 1,3 tahun. Sedangkan Pola *settlement* pada penampang MD.17 untuk instrumen (SP.01, PM.01, PM.02) mempunyai tren yang sama selama 2 tahun, untuk instrumen (PM.03, PM.04, PM.05) mempunyai tren yang berbeda selama 1,8 tahun. Evaluasi keamanan terhadap rembesan, *settlement* dan stabilitas lereng yang terjadi pada tubuh bendungan Raknamo masih dalam kondisi aman karena tidak melewati batas keamanan yang diijinkan.

Kata kunci: bendungan Raknamo, tekanan air pori, rembesan, *settlement*, GeoStudio 2012



## SUMMARY

**Dedy Ardianto Fallo**, Department of Water Engineering, Faculty of Engineering Universitas Brawijaya, July 2021, Dam Body Safety Evaluation Pre and Post Impounding Use Instrumentation Data on Raknamo Dam in East Nusa Tenggara Province, Academic Supervisor: Dr.Eng. Andre Primantyo H, ST., MT. and Dr.Eng. Evi Nur Cahya, ST., MT.

*The safety of the embankment type dam is very important, so it is necessary to check the performance and behavior of the dam by observing using equipment or instruments. Instrumentation can provide evaluation data in the dam safety monitoring and supervision program for future purposes. When the reservoir water level is high, it will affect the greater the pore water pressure and will also have an impact on increasing the seepage discharge and can affect the settlement of the dam body. So this thesis will discuss the safety of the dam until the reservoir operation pattern is carried out.*

*This thesis was written to evaluate the pattern of pore water pressure, seepage and settlement that occurs in the body of the Raknamo dam after construction based on instrumentation data and numerical analysis results. The results of the analysis will also be evaluated on the safety of the dam body during seepage, settlement, and slope stability. Numerical analysis was carried out to determine the pattern of pore water pressure, seepage, settlement, and slope stability on the body of the Raknamo dam using the 2012 Geostudio application.*

*Based on the results of numerical and actual analysis in the study area, the pore water pressure pattern has a parabolic shape that opens downwards at a cross section of MD.10, for instruments (VP.05 - VP.09) it has the same trend as changes in water level in the reservoir, while for instruments (VP.05 - VP.09) VP.10, VP.11) has a different trend with changes in water level in the reservoir. While the pore water pressure pattern on the MD.16 cross section for the instrument (VP.05, VP.07, VP.09, VP.11) has the same trend as changes in the water level in the reservoir, while the instrument (VP.06, VP.08, VP.10, VP.12, VP.13, VP.14, VP.15) have different trends with changes in water level in the reservoir. The seepage pattern on the dam body based on numerical results has a parabolic shape that opens downwards and also has the same trend as changes in water level in the reservoir, while the actual results have a slightly different trend from changes in water level in the reservoir. The settlement pattern on the MD.11 cross section for instruments (SP.01, PM.01, PM.02) has a linear shape and has a trend that tends to be the same for 2 years, for instruments (PM.03, PM.04, PM.05) it has a trend tends to be different for 1.3 years. While the settlement pattern on the cross section of MD.17 for instruments (SP.01, PM.01, PM.02) has the same trend for 2 years, for instruments (PM.03, PM.04, PM.05) has a different trend for 1.8 years. The safety evaluation of seepage, settlement and slope stability that occurs in the body of the Raknamo dam is still in a safe condition because it does not exceed the allowable safety limit.*

**Keywords:** Raknamo dam, pore water pressure, seepage, settlement, GeoStudio 2012



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah mencurahkan rahmat, serta perlindungan-Nya sehingga penyusun dapat menyelesaikan Laporan Tesis dengan Judul “Evaluasi Keamanan Tubuh Bendungan Pra dan Pasca Impounding Menggunakan Data Instrumentasi pada Bendungan Raknamo di Provinsi Nusa Tenggara Timur”.

Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik (MT) di Jurusan Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Dengan terselesainya Laporan Tesis ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua Orang tua, ketiga Orang adik saya dan seluruh keluarga di rumah yang telah banyak memberikan dukungan atau dorongan, sehingga saya dapat menyelesaikan Laporan Tesis ini dengan baik.
2. Ibu Dr. Ir. Ussy Andawayanti, MS. selaku Ketua Jurusan Teknik Pengairan Universitas Brawijaya.
3. Bapak Dr. Eng. Ir. Riyanto Haribowo, ST., MT.,IPM. selaku Ketua Program Magister Teknik Pengairan Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Eng. Andre Primantyo H, ST.,MT, selaku Dosen Pembimbing yang telah berusaha meluangkan waktu untuk membimbing saya.
5. Ibu Dr. Eng. Evi Nur Cahya, ST.,MT, selaku Dosen Pembimbing yang telah berusaha meluangkan waktu untuk membimbing saya.
6. Bapak Dr. Ery Suhartanto, ST.,MT. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritikan dan masukan kepada saya dalam menyempurnakan Tesis ini.
7. Bapak Dr. Runi Asmaranto, ST.,MT. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritikan dan masukan kepada saya dalam menyempurnakan Tesis ini.
8. Teman-teman Magister MSDA Teknik Pengairan angkatan 2018 yang telah setia membantu dan mendukung saya selama kuliah di Universitas Brawijaya.
9. Teman-teman Magister MSDA Teknik Pengairan angkatan 2017 yang telah setia membantu dan mendukung saya selama kuliah di Universitas Brawijaya.

Semoga Laporan Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan memberikan wawasan serta masukan pada pembaca. Dan jika terdapat kekurangan atau kesalahan dalam penulisan Laporan Tesis ini dapat dijadikan koreksi.

Malang, Juli 2021

Penyusun





DAFTAR ISI

Halaman

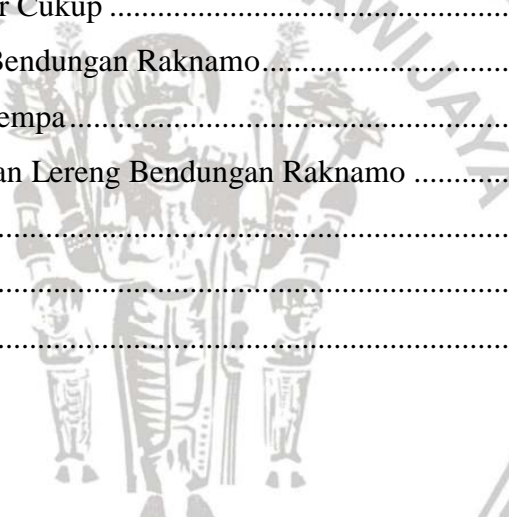
KATA PENGANTAR .....	i
DAFTAR ISI .....	iii
DAFTAR TABEL .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	x
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Identifikasi Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Rumusan Masalah .....	2
1.5. Tujuan Penelitian .....	2
1.6. Manfaat Penelitian .....	3
1.7. Penelitian Terdahulu .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1. Umum .....	5
2.2. Tujuan Instrumentasi .....	5
2.3. Manfaat Instrumentasi .....	6
2.4. Jenis-Jenis Instrumen .....	8
2.4.1. Alat Ukur Tekanan Air Pori .....	9
2.4.2. Alat Ukur Deformasi .....	16
2.4.3. Alat Ukur Rembesan .....	27
2.5. Permeabilitas .....	28
2.6. Rembesan Pada Struktur Bendungan .....	32
2.6.1. Keamanan Ijin Terhadap Rembesan (Menurut Look, 2007) .....	37
2.6.2. Keamanan Ijin Terhadap Rembesan (Menurut Soedibyo, 2003) .....	38
2.7. Deformasi .....	39
2.8. Analisis Stabilitas Lereng Bendungan .....	40
2.8.1. Umum .....	40
2.8.2. Metode Bidang Longsor Lingkaran .....	41
2.9. Simulasi Tampunguan Waduk .....	42



2.10. Penelitian Terdahulu .....	43
2.11. Pengertian Umum Analisis Gempa .....	56
2.12. Evaluasi Penentuan Beban Gempa dan Pemilihan Parameter Gempa .....	57
2.13. Metode Analisis Stabilitas Gempa Bendungan Urugan Akibat Beban Gempa .....	66
2.13.1. Tinjauan Umum.....	66
2.13.2. Analisis Cara Koefisien Gempa .....	66
2.13.3. Analisis Cara Koefisien Gempa Termodifikasi .....	68
2.13.4. Penentuan Klasifikasi Kelas Resiko Gempa .....	69
2.13.5. Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan .....	70
2.14. Kriteria Faktor Keamanan Minimum .....	71
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>75</b>
3.1. Lokasi Penelitian .....	75
3.2. Informasi Kegiatan Konstruksi .....	76
3.3. Data-data Penunjang.....	77
3.4. Analisis Data .....	78
3.5. Bagan Alir Penelitian .....	80
<b>BAB IV HASIL DAN ANALISIS .....</b>	<b>85</b>
4.1. Data Instrumentasi Bendungan Raknamo .....	85
4.1.1. Data Instrumen <i>Vibrating Wire Piezometer</i> .....	86
4.1.2. Data Instrumen V-Notch .....	91
4.1.3. Data Instrumen <i>Multilayer – Settlement (MS)</i> .....	92
4.2. Data Material Timbunan .....	95
4.3. Data Simulasi Waduk.....	96
4.3.1. Data Lengkung Kapasitas Waduk .....	96
4.3.2. Data Debit <i>Inflow</i> .....	96
4.3.3. Data Debit <i>Outflow</i> .....	97
4.4. Analisis Numeric.....	99
4.4.1. Analisis <i>Numeric</i> Tekanan Air Pori MD.10 (STA 0+300) .....	100
4.4.2. Analisis <i>Numeric</i> Tekanan Air Pori MD.16 (STA 0+420) .....	101
4.4.3. Analisis <i>Numeric</i> Debit Rembesan ( <i>Flux</i> ) MD.10 (STA 0+300).....	103
4.4.4. Analisis <i>Numeric</i> Debit Rembesan ( <i>Flux</i> ) MD.16 (STA 0+420).....	104
4.4.5. Analisis <i>Numeric Settlement</i> MD.11 (STA 0+320) .....	105
4.4.6. Analisis <i>Numeric Settlement</i> MD.17 (STA 0+443,4) .....	107
4.5. Validasi Data Instrumen Bendungan Raknamo .....	108



4.5.1. Validasi Data <i>Actual</i> dan Hasil <i>Numeric</i> ( <i>Vibrating Weir Piezometer</i> ) MD.10.108	108
4.5.2. Validasi Data <i>Actual</i> dan Hasil <i>Numeric</i> ( <i>Vibrating Weir Piezometer</i> ) MD.16.115	115
4.5.3. Validasi Data <i>Actual</i> (V-Notch) dan Hasil <i>Numeric</i> (SEEP/W) MD.10.....126	126
4.5.4. Validasi Data <i>Actual</i> (V-Notch) dan Hasil <i>Numeric</i> (SEEP/W) MD.16.....127	127
4.5.5. Validasi Data <i>Actual</i> dan Hasil <i>Numeric</i> ( <i>Multilayer Settlement</i> ) MD.11 .....129	129
4.5.6. Validasi Data <i>Actual</i> dan Hasil <i>Numeric</i> ( <i>Multilayer Settlement</i> ) MD.17 .....134	134
4.6. Batas Maksimum Faktor Keamanan Terhadap Debit Rembesan dan <i>Settlement</i> .139	139
4.6.1. Batas Maksimum Faktor Keamanan Terhadap Debit Rembesan.....139	139
4.6.2. Batas Maksimum Faktor Keamanan Terhadap <i>Settlement</i> .....144	144
4.7. Simulasi Operasi Waduk Raknamo.....146	146
4.7.1. Simulasi Debit Air Kering.....148	148
4.7.2. Simulasi Debit Air Rendah.....151	151
4.7.3. Simulasi Debit Air Normal.....154	154
4.7.4. Simulasi Debit Air Cukup .....157	157
4.8. Analisis Stabilitas Bendungan Raknamo.....160	160
4.8.1. Kajian Analisis Gempa.....160	160
4.8.2. Evaluasi Keamanan Lereng Bendungan Raknamo .....164	164
BAB V PENUTUP.....183	183
Kesimpulan.....183	183
Saran.....185	185
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	





DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Contoh Pertanyaan Geoteknik yang Mungkin Muncul .....	6
Tabel 2.2.	Keuntungan dan Keterbatasan Alat Ukur Pisometer.....	14
Tabel 2.3.	Kategori Alat Ukur Deformasi .....	16
Tabel 2.4.	Rembesan yang Diijinkan pada Bendungan.....	38
Tabel 2.5.	Percepatan Gempa Dasar untuk Berbagai Periode Ulang .....	67
Tabel 2.6.	Faktor Koreksi Pengaruh Jenis Tanah Setempat.....	67
Tabel 2.7.	Kriteria Faktor Resiko untuk Evaluasi Keamanan Bendungan Urugan.....	69
Tabel 2.8.	Kelas Resiko Bendungan Urugan dan Bangunan Air .....	70
Tabel 2.9.	Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan .....	71
Tabel 2.10.	Persyaratan Faktor Keamanan Minimum Stabilitas Bendungan Tipe Urugan	73
Tabel 3.1.	Informasi Kegiatan Konstruksi Bendungan Raknamo .....	76
Tabel 4.1.	Parameter Material Timbunan Bendungan Raknamo .....	95
Tabel 4.2.	Data Debit <i>Inflow</i> (15 Harian) Bendungan Raknamo .....	97
Tabel 4.3.	Kebutuhan Air Irigasi .....	98
Tabel 4.4.	Kebutuhan Air Baku.....	98
Tabel 4.5.	Data Evaporasi (ETo).....	98
Tabel 4.6.	Data Inputan SEEP/W .....	99
Tabel 4.7.	Elevasi Muka Air Waduk Bendungan Raknamo.....	99
Tabel 4.8.	Hasil Analisis Tekanan Air Pori Pada SEEP/W - MD.10 (STA 0+300).....	101
Tabel 4.9.	Hasil Analisis Tekanan Air Pori Pada SEEP/W - MD.16 (STA 0+420).....	102
Tabel 4.10.	Hasil Analisis Rembesan Pada SEEP/W - MD.10 (STA 0+300).....	104
Tabel 4.11.	Hasil Analisis Rembesan Pada SEEP/W - MD.16 (STA 0+420).....	105
Tabel 4.12.	Hasil Analisis Rembesan Pada SIGMA/W - MD.11 (STA 0+320) .....	107
Tabel 4.13.	Hasil Analisis Rembesan Pada SIGMA/W - MD.17 (STA 0+443,4) .....	108
Tabel 4.14.	Hasil Analisis SEEP/W dan Data <i>Actual Piezometer</i> - MD.10 (STA 0+300).....	109
Tabel 4.15.	Deviasi Bacaan <i>Pore Water Pressure Actual Piezometer</i> dan Hasil <i>Numeric</i> SEEP/W – MD.10 (STA 0+300) .....	113



Tabel 4.16. Tingkat Hubungan Antara Nilai <i>Pore Water Pressure Actual</i> dan <i>Numeric</i> .	115
Tabel 4.17. Hasil Analisis SEEP/W dan Data <i>Actual Piezometer</i> - MD.16 (STA 0+420).....	116
Tabel 4.18. Deviasi Bacaan <i>Pore Water Pressure Actual Piezometer</i> dan Hasil <i>Numeric</i> SEEP/W – MD.16 (STA 0+420) .....	122
Tabel 4.19. Tingkat Hubungan Antara Nilai <i>Pore Water Pressure Actual</i> dan <i>Numeric</i> .	125
Tabel 4.20. Hasil Analisis Debit <i>Numeric</i> dan Debit <i>Actual V-Notch</i> - MD.10 (STA 0+300).....	126
Tabel 4.21. Hasil Analisis Debit <i>Numeric</i> dan Debit <i>Actual V-Notch</i> - MD.16 (STA 0+420).....	128
Tabel 4.22. Hasil Analisis SIGMA/W dan Data <i>Actual Multilayer Settlement</i> - MD.11 (STA 0+320).....	130
Tabel 4.23. Deviasi Bacaan <i>Multilayer Settlement Actual</i> dan Hasil <i>Numeric</i> SIGMA/W – MD.11 (STA 0+320).....	132
Tabel 4.24. Tingkat Hubungan Antara Nilai <i>Settlement Actual</i> dan <i>Numeric</i> .....	133
Tabel 4.25. Hasil Analisis SIGMA/W dan Data <i>Actual Multilayer Settlement</i> - MD.17 (STA 0+443,4).....	134
Tabel 4.26. Deviasi Bacaan <i>Multilayer Settlement Actual</i> dan Hasil <i>Numeric</i> SIGMA/W – MD.17 (STA 0+443,4).....	136
Tabel 4.27. Tingkat Hubungan Antara Nilai <i>Settlement Actual</i> dan <i>Numeric</i> .....	138
Tabel 4.28. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan <i>Numeric</i> (MD.10 – STA 0+300) dan <i>Actual</i> (Pengamatan V-Notch), Look, 2007. ....	140
Tabel 4.29. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan <i>Numeric</i> (MD.16 – STA 0+420) dan <i>Actual</i> (Pengamatan V-Notch), Look, 2007. ....	140
Tabel 4.30. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan <i>Numeric</i> (MD.10 – STA 0+300) dan <i>Actual</i> (Pengamatan V-Notch), Soebidyo, 2003.....	141
Tabel 4.31. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan <i>Numeric</i> (MD.16 – STA 0+420) dan <i>Actual</i> (Pengamatan V-Notch), Soebidyo, 2003.....	142
Tabel 4.32. Faktor Keamanan Terhadap Piping Pada Hasil Analisis <i>Numeric</i> (MD.10 – STA 0+300).....	143
Tabel 4.33. Faktor Keamanan Terhadap Piping Pada Hasil Analisis <i>Numeric</i> (MD.16 – STA 0+420).....	143
Tabel 4.34. Faktor Keamanan Terhadap <i>Settlement Numeric</i> (MD.11 – STA 0+320), Novak, 2007.....	145





Tabel 4.35. Faktor Keamanan Terhadap <i>Settlement Actual</i> (MD.11 – STA 0+320), Novak, 2007 .....	145
Tabel 4.36. Faktor Keamanan Terhadap <i>Settlement Numeric</i> (MD.17 – STA 0+443,4), Novak, 2007 .....	146
Tabel 4.37. Faktor Keamanan Terhadap <i>Settlement Actual</i> (MD.17 – STA 0+443,4), Novak, 2007 .....	146
Tabel 4.36. Analisis Keandalan Debit Berdasarkan 4 Musim Debit .....	147
Tabel 4.39. Simulasi Waduk Keandalan 97,3% (Debit Air Kering) .....	149
Tabel 4.40. Simulasi Waduk Keandalan 75,3% (Debit Air Rendah) .....	152
Tabel 4.41. Simulasi Waduk Keandalan 50,7% (Debit Air Normal) .....	155
Tabel 4.42. Simulasi Waduk Keandalan 26,6% (Debit Air Cukup) .....	158
Tabel 4.43. Klasifikasi Kelas Resiko Bangunan dan Percepatan Desain Bendungan Raknamo .....	160
Tabel 4.44. Perhitungan Koefisien Gempa Statis Bendungan Raknamo .....	162
Tabel 4.45. Perhitungan Koefisien Gempa Dinamis Bendungan Raknamo (Horisontal, Kh) .....	163
Tabel 4.46. Perhitungan Koefisien Gempa Dinamis Bendungan Raknamo (Vertikal, Kv) .....	164
Tabel 4.47. Hasil Analisis Statis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Tanpa Gempa dan Dengan Gempa Desain 100 Tahun) .....	165
Tabel 4.48. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE), $y/H = 1,00$ .....	167
Tabel 4.49. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE), $y/H = 0,75$ .....	169
Tabel 4.50. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE), $y/H = 0,50$ .....	171
Tabel 4.51. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE), $y/H = 0,25$ .....	173
Tabel 4.52. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE), $y/H = 1,00$ .....	175
Tabel 4.53. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE), $y/H = 0,75$ .....	177
Tabel 4.54. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE), $y/H = 0,50$ .....	179



Tabel 4.55. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE),  $y/H = 0,25$ .....181



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Skema Sumur Observasi .....	10
Gambar 2.2.	Skema Pisometer Pipa Tegak .....	10
Gambar 2.3.	Skema Pisometer Hidraulik Tabung Ganda .....	11
Gambar 2.4.	Pisometer Pneumatik Tipe Dorong Setempat Dalam Lubang Bor .....	12
Gambar 2.5.	Skema Alat <i>Vibrating Wire</i> .....	12
Gambar 2.6.	<i>Fully Encapsulated Submersible Transduser</i> Tekan .....	13
Gambar 2.7.	Pengamatan Penurunan Menggunakan Alat Pengukuran Titik pada Permukaan Bendungan Tipe Urugan .....	18
Gambar 2.8.	Crossarm Gage: a) Skema Pipa, dan b) Probe Pengukur .....	19
Gambar 2.9.	Skema Sondex Probe Extensiometer ( <i>Slope Indicator Company</i> ) Terpasang dalam Lubang Bor. ....	20
Gambar 2.10.	Skema Alat Ukur Probe Ekstensiometer dengan Magnet Kabel Bertombol dipasang Dalam Lubang Bor.....	21
Gambar 2.11.	Alat Pelat Penurunan .....	22
Gambar 2.12.	Skema Alat Ekstensiometer Timbunan Tetap dengan <i>Electrical Linear Displacement Transducer</i> .....	22
Gambar 2.13.	Skema Alat Ukur Penurunan dengan Ujung Berspiral.....	23
Gambar 2.14.	Prinsip Dasar Alat Ekstensometer Lubang Bor Tetap .....	24
Gambar 2.15.	Prinsip Operasi Inklinometer .....	25
Gambar 2.16.	Skema Alat <i>Overflow Liquid Level</i> dengan Elevasi Sama.....	26
Gambar 2.17.	Monitoring Debit Bocoran Dengan Ambang 90° dengan Cara Pembacaan Jarak Jauh ( <i>Remote</i> ) .....	28
Gambar 2.18.	Aliran Air Tanah .....	29
Gambar 2.19.	Aliran Air Tanah .....	30
Gambar 2.20.	Hitungan Rembesan Cara <i>Dupuit</i> .....	32
Gambar 2.21.	Hitungan Rembesan Cara <i>Schaffernak</i> .....	33
Gambar 2.22.	Hitungan Rembesan Cara <i>Casagrande</i> .....	34
Gambar 2.23.	Garis Depresi pada Bendungan Homogen (Sesuai Dengan Garis Parabola).....	35
Gambar 2.24.	Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi Dalam Tubuh Bendungan (Dengan Jumlah Potensial = 9).....	36



Gambar 2.25.	Gradien Rembesan Pada Bendungan Urugan Tanah.....	37
Gambar 2.26.	Pola Keruntuhan Timbunan di Atas Tanah Lunak.....	40
Gambar 2.27.	Bidang Longsor Sirkular dengan Penampang-penampang Irisannya....	41
Gambar 2.28.	Contoh Kontur Faktor Aman.....	42
Gambar 2.29.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) Deterministik Akibat Sumber Gempa Sesar Dangkal Dengan 84-Percentile (150% Median)....	59
Gambar 2.30.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) Deterministik Akibat Sumber Gempa Subdiksi Dengan 84-Percentile (150% Median).....	59
Gambar 2.31.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 20% dalam 10 Tahun.....	60
Gambar 2.32.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 10% dalam 10 Tahun.....	60
Gambar 2.33.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 5% dalam 10 Tahun.....	61
Gambar 2.34.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 10% dalam 50 Tahun.....	61
Gambar 2.35.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 7% dalam 75 Tahun.....	62
Gambar 2.36.	Peta Percepatan Spektrum Respon 0,2 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 7% dalam 75 Tahun..	62
Gambar 2.37.	Peta Percepatan Spektrum Respon 1,0 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 7% dalam 75 Tahun..	63
Gambar 2.38.	Peta Percepatan di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 2% dalam 50 Tahun.....	63
Gambar 2.39.	Peta Percepatan Spektrum Respon 0,2 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 2% dalam 50 Tahun..	64
Gambar 2.40.	Peta Percepatan Spektrum Respon 1,0 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 2% dalam 50 Tahun..	64
Gambar 2.41.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 2% dalam 100 Tahun.....	65
Gambar 2.42.	Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampai 1% dalam 100 Tahun.....	65
Gambar 3.1.	Peta Lokasi Penelitian.....	75
Gambar 3.2.	Bagan Alir Penelitian.....	80



Gambar 3.3.	Bagan Alir Analisis <i>Numerik</i> (SEEP/W) .....	81
Gambar 3.4.	Bagan Alir Analisis <i>Numerik</i> (SIGMA/W) .....	82
Gambar 3.5.	Bagan Alir Analisis <i>Numerik</i> (SLOPE/W) .....	83
Gambar 4.1.	Denah Penempatan Instrumen Bendungan Raknamo .....	85
Gambar 4.2.	Potongan Memanjang Instrumen Pada As Bendungan Raknamo .....	85
Gambar 4.3.	Potongan Melintang Instrumen <i>Vibrating Wire Piezometer</i> Pada Pondasi – MD.10 (STA 0+300) .....	86
Gambar 4.4.	Pressure Head Pada Pondasi Bendungan – MD.10 .....	86
Gambar 4.5.	Potongan Melintang Instrumen <i>Vibrating Wire Piezometer</i> Pada Timbunan – MD.10 (STA 0+300) .....	87
Gambar 4.6.	Pressure Head Pada Inti Timbunan Bendungan – MD.10 .....	87
Gambar 4.7.	Potongan Melintang Instrumen <i>Vibrating Wire Piezometer</i> Pada Pondasi – MD.16 (STA 0+420) .....	88
Gambar 4.8.	Pressure Head Pada Pondasi Bendungan – MD.16 .....	88
Gambar 4.9.	Potongan Melintang Instrumen <i>Vibrating Wire Piezometer</i> Pada Timbunan – MD.16 (STA 0+420) .....	89
Gambar 4.10.	Pressure Head Pada Inti Timbunan Bendungan – MD.16 .....	89
Gambar 4.11.	Potongan Melintang Instrumen <i>Vibrating Wire Piezometer</i> Pada <i>Cofferdam</i> Hilir – MD.16 (STA 0+420) .....	90
Gambar 4.12.	<i>Pressure Head</i> Pada <i>Cofferdam</i> Hilir Bendungan – MD.16 .....	90
Gambar 4.13.	Penempatan Instrumen V-Notch Pada Bagian Hilir Kaki Timbunan .....	91
Gambar 4.14.	Bacaan Instrumen V-Notch pada Hilir Bendungan .....	91
Gambar 4.15.	Potongan Melintang Instrumentasi <i>Multilayer Settlement</i> .....	92
Gambar 4.16.	Bacaan <i>Multilayer Settlement</i> Pada Posisi MD.11 (STA 0+320) .....	92
Gambar 4.17.	Profil Perubahan Pergerakan Vertikal Tahun 2016-2020 (MD.11) .....	93
Gambar 4.18.	Potongan Melintang Instrumentasi <i>Multilayer Settlement</i> .....	93
Gambar 4.19.	Bacaan <i>Multilayer Settlement</i> Pada Posisi MD.17 (STA 0+443,4) .....	94
Gambar 4.20.	Profil Perubahan Pergerakan Vertikal Tahun 2016-2020 (MD.17) .....	94
Gambar 4.21.	Zona Timbunan Material Pada MD-10, MD-11 .....	95
Gambar 4.22.	Zona Timbunan Material Pada MD-16, MD-17 .....	95
Gambar 4.23.	Lengkung Kasitas Waduk Raknamo .....	96
Gambar 4.24.	<i>Pore Water Pressure</i> MD.10 (30 Apr 2019) .....	100
Gambar 4.25.	<i>Pore Water Pressure</i> MD.16 (30 Apr 2019) .....	102
Gambar 4.26.	Rembesan ( <i>Flux</i> ) MD.10 (30 Apr 2019) .....	103



Gambar 4.27.	Rembesan ( <i>Flux</i> ) MD.16 (30 Apr 2019) .....	104
Gambar 4.28.	<i>Settlement</i> MD.11 (31 Des 2020) .....	106
Gambar 4.29.	<i>Settlement</i> MD.17 (31 Des 2020) .....	107
Gambar 4.30.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.05) – MD.10 .....	109
Gambar 4.31.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.06) – MD.10 .....	110
Gambar 4.32.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.07) – MD.10 .....	110
Gambar 4.33.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.08) – MD.10 .....	110
Gambar 4.34.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.09) – MD.10 .....	111
Gambar 4.35.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.10) – MD.10 .....	111
Gambar 4.36.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.11) – MD.10 .....	111
Gambar 4.37.	Grafik <i>Pore Water Pressure</i> (PWP) <i>Numeric</i> dengan <i>Actual</i> Penampang MD-10, STA 0+300 .....	112
Gambar 4.38.	Korelasi Antara Nilai <i>Pore Water Pressure Actual</i> dan <i>Numeric</i> (MD.10 – STA 0+300) .....	114
Gambar 4.39.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.05) – MD.16 .....	117
Gambar 4.40.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.06) – MD.16 .....	117
Gambar 4.41.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.07) – MD.16 .....	117
Gambar 4.42.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.08) – MD.16 .....	118
Gambar 4.43.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.09) – MD.16 .....	118
Gambar 4.44.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Presure</i> (VP.10) – MD.16 .....	118





Gambar 4.45.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Pressure</i> (VP.11) – MD.16 .....	119
Gambar 4.46.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Pressure</i> (VP.12) – MD.16 .....	119
Gambar 4.47.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Pressure</i> (VP.13) – MD.16 .....	119
Gambar 4.48.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Pressure</i> (VP.14) – MD.16 .....	120
Gambar 4.49.	Perubahan Elevasi Muka Terhadap <i>Pore Water Pressure</i> (VP.15) – MD.16 .....	120
Gambar 4.50.	Grafik <i>Pore Water Pressure</i> (PWP) <i>Numeric</i> dengan <i>Actual</i> Penampang MD-16, STA 0+420 .....	121
Gambar 4.51.	Korelasi Antara Nilai <i>Pore Water Pressure Actual</i> dan <i>Numeric</i> VP.05 – VP.10 (MD.16 – STA 0+420) .....	123
Gambar 4.52.	Korelasi Antara Nilai <i>Pore Water Pressure Actual</i> dan <i>Numeric</i> VP.11 – VP.15 (MD.16 – STA 0+420) .....	124
Gambar 4.53.	Perubahan Tinggi Muka Air Terhadap Debit Rembesan <i>Actual</i> dan <i>Numeric</i> (MD.10, STA 0+300) .....	126
Gambar 4.54.	Korelasi Antara Nilai Debit Rembesan <i>Actual</i> dan <i>Numeric</i> (MD.10, STA 0+300) .....	127
Gambar 4.55.	Perubahan Tinggi Muka Air Terhadap Debit Rembesan <i>Actual</i> dan <i>Numeric</i> (MD.16, STA 0+420) .....	128
Gambar 4.56.	Korelasi Antara Nilai Debit Rembesan <i>Actual</i> dan <i>Numeric</i> (MD.16, STA 0+420) .....	129
Gambar 4.57.	Pengaruh PWP Terhadap <i>Settlement</i> (SP.01, PM.01) – MD.11 .....	130
Gambar 4.58.	Pengaruh PWP Terhadap <i>Settlement</i> (PM.02, PM.03) – MD.11 .....	130
Gambar 4.59.	Pengaruh PWP Terhadap <i>Settlement</i> (PM.04, PM.05) – MD.11 .....	131
Gambar 4.60.	Korelasi Antara Nilai <i>Settlement Actual</i> dan <i>Numeric</i> VP.01 – VP.03 (MD.11 – STA 0+320) .....	132
Gambar 4.61.	Korelasi Antara Nilai <i>Settlement Actual</i> dan <i>Numeric</i> VP.04 – VP.05 (MD.11 – STA 0+320) .....	133
Gambar 4.62.	Pengaruh PWP Terhadap <i>Settlement</i> (SP.01, PM.01) – MD.17 .....	135
Gambar 4.63.	Pengaruh PWP Terhadap <i>Settlement</i> (PM.02, PM.03) – MD.17 .....	135
Gambar 4.64.	Pengaruh PWP Terhadap <i>Settlement</i> (PM.04 - PM.06) – MD.17 .....	136



Gambar 4.65.	Korelasi Antara Nilai <i>Settlement Actual</i> dan <i>Numeric</i> , SP.01 – PM.04 (MD.17 – STA 0+443,4) .....	137
Gambar 4.66.	Korelasi Antara Nilai <i>Settlement Actual</i> dan <i>Numeric</i> , PM.05 – PM.06 (MD.17 – STA 0+443,4) .....	138
Gambar 4.67.	Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 97,3% (Debit Air Kering) .....	150
Gambar 4.68.	Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 75,3% (Debit Air Rendah) .....	153
Gambar 4.69.	Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 50,7% (Debit Air Normal) .....	156
Gambar 4.70.	Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 26,6% (Debit Air Cukup) .....	159
Gambar 4.71.	Zona Gempa Kala Ulang 100 Tahun .....	161
Gambar 4.72.	Zona Gempa Kala Ulang 5000 Tahun .....	161
Gambar 4.73.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (FWL – LWL) Tanpa Gempa .....	166
Gambar 4.74.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa Statis 100 Tahun .....	166
Gambar 4.75.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 1$ ) .....	168
Gambar 4.76.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,75$ ) ..	170
Gambar 4.77.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,50$ ) ..	172
Gambar 4.78.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,25$ ) ..	174
Gambar 4.79.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 1$ ) ....	176
Gambar 4.80.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,75$ )	178
Gambar 4.81.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,50$ )	180
Gambar 4.82.	Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi <i>Rapid Drawdown</i> (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,25$ )	182



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Suatu sistem tata kelola air yang lengkap sudah merupakan kebutuhan yang sangat vital bagi masyarakat. Oleh karena itu ketersediaan sistem dalam pengelolaan air merupakan salah satu faktor utama meningkatkan perkembangan dan pertumbuhan suatu sistem jaringan pengelolaan air. Bendungan adalah konstruksi yang dibangun untuk menahan laju air menjadi waduk atau danau. Seringkali bendungan juga digunakan untuk mengalirkan air ke sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

Bendungan urugan adalah bangunan sipil yang paling kompleks yang sangat berbahaya bila mengalami kegagalan atau keruntuhan. Keruntuhan pada suatu bendungan akan menimbulkan bencana besar bagi daerah dibagian hilirnya baik berupa harta benda maupun korban jiwa. Keamanan bendungan memegang peranan yang sangat penting, oleh karena itu keamanan bendungan tipe urugan ini perlu dilakukan pengecekan, pemeriksaan dan pencatatan secara berkesinambungan mengenai kinerja dan perilaku bendungan beserta bangunan pelengkapannya atau obyek-obyek tertentu lainnya dengan cara pengukuran langsung, pengamatan dan pembacaan, dengan menggunakan peralatan atau instrumen.

Instrumentasi lapangan sangat penting dalam teknik rekayasa geoteknik untuk desain dan konstruksi bendungan urugan. Instrumentasi bukan hanya merupakan dasar evaluasi bendungan saja, melainkan juga memberikan data evaluasi dalam program pemantauan dan pengawasan serta inspeksi keamanan bendungan untuk keperluan pada masa yang akan datang.

Menurut Sari et al. (2017) semakin tinggi muka air waduk maka semakin besar tekanan air pori yang akan terjadi dan juga akan berdampak pada peningkatan debit rembesan serta dapat mempengaruhi terjadinya settlement pada tubuh bendungan. Berdasarkan hasil review yang diperoleh dari beberapa jurnal belum ada yang membahas lebih dalam sampai pada pola operasi waduk, untuk itu penulis akan membahas keamanan bendungan sampai pada saat pola operasi waduk itu dilakukan dengan menggunakan data instrumentasi dan dianalisis menggunakan model numerik.



## 1.2. Identifikasi Masalah

Dengan adanya kemungkinan terjadi rembesan, tekanan air pori dan juga *settlement* pada saat sebelum impounding dan setelah impounding selesai maka peneliti ingin melakukan kajian tentang **“Evaluasi Keamanan Tubuh Bendungan Pra dan Pasca Impounding Menggunakan Data Instrumentasi pada Bendungan Raknamo di Provinsi Nusa Tenggara Timur”**.

## 1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tidak membahas aspek keamanan bendungan terhadap kajian dam break.
2. Tidak membahas simulasi pada waktu harus dimulai impounding.
3. Tidak membahas rembesan pada pondasi bendungan.
4. Kondisi bacaan instrumen digunakan Bulan Januari 2018 – Desember 2020.

## 1.4. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pola tekanan air pori dan rembesan pada tubuh bendungan setelah konstruksi berdasarkan data Instrumentasi dan hasil analisis *numeric*?
2. Bagaimana pola *settlement* pada tubuh bendungan setelah konstruksi berdasarkan data Instrumentasi dan hasil analisis *numeric*?
3. Bagaimana kondisi keamanan bendungan terhadap rembesan, *settlement*, dan kestabilan lereng.

## 1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Agar dapat mengetahui pola tekanan air pori dan rembesan pada tubuh bendungan Raknamo setelah konstruksi.
2. Agar dapat mengetahui pola *settlement* pada tubuh bendungan Raknamo setelah konstruksi.
3. Agar dapat mengetahui apakah bendungan aman terhadap rembesan, *settlement*, dan kestabilan lereng.

## 1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai informasi bagi masyarakat yang berada atau bermukim di hilir bendungan tentang kondisi keamanan bendungan.
2. Sebagai bahan masukan untuk menjadi kajian bagi instansi terkait dan juga referensi untuk peneliti selanjutnya di lokasi tersebut.





### 1.7. Penelitian Terdahulu

No	Judul Jurnal	Penulis	Tujuan	Model
1.	<i>Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown</i>	Xiaoping Chen, Jingwu Huang. (2011)	Membandingkan Stabilitas lereng alami dan lereng buatan saat pengisian air waduk dan juga saat penurunan muka air tiba-tiba	- Model Test Lab - Model Numerik
2.	<i>Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling</i>	Mohammad Rashidi, S. Mohsen Haeri. (2017)	Mengevaluasi parameter <i>settlement</i> dan tekanan air pori dari bendungan urugan pada tahap konstruksi dan saat operasi bendungan menggunakan model numerik	- Model Numerik
3.	<i>A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams</i>	Sanjay Nimbalkar, V.S. Ramakrishna Annapareddy, Anindya Pain. (2018)	Menghitung faktor keamanan tubuh bendungan terhadap kekuatan gempa	- Model Numerik
4.	<i>Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method</i>	Shivakumar S. Athani, Shivamanth, C. H. Solanki, G. R. Dodagoudar. (2015)	Mengetahui pola rembesan dan stabilitas tubuh bendungan berdasarkan hasil analisis elemen hingga	- Model Numerik
5.	<i>Influence of pore water pressure to seepage and stability of embankment dam (case study of Sermo Dam Yogyakarta, Indonesia)</i>	Undayani Cita Sari, Sri Prabandiyani Retno Wardani, Suharyanto, dan Windu Partono. (2017)	Mengetahui hasil analisis tekanan air pori dan rembesan pada bendung menggunakan analisis numerik ( <i>Plaxis</i> ) serta membandingkan dengan kondisi bacaan instrumen <i>Piezometer</i> dan <i>V-Notch</i>	- Model Numerik

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Umum

Dalam mendesain instrumentasi bendungan, dan melakukan evaluasi hasil pengamatan instrumentasi sangat dibutuhkan pengetahuan dasar tentang geoteknik. Oleh sebab itu, kunci keberhasilan melakukan evaluasi perilaku bendungan tipe urugan, dan tanggul terletak pada kejelian dari tenaga ahli dalam melakukan evaluasi hasil pengamatan instrumen (Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah, 2004).

Aspek yang perlu diketahui terutama berkaitan dengan tekanan air pori, rembesan, tegangan tanah, dan karakteristik deformasi fondasi, dan bahan timbunan. Disamping penjelasan terperinci tentang dasar-dasar pengetahuan geoteknik, diperlukan juga acuan tata cara atau pedoman teknik lainnya, buku referensi tentang geoteknik, dan informasi pertimbangan desain, dan konstruksi bendungan tipe urugan (Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah, 2004).

#### 2.2. Tujuan Instrumentasi

Tujuan utama instrumentasi adalah untuk menghasilkan data yang berguna dalam menentukan apakah bendungan atau fondasi dapat berfungsi sesuai dengan aspek keamanan yang telah ditentukan. Apabila bendungan mempunyai kondisi fondasi atau bentuk desain yang khusus, instrumentasi akan membantu untuk memantau apakah konsep desain selama konstruksi, dan operasi sudah memenuhi kriteria atau tidak. Sebuah program pemantauan yang lengkap harus dikembangkan terutama untuk kondisi, dan bentuk khusus di lapangan. Jika kondisi fondasi atau bentuk desain bendungan tidak merupakan hal khusus, keperluan instrumentasi akan berkurang. Beberapa bendungan urugan yang mempunyai ketinggian yang sedang, dan dibangun di atas fondasi yang baik umumnya hanya memerlukan sedikit instrumentasi. Contoh pertanyaan geoteknik yang mungkin muncul dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Tabel 2.1. Contoh Pertanyaan Geoteknik yang Mungkin Muncul

Pertanyaan	Bagian Bangunan	Parameter yang Dipantau
Bagaimana kondisi lapangan awal?	Fondasi, ebatmen, daerah drainase	Tekanan air pori, hidrologi, meteorologi
Bagaimana perilaku bendungan selama konstruksi?	Fondasi, tubuh bendungan, ebatmen	Tekanan air pori, pergerakan horizontal, dan atau vertikal
Bagaimana perilaku bendungan selama pengisian pertama waduk?	Semua bagian, dan daerah yang berdekatan	Tekanan air pori, pergerakan horizontal, dan atau vertikal, rembesan, larutan zat padat
Bagaimana perilaku bendungan selama air waduk surut?	Bagian lereng udik, lereng alam di sekitarnya	Tekanan air pori, stabilitas lereng
Bagaimana perilaku bendungan selama pengoperasian jangka panjang?	Semua bagian bangunan	Semua parameter

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.13)

### 2.3. Manfaat Instrumentasi

Pemasangan instrumen bendungan urugan mempunyai arti yang sangat penting, karena dapat bermanfaat sebagai:

1. Perkiraan secara analitis keamanan bendungan;
2. Perkiraan perilaku jangka panjang;
3. Evaluasi legal (aspek hukum);
4. Pengembangan, dan verifikasi untuk desain yang akan datang.

Untuk dapat memenuhi hal tersebut, data hasil pengamatan instrumentasi harus merupakan data lengkap dan dapat dipertanggung jawabkan tingkat ketelitiannya. Data tersebut antara lain, berupa: data kuantitatif untuk menilai atau menaksir besarnya tekanan air pori, deformasi, tegangan total, bocoran, temperatur, kejadian gempa, dan muka air waduk. Berbagai variasi instrumen dapat digunakan dalam program pemantauan secara lengkap untuk menentukan semua kondisi kritis suatu bendungan (Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah, 2004).



## 1) **Perkiraan secara analitik**

Analisis data dari hasil instrumentasi geoteknik dapat digunakan untuk mencocokkan atau memverifikasi parameter desain, asumsi desain, teknik konstruksi, analisis untuk kondisi yang tidak diinginkan, dan kinerja sebenarnya, seperti dibahas berikut ini.

### a) **Verifikasi parameter desain**

- Data hasil pengamatan instrumen dapat digunakan untuk verifikasi parameter desain dengan melakukan perbandingan hasil pengamatan dengan hasil analisis sehingga pendesain dapat menentukan apakah ada kesesuaian desain. Jika tidak ada kesesuaian, pendesain dapat melakukan analisis balik dengan cara coba-coba untuk memperoleh parameter yang tepat untuk digunakan dalam modifikasi desain jika diperlukan.
- Desain bendungan urugan tanah, dan batu pada umumnya memerlukan studi tentang tegangan, regangan, dan deformasi yang kompleks, dan didasarkan pada asumsi geoteknik yang konservatif sesuai dengan karakteristik material, dan sifat bangunan. Asumsi umum ini memberi Gambaran tentang besaran deformasi yang belum pasti, dan harus diverifikasi.
- Pengamatan terhadap sistem instrumentasi, dan penilaian kinerja bendungan urugan, dapat membantu hal-hal yang belum diketahui secara jelas sehingga usulan untuk perbaikan, dan penyempurnaan suatu desain menjadi lebih terarah.

### b) **Verifikasi asumsi desain, dan teknik konstruksi**

Pengalaman menunjukkan bahwa suatu desain baru atau desain modifikasi dengan teknik konstruksi tertentu, belum tentu langsung dapat diterima tanpa ada pembuktian tentang baik atau tidaknya kinerja bangunan. Data yang diperoleh dari instrumentasi dapat membantu untuk mengevaluasi kesesuaian teknik baru atau modifikasi.

### c) **Analisis untuk kondisi yang merugikan**

Apabila terjadi keruntuhan, keruntuhan sebagian, kondisi darurat, perubahan yang tidak signifikan secara visual dalam bentuk, gejala atau rembesan pada bendungan atau tanggul, data hasil pengamatan instrumen akan sangat berharga dalam menentukan sebab-sebab kerusakan tersebut. Selain itu, instrumentasi biasanya dipasang sebelum atau selama pekerjaan perbaikan berlangsung disuatu tempat untuk menentukan efektivitas penyempurnaan, dan perbaikan pada kondisi yang ada.



d) **Verifikasi perubahan kinerja secara historis**

Data instrumentasi juga sangat berguna untuk mengevaluasi perubahan kinerja dari bendungan urugan atau tanggul dengan cara mempelajari data sejarah waktu pengamatan instrumentasi.

2) **Perkiraan kinerja yang akan datang**

Data instrumentasi harus dapat digunakan untuk memperkirakan kinerja bendungan, dan tanggul yang akan datang. Perkiraan tersebut dapat bervariasi dari kinerja cukup baik yang berkelanjutan pada kondisi operasi normal hingga kondisi darurat yang dapat mengancam kehidupan atau keamanan yang memerlukan kegiatan perbaikan.

Kadang-kadang bendungan urugan tanah, dan batu dibangun hanya untuk pengendalian banjir yang selalu berada dalam keadaan kering atau hanya mengelola daerah konservasi sangat rendah atau tempat-tempat rekreasi. Sebagai konsekuensinya, bendungan urugan ini tidak pernah mengalami kondisi banjir maksimum. Namun data instrumentasi untuk banjir antara dapat digunakan untuk memperkirakan kinerja bendungan pada kondisi banjir maksimum.

3) **Evaluasi legal (sah)**

Data instrumentasi yang teliti juga dapat digunakan sebagai data dalam proses penuntutan secara hukum dalam klaim kegagalan akibat pelaksanaan konstruksi yang kurang baik. Data tersebut digunakan untuk mengevaluasi kewajaran penuntutan yang diajukan.

4) **Pengembangan, dan verifikasi desain yang akan datang**

Analisis kinerja bendungan, dan tanggul yang ada, dan data hasil instrumentasi selama operasi, dapat digunakan untuk mengembangkan teknologi baru dalam desain, dan konstruksi bendungan agar menjadi lebih aman, dan ekonomis.

## 2.4. Jenis-Jenis Instrumen

Parameter-parameter yang perlu diamati yang berkaitan dengan bendungan urugan, adalah:

1. Tekanan air pori
2. Pergerakan vertikal dan horizontal
3. Rembesan
4. Tegangan tanah total
5. Beban atau gaya



Untuk mengukur parameter-parameter tersebut di atas, berbagai jenis instrumen di uraikan di bawah ini.

#### 2.4.1. Alat Ukur Tekanan Air Pori

Pada pemeriksaan kestabilan serta pengawasan konstruksi pekerjaan tanah, diperlukan data perubahan tekanan air pori pada tempat tertentu sebelum kita bisa menganalisis prinsip-prinsip tekanan efektif.

Pada pemeriksaan kestabilan serta pengawasan konstruksi pekerjaan tanah, diperlukan data perubahan tekanan air pori pada tempat tertentu sebelum kita bisa menganalisis prinsip-prinsip tekanan efektif.

Berdasarkan prinsip kerjanya, terdapat 2 macam pisometer, yaitu sistem terbuka dan sistem tertutup. Jenis alat ukur tekanan air pori dan air tanah sistem terbuka, diantaranya adalah :

- 1) Pisometer pipa tegak (*standpipe piezometer*), yang terdiri atas :
  - a. Porous-tube pisometer, yakni ujung pipa (mata pisometer) berupa pipa berlubang-lubang/perforasi yang porous)
  - b. Slotted pipe pisometer (mata pisometer dari pipa yang digergaji dengan spasi tertentu)
- 2) Pipa atau sumur pengamatan (*observation well*)

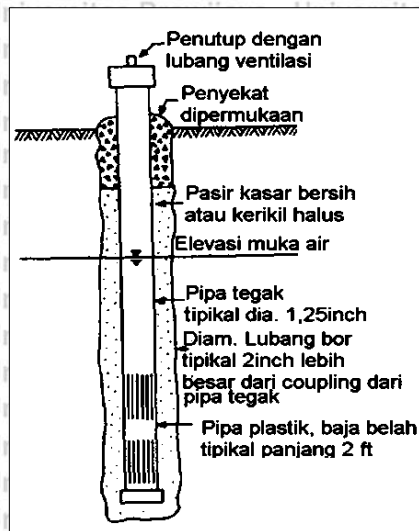
Sedangkan sistem tertutup, diantaranya adalah :

- a. Pisometer pipa ganda hidraulik (*hydraulic twin-tube piezometer*)
- b. Pisometer pneumatik (dengan tekanan gas, pneumatik *piezometer*)
- c. Pisometer kawat getar (*vibrating wire piezometers*)
- d. Pisometer elektrik (*electric piezometer*)

#### 1. Sumur observasi (*Observation Well*)

Gambar 2.1. menunjukkan skema sumur observasi. Elevasi muka air dalam pipa tegak (*riser*) ditentukan menggunakan alat duga air (*water level indicator*)



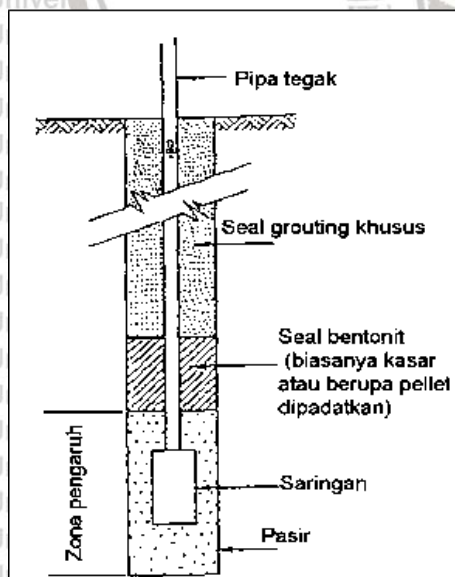


Gambar 2.1. Skema Sumur Observasi

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.26)

## 2. Pisometer Pipa Tegak Terbuka

Gambar 2.2. menunjukkan skema pisometer pipa tegak terbuka (dikenal sebagai pisometer *Casagrande*) yang dipasang dalam lubang bor. Komponennya secara prinsip identik dengan komponen sumur observasi dengan tambahan *seal* ke bawah permukaan yang dilapisi atau ditutupi zona terkait. Pembacaan dapat dilakukan menggunakan *sounding* dengan indikator muka air dengan transduser tekanan yang ditempatkan dalam pipa tegak di bawah elevasi pisometer terendah atau dengan transduser sonik.



Gambar 2.2. Skema Pisometer Pipa Tegak

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.26)

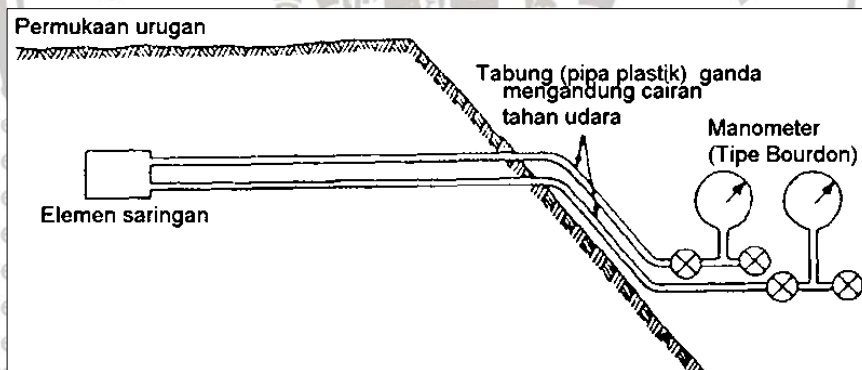
### 3. Pisometer Hidraulik Tabung Ganda

Penggunaan sistem pisometer hidraulik tabung ganda dijelaskan sebagai berikut.

a) Pisometer hidraulik tabung ganda ditunjukkan secara skematis dalam Gambar 2.3.

Elevasi pisometer ditentukan dengan menambahkan hasil pembacaan manometer tekanan ditambah dengan beda elevasi pisometer. Jika kedua tabung plastik diisi penuh dengan cairan, kedua alat duga tekanan akan menunjukkan tekanan yang sama. Akan tetapi, jika sistem telah terisi gas (melalui filter, tabung atau *fitting*), gas akan menyebabkan pembacaan tekanan tidak teliti pada salah satu atau kedua alat duga itu. Gas harus dikeluarkan dengan penjelasan. Oleh. Oleh karena itu, kedua manometer memerlukan pemjiksaan, dan kalibrasi kembali.

b) Sistem pisometer hidraulik tabung ganda telah dikembangkan di Amerika Serikat oleh *USBR*, dan di Inggris oleh *Imperial College*, London. Masing-masing sistem telah digunakan secara luas di dunia untuk bendungan urugan dengan keberhasilan yang bervariasi. Sistem yang dikembangkan di Inggris menunjukkan keberhasilan yang lebih baik daripada sistem yang dikembangkan di Amerika Serikat. Keberhasilan penggunaan pisometer hidraulik tabung ganda jangka panjang memerlukan pemeliharaan yang baik.



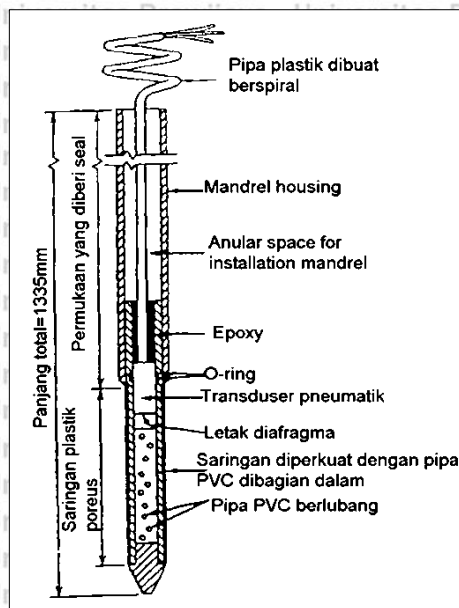
Gambar 2.3. Skema Pisometer Hidraulik Tabung Ganda

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.27)

### 4. Pisometer Pneumatik

Alat yang ditunjukkan dalam Gambar 2.4 dapat digunakan untuk memantau konsolidasi tekanan air pori yang terjadi di bawah tanggul, yang mempunyai Tegangan Vertikal material fondasi cukup besar. Pisometer didorong ke bawah dasar lubang bor, dan lubang bor diisi dengan seal dari bahan injeksi bentonit lunak.. Oleh karena itu, perlu dipertimbangkan untuk mencegah kerusakan hubungan awal pada sensor selama pemasangan.



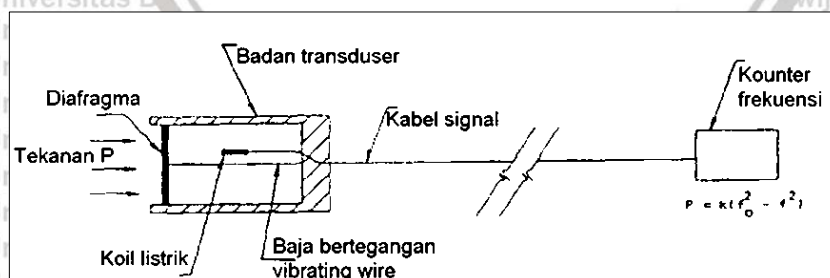


Gambar 2.4. Pisometer Pneumatik Tipe Dorong Setempat Dalam Lubang Bor  
Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.28)

### 5. Pisometer Kawat Getar (*Vibrating Wire Piezometers*)

Pisometer kawat getar didasarkan pada sensor tekanan yang ditunjukkan dalam Gambar 2.5. Filter yang dipasang, dan susunan pemasangan sama seperti yang diperlihatkan untuk pisometer pipa tegak terbuka dalam Gambar 2.2. Jenis khusus yang berdinding kuat dapat digunakan untuk pemasangan dalam urugan padat.

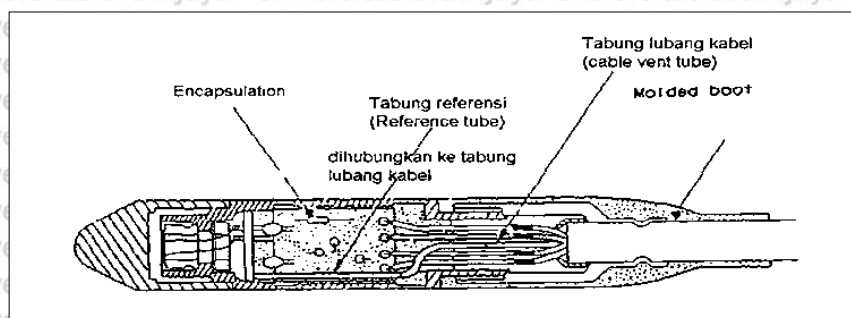
Dinding kuat itu digunakan hanya untuk menahan perubahan tekanan air pori tetapi tidak untuk tegangan total. Jenis khusus lain dapat juga digunakan seperti pisometer pneumatik yang diperlihatkan dalam Gambar 2.5, yaitu untuk memantau konsolidasi tekanan air pori yang terjadi di bawah tanggul, yang mempunyai Tegangan Vertikal dari material fondasi cukup besar.



Gambar 2.5. Skema Alat Vibrating Wire  
Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.21)

## 6. Pisometer Tahanan Listrik (*Electrical Resistance Piezometers*)

Pisometer tahanan listrik didasarkan pada alat duga regangan, telah digunakan dalam bendungan urugan, dan tanggul. Tabung lubang kabel digunakan untuk menghalangi atau mengeblok sehingga pembacaan tidak dapat dilakukan, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Fully Encapsulated Submersible Transduser Tekan  
Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.28)

Keuntungan dan keterbatasan dari alat ukur pisometer dirangkum pada Tabel 2.2.

- a) Keandalan, dan daya tahan alat biasanya lebih penting daripada kepekaan, dan ketelitian yang tinggi. Oleh. Oleh karena itu, pemilihan jenis alat tidak harus selalu teliti tetapi lebih diutamakan yang lebih tahan untuk jangka panjang. Ternyata tinggi tekan sebenarnya dapat mengalami kesalahan 300 mm (1 ft) akibat keterlambatan waktu (*time lag*), namun hal tersebut tidak menjadi masalah, jika pisometer memang berfungsi dengan baik. Pemasangan pisometer dengan transduser memerlukan koreksi tekanan barometrik jika diperlukan ketelitian yang tinggi.
- b) Sumur observasi hanya digunakan untuk mengukur muka air tanah. Untuk mengukur tekanan pisometrik dalam tanah jenuh, harus digunakan pisometer pipa tegak terbuka sebagai pilihan utama. Keterbatasan perpanjangan pipa tegak melalui urugan bendungan biasanya ditemui pada tubuh bendungan urugan atau tanggul. Jika keterbatasan ini tidak dapat diterima, harus dipilih jenis pisometer lainnya.
- c) Untuk penggunaan jangka pendek yang memerlukan data terpercaya untuk beberapa tahun (misalnya selama periode konstruksi tipikal), pada umumnya dipilih pisometer pneumatik atau pisometer kawat getar. Pemilihan akan tergantung pada faktor-faktor yang ditunjukkan dalam Tabel 2.2, yaitu pada kepercayaan penggunaan alat, dan pada perbandingan biaya total pemantauan.



Tabel 2.2. Keuntungan dan Keterbatasan Alat Ukur Pisometer

Jenis Alat	Keuntungan	Pembatasan *
a. Sumur observasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pemasangan mudah</li> <li>▪ Dapat dibaca di lapangan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Menggambarkan hubungan vertikal antara perlapisan tanah, dan hanya digunakan dalam lapisan lulus air yang menerus</li> </ul>
b. Pisometer pipa tegak terbuka	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keandalan tinggi</li> <li>▪ Data kinerja berhasil lama</li> <li>▪ Sistem tanpa air jika diameter dalam pipa tegak cocok</li> <li>▪ Integritas seal dapat diperiksa setelah pemasangan</li> <li>▪ Dapat digunakan untuk menentukan permeabilitas</li> <li>▪ Pembacaan dapat dilakukan dengan memasang transduser tekanan atau alat duga sonik dalam pipa tegak.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keterlambatan waktu merupakan suatu faktor</li> <li>▪ Dapat mengalami kerusakan oleh alat konstruksi, dan Tegangan Vertikal tanah sekeliling pipa tegak</li> <li>▪ Perpanjangan pipa tegak melalui urugan-bendungan mengganggu konstruksi, dan dapat menyebabkan pemadatan yang kurang baik.</li> <li>▪ Masalah pembekuan</li> <li>▪ Filter porus dapat tersumbat oleh karena aliran air masuk, dan keluar yang berulang-ulang</li> </ul>
c. Pisometer hidraulik tabung ganda	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Komponen yang tertanam kokoh</li> <li>▪ Dapat diandalkan jika terawat dengan baik</li> <li>▪ Data kinerja berhasil cukup lama</li> <li>▪ Jika dipasang dalam urugan, integritas dapat diperiksa setelah pemasangan.</li> <li>▪ Udara dalam pisometer dapat dibilas</li> <li>▪ Dapat digunakan untuk menentukan permeabilitas. Keterlambatan waktu singkat.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aplikasi umumnya terbatas untuk pemantauan jangka panjang tekanan air pori dalam bendungan urugan</li> <li>▪ Diperlukan terminal khusus untuk menampung semua tabung penghubung secara teratur</li> <li>▪ Tabung jangan diletakkan persis di atas elevasi</li> </ul>

Jenis Alat	Keuntungan	Pembatasan *
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dapat digunakan untuk membaca tekanan air pori negatif.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>minimum pisometer</li> <li>▪ Diperlukan pemeriksaan secara periodik</li> <li>▪ Masalah pembekuan</li> <li>▪ Diperlukan perhatian pada beberapa hal terperinci</li> </ul>
d. Pisometer pneumatik (tertanam)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Keterlambatan waktu singkat.</li> <li>▪ Bagian sistem yang dikalibrasi dapat terjangkau</li> <li>▪ Pengaruh pada konstruksi sedikit; permukaan tabung, dan hasil bacaan tidak tergantung elevasi ujung</li> <li>▪ Tidak ada masalah pembekuan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Memerlukan persediaan gas</li> <li>▪ Pemasangan, kalibrasi, dan pemeliharaan perlu diperhatikan</li> </ul>
e. Pisometer kawat getar, tertanam	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pembacaan mudah. Keterlambatan waktu singkat</li> <li>▪ Pengaruh konstruksi sedikit; permukaan kabel penghubung, dan alat baca tidak tergantung pada elevasi ujung</li> <li>▪ Pengaruh kabel penghubung kecil</li> <li>▪ Dapat digunakan untuk membaca tekanan air pori negatif</li> <li>▪ Tak ada masalah pembekuan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Berpotensi untuk penyimpangan nol (diperlukan teknik pembuatan khusus untuk memperkecil penyimpangan nol). **</li> <li>▪ Keperluan perlindungan terhadap sambaran kilat harus dievaluasi</li> </ul>
f. Pisometer perlawanan listrik (tertanam)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mudah dibaca. Keterlambatan waktu singkat</li> <li>▪ Pengaruh konstruksi sedikit; permukaan kabel penghubung, dan alat baca tidak terpengaruh pada ujung pisometer</li> <li>▪ Dapat digunakan untuk membaca tekanan air pori negatif.</li> <li>▪ Tak ada masalah pembekuan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kawat penunjuk berpotensi mempengaruhi kecuali kalau diubah menjadi 4-20 milliamps.</li> <li>▪ Kesalahan akibat kelembapan, dan korosi mungkin terjadi.</li> <li>▪ Keperluan perlindungan terhadap sambaran kilat</li> </ul>



Jenis Alat	Keuntungan	Pembatasan *
		harus dievaluasi.

\* Pembacaan pisometer diafragma menunjukkan bahwa bagian atas pisometer, dan elevasi pisometer harus diukur atau diperkirakan jika diperlukan elevasi pisometer. Semua pisometer diafragma, kecuali yang dilengkapi dengan lubang angin untuk udara, bersifat peka terhadap perubahan tekanan barometrik. Jika pipa pisometer, tabung atau kabel diangkat ke atas melalui urugan, akan terjadi gangguan pada konstruksi, dan mungkin terjadi pemadatan yang kurang baik.

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.30)

#### 2.4.2. Alat Ukur Deformasi

Alat ukur deformasi dapat dibagi dalam kategori yang diperlihatkan dalam Tabel 2.3. Definisi dari masing-masing kategori, dan aplikasi tipikalnya disajikan berikut ini.

Tabel 2.3. Kategori Alat Ukur Deformasi

Kategori	Jenis Deformasi Terukur					
	↔	$\beta$	$\times$	o	+	^
<b>Metode Survei</b>	.	.	.	.	.	.
Metode optikal, dan metode lain						
Benchmark						
Alat kontrol horizontal						
Alat ukur permukaan						
<b>Alat Duga Ekstensometer</b>	.	.	.	.	.	.
Alat ukur duga mekanik						
Alat ukur duga listrik						
Gabungan alat duga ekstensometer, dan casing inklinometer						
<b>Ekxtensometer Bendungan Tetap</b>	.	.	.	.	.	.
Pelat penurunan						
Pelat tertanam						
Alat duga listrik dengan transduser perpindahan linier						
<b>Alat Ukur Penurunan Lapisan Bawah</b>	.	.	.	.	.	.

Kategori	Jenis Deformasi Terukur				
	$\leftrightarrow$	$\beta$	$\times$	$\circ$	$+$ ^
<b>Permukaan</b>					
<b>Ekstensometer Lubang Bor Tetap</b>					
Ekstensometer alat ukur tunggal					
Ekstensometer alat ukur ganda					
<b>Inklinometer</b>					
Inklinometer alat duga					
Inklinometer setempat					
<b>Alat Ukur Duga Batas Cairan</b>					
Alat ukur duga tunggal					
Alat ukur duga seluruh profil					

Catatan:

$\leftrightarrow$  deformasi horizontal       $\circ$  deformasi rotasi

$\beta$  deformasi vertikal       $+$  deformasi permukaan

$\times$  deformasi aksial (  $\leftrightarrow$  atau  $\beta$  atau di antaranya)       $^$  deformasi lapisan bawah permukaan

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.32)

### 1. Metode survei (*External deformation*)

Metode survei digunakan untuk memantau besaran, dan laju deformasi horizontal, dan vertikal dari patok geser di permukaan, dan pada kaki bendungan urugan, dan tanggul.

Jika alat ukur deformasi perlapasan bawah permukaan telah dipasang, metode survei biasanya juga digunakan untuk menghubungkan pengukuran alat terhadap suatu datum.

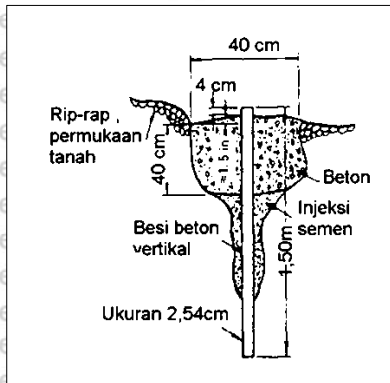
a. Metode survei mencakup penyamarataan secara optik (*optic leveling*), perekaman, potongan melintang, pengukuran cetakan *offset* dari garis dasar, triangulasi, pengukuran jarak secara elektronik, *leveling* trigonometrik, metode fotogrametrik, dan "*global positioning system*" secara satelit.

b. Semua metode survei harus mengacu pada datum referensi yang tetap: *benchmark* untuk pengukuran *deformasi vertikal*, dan alat kontrol *horizontal* untuk pengukuran *deformasi horizontal*. Untuk memastikan kestabilan datum referensi, harus



dilakukan pemasangan *benchmark* yang dalam dengan pengeboran sampai dengan kelapisan dasar yang tetap.

- c. Titik pengukuran permukaan (titik-titik pada permukaan yang digunakan untuk pengamatan survei, dan yang dapat bergerak) harus stabil, dan titik-titik tegak harus tahan selama umur layanan, dan harus terhindar dari pengaruh perubahan kelembapan musiman. Gambar 2.7 menunjukkan patok geser pengukuran tipikal untuk memantau penurunan pada permukaan bendungan urugan.



Gambar 2.7. Pengamatan Penurunan Menggunakan Alat Pengukuran Titik pada Permukaan Bendungan Tipe Urugan

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.32)

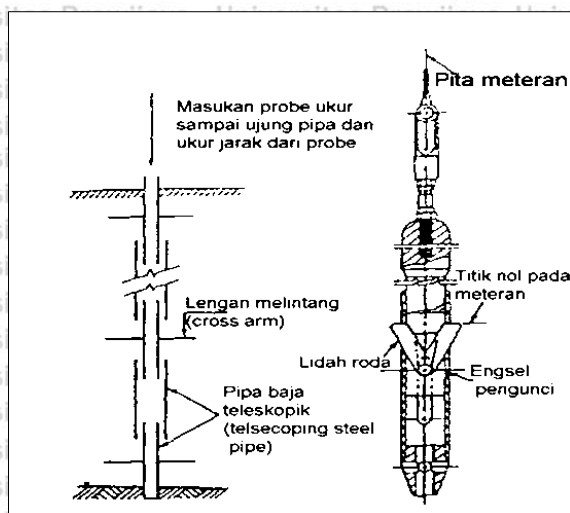
## 2. Alat probe ekstensometer

Alat probe ekstensometer merupakan alat untuk memantau perubahan jarak antara dua atau lebih titik sepanjang sumbu biasa dengan memasukkan probe melewati pipa.

Titik-titik pengukuran sepanjang pipa dibedakan secara mekanik atau elektrik dengan probe ukur atau duga, dan jarak antara titik ditentukan dengan mengukur posisi probe.

Untuk menentukan data deformasi absolut, salah satu dari titik pengukuran harus berada pada lokasi yang tidak mengalami deformasi atau posisinya selaras dengan datum (referensi) yang ditentukan secara periodik dengan metode survei. Pipa dapat berdiri tegak dengan memberikan pengukuran penurunan atau pengembangan atau horizontal dengan memberikan pengukuran deformasi lateral, misalnya di bagian hilir dari bendungan urugan.

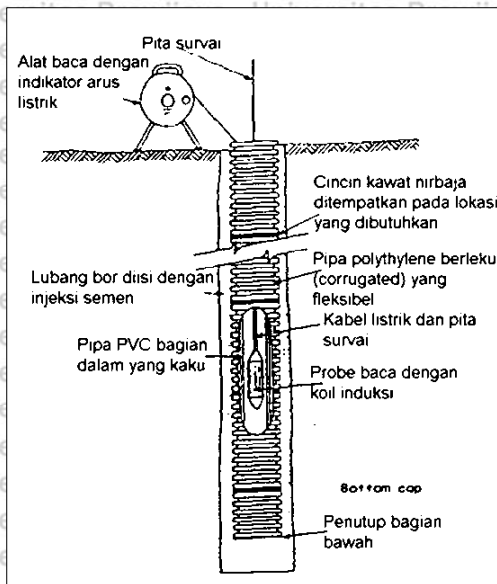
- a. Alat probe ekstensometer digunakan untuk memantau besaran deformasi vertikal dari tubuh atau fondasi bendungan urugan, dan tanggul. Empat jenis alat duga ekstensometer dibahas berikut ini.



Gambar 2.8. Crossarm Gage: a) Skema Pipa, dan b) Probe Pengukur  
Sumber: Kep Men Peremukiman Prasarana Wilayah (2004,p.33)

- b. Alat duga lengan melintang (*crossarm gage*) telah dikembangkan oleh USBR untuk pemasangan selama konstruksi bendungan urugan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 28, alat ini terdiri dari sebuah rangkaian potongan pipa teleskopik dengan potongan pilihan yang diangker pada bendungan dengan alat lengan melintang (*crossarm*) baja horizontal. *Crossarm* menjamin pipa-pipa dapat bergerak bersamaan dengan jumlah tekanan yang sama dari lapisan urugan di antaranya. Kedalaman titik pengukuran pada bagian ujung dari setiap pipa dalam diukur dengan probe yang mempunyai tali roda berpegas (*spring-loaded sensing pawls*) yang diturunkan dengan pita baja. Probe diturunkan persis di luar masing-masing pipa bagian dalam, dan dinaikkan sampai dengan pintu pada ujung yang lebih rendah. Pada waktu sampai dengan di dasar pipa, tali roda dicabut kembali, dan dikunci dalam badan probe. Penggunaan *crossarm* terbatas pada tubuh bendungan saja sebab alat duga tidak dapat dipasang pada lubang bor di dalam material fondasi. Oleh karena itu, alat ini hanya dapat diterapkan untuk konstruksi bendungan baru.
- c. Probe mekanik (*mechanical probe*) sama dengan probe yang ditunjukkan pada Gambar 2.8(b), dapat diturunkan dalam tabung (*casing*) inklinometer teleskopik untuk menentukan kedalaman ujung dasar potongan tabung (*casing*). Dalam tubuh bendungan urugan casing diatur mengikuti pola tekanan tanah dengan memasang kollar (*collar* = lingkaran baja) penurunan di bagian luar. Pemasangan kollar penurunan tidak mungkin dilakukan dalam lubang bor.



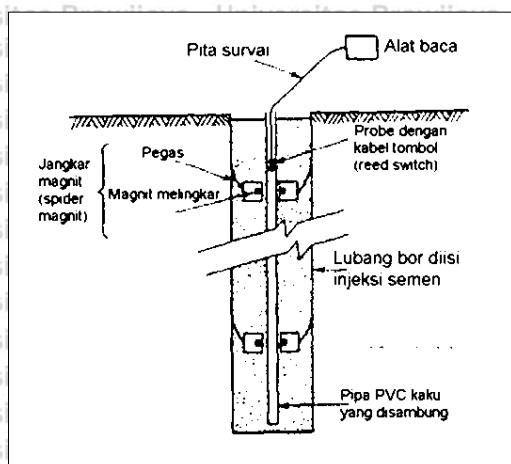


Gambar 2.9. Skema Sondex Probe Extensiometer (*Slope Indicator Company*) Terpasang dalam Lubang Bor.

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.34)

- d. Alat duga koil induksi (*induction coil gage*) terdiri dari pipa teleskopik yang tertanam, dan dikelilingi oleh cincin baja atau pelat pada titik pengukuran yang diperlukan. Alat pembaca terdiri dari sebuah koil utama yang ditempatkan dalam alat duga, dan sebuah kabel sinyal yang disambungkan pada indikator aliran. Pembacaan dilakukan dengan memasukkan alat duga melintang sepanjang pipa, dan tanpa tahapan jika aliran output mencapai maksimum. Skema alat ditunjukkan dalam Gambar 2.9. Seperti terlihat dalam Gambar, pemasangan lubang bor memerlukan injeksi (*grout*) yang harus dipilih dengan sangat hati-hati untuk menjamin sistem pengukuran dapat bergerak secara aksial dalam tanah. Hal ini biasanya tidak mungkin terjadi jika lapisan tanah berbeda-beda atau jika Tegangan Vertikal cukup besar, misalnya dalam fondasi tanggul. Jika alat duga dipasang secara horizontal dalam *shell* hilir dari bendungan urugan dengan pelat baja sekeliling pipa teropong, dapat dianggap sebagai alat duga pelat horizontal (*horizontal plate gage*). Susunan ini hanya dapat digunakan jika drainase muncul di bagian hilir inti bendungan. Sebagai alternatif pada alat duga, berbagai transducer dapat dihubungkan dengan batang di dalam pipa yang bergerak secara bertahap sepanjang pipa untuk memperoleh ketelitian pembacaan pengukuran.
- e. Alat duga magnet kabel bertombol (*magnet/reel switch gage*) didasarkan pada transducer, disusun seperti dalam Gambar 2.10. Magnet laba-laba (*spider*)

mempunyai angker-angker pegas untuk menyesuaikan dengan deformasi tanah sehingga dapat digunakan jika Tegangan Vertikal cukup besar.



Gambar 2.10. Skema Alat Ukur Probe Ekstensiometer dengan Magnet Kabel Bertombol dipasang Dalam Lubang Bor.

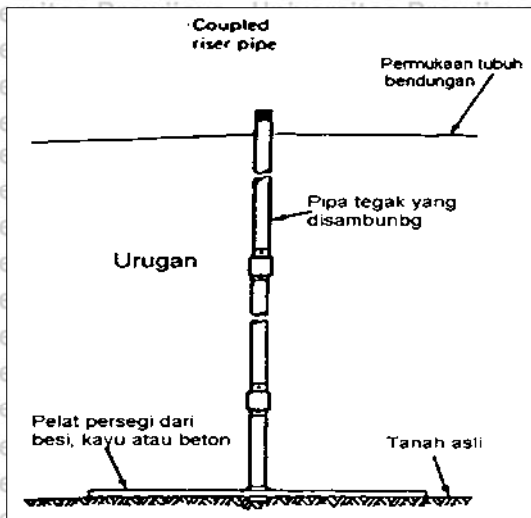
Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.35)

### 3. Alat ukur ekstensiometer urugan tetap

Ekstensiometer urugan tetap yang ditentukan dalam pedoman ini merupakan alat yang dipasang dalam tubuh bendungan maupun pada proses pengisian, untuk memantau perubahan jarak antara dua atau lebih alat ukur sepanjang sumbu tanpa menggunakan alat duga yang dapat bergerak. Alat itu digunakan untuk memantau penurunan, deformasi horizontal atau regangan. Tiga jenis alat tersebut dibahas berikut ini.

- a. Pelat penurunan (*settlement plate*) dapat digunakan untuk memantau penurunan material fondasi tanggul. Pelat penurunan terdiri dari pelat berbentuk segiempat dari besi, kayu atau beton yang dipasang pada elevasi tertentu di permukaan tanah asli, tempat pipa tegak disambungkan dengan elevasi tertentu, pelat penurun dapat dilihat pada Gambar 2.11. Pengukuran secara optik pada puncak pipa tegak akan memberikan data elevasi pelat. Walaupun alat ini sederhana, dan biasa digunakan, namun pipa tegak cenderung mengganggu penempatan urugan, dan akan cepat rusak jika tidak dilindungi.

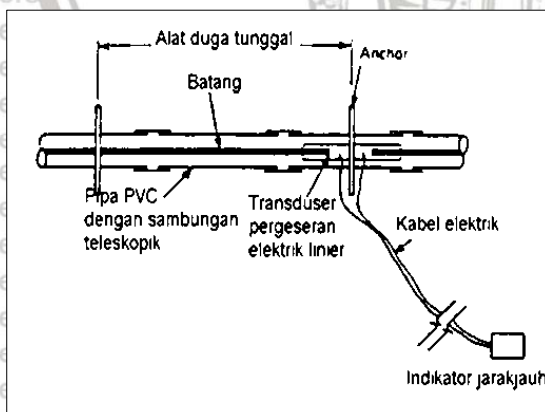




Gambar 2.11. Alat Pelat Penurunan

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.36)

- b. Penggunaan pelat tertanam yang identik dengan pelat baja atau beton dari pelat penurunan dapat menimbulkan masalah pada pipa bertangga gandengan. Untuk menentukan elevasi pembacaan secara teliti pada pelat, dibuat lubang bor vertikal atau bor tangan (*auger*) dari posisi permukaan hasil survei, tempat pelat, dan pengukuran kedalaman. Data yang akurat dapat diperoleh dari rencana lokasi awal pelat, dan elevasi, serta pelat yang cukup besar, dan rata.
- c. Alat duga listrik dengan transduser yang bergeser linier digunakan untuk memantau pergerakan horizontal dalam bendungan urugan. Alat ekstensiometer dapat dilihat pada Gambar 2.12.

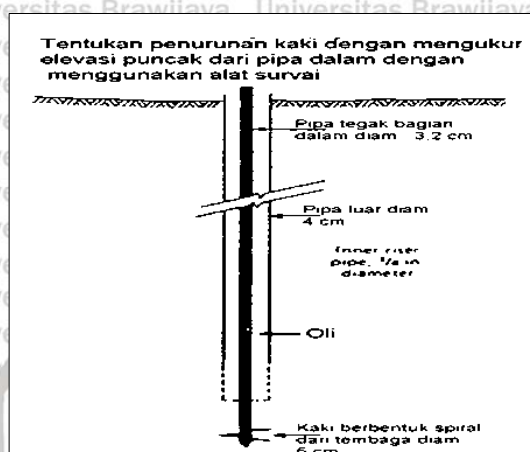


Gambar 2.12. Skema Alat Ekstensiometer Timbunan Tetap dengan *Electrical Linear Displacement Transducer*.

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.36)

#### 4. Alat ukur penurunan lapisan bawah permukaan

Alat ukur penurunan lapisan bawah permukaan digunakan untuk memantau penurunan akibat konsolidasi dari material fondasi, dan tubuh bendungan. Alat ini terdiri dari pipa tegak yang diangker pada dasar lubang bor vertikal, dan *casing* bagian luar untuk memisahkan pipa bertangga dari gaya-gaya seret akibat penurunan tanah yang terjadi di atas angker. Penurunan angker ditentukan dengan mengukur elevasi puncak pipa tegak dengan menggunakan metode survei. Alat penurunan lapisan bawah permukaan dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Skema Alat Ukur Penurunan dengan Ujung Berspiral  
Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.36)

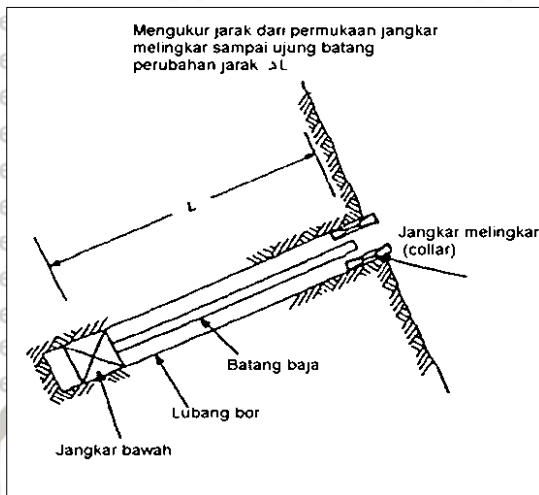
#### 5. Alat ukur ekstensometer lubang bor tetap

Kegunaan, dan jenis-jenis alat ukur ekstensometer lubang bor tetap adalah sebagai berikut.

- a. Ekstensometer lubang bor tetap yang ditentukan ini berupa alat yang dipasang di lubang bor dalam tanah atau batu untuk memantau perubahan jarak antara dua atau lebih alat ukur sepanjang sumbu lubang bor, tanpa menggunakan alat duga yang dapat bergerak.
- b. Beberapa jenis ekstensometer lubang bor tetap dapat digunakan. Perbedaan utama terletak pada jenis jangker, *SPBX* atau *MPBX*, jenis transduser, dan kepala ekstensometer. Aplikasi tipikal adalah memantau deformasi di belakang bidang lereng yang digali. Dasar pengoperasian ditunjukkan pada Gambar 2.14. Jarak dari permukaan angker melingkar ke ujung batang diukur dengan menggunakan transduser mekanik atau listrik. Alat yang diperlihatkan adalah sebuah ekstensometer lubang bor titik tunggal (*single point borehole ekstensometer, SPBX*), tetapi beberapa jenis angker bawah dapat juga dipasang dalam sebuah



lubang bor tunggal. Masing-masing lubang dihubungkan dengan batang angker *downhole* ke angker melingkar, untuk menghasilkan titik yang banyak (*multipoint point borehole extensometer, MPBX*) pada sebuah ekstensometer lubang bor. *MPBX* digunakan untuk memantau pola deformasi atau regangan sepanjang sumbu lubang yang beroperasi dengan baik sehingga zona yang berpotensi longsor, dan pergeseran internal yang berbahaya dapat dihindari dengan jarak (*spalling*) permukaan.



Gambar 2.14. Prinsip Dasar Alat Ekstensometer Lubang Bor Tetap  
Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.37)

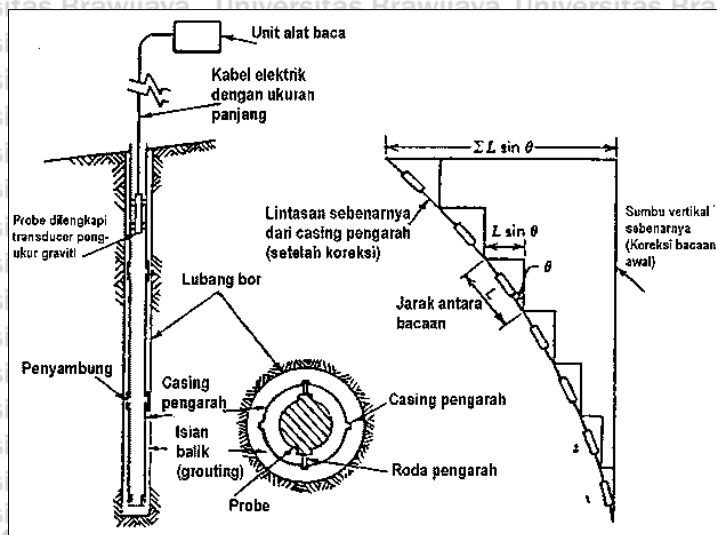
## 6. Inklinometer

Inklinometer didefinisikan sebagai alat untuk memantau deformasi sejajar, dan normal pada sumbu pipa fleksibel dengan cara memasukkan alat duga melewati pipa. Alat duga mencakup dua transduser sensing gravitasi (biasanya sebuah aselerometer keseimbangan gaya yang didesain untuk mengukur inklinasi terhadap arah vertikal).

Pipa dapat dipasang dalam lubang bor atau urugan, dan biasanya dipasang dalam alinyemen hampir vertikal sehingga inklinometer menghasilkan data untuk menentukan deformasi horizontal lapisan bawah permukaan.

a. Aplikasi inklinometer secara tipikal terdiri dari pemantauan besar, dan laju pergerakan horizontal bendungan urugan, dan tanggul, baik di tubuh bendungan maupun fondasi, serta pemantauan stabilitas longsor. Gambar 2.15 menunjukkan sistem inklinometer yang terdiri dari empat komponen yaitu casing penunjuk, alat duga portabel, alat baca portabel, dan kabel listrik bertingkat. Pada umumnya casing penunjuk yang terbuat dari ABS (*acrylonitrile/butadiene/styrene*), dihasilkan oleh pabrik pembuat inklinometer, dan tersedia dalam berbagai ukuran,

cocok untuk digunakan, dan tersedia dengan kopeling teleskopik untuk pemasangan yang akan menimbulkan Tegangan Vertikal yang signifikan. Casing campuran aluminium telah banyak digunakan, tetapi ternyata banyak mengalami korosi sehingga dianjurkan untuk tidak digunakan.



Gambar 2.15. Prinsip Operasi Inklinometer

Sumber: Kep Men Permukiman Prasarana Wilayah (2004,p.38)

- b. Setelah dilakukan pemasangan *casing*, dan survei lokasi tip, alat duga diturunkan sampai dengan ke dasar, dan dilakukan pembacaan inklinasi. Pembacaan tambahan yang dilakukan karena naiknya alat duga secara bertahap ke puncak *casing*, akan menghasilkan data untuk menentukan alinyemen awal *casing*. Perbedaan antara pembacaan awal ini, dan tahap berikutnya dapat menentukan setiap perubahan alinyemen. Apabila satu ujung casing dibuat tetap terhadap translasi atau translasi permukaan yang diukur dengan alat terpisah, perbedaan ini akan membantu penghitungan deformasi horizontal absolut pada setiap titik sepanjang *casing*.
- c. *Casing* inklinometer dapat juga dipasang secara horizontal di bagian hilir bendungan urugan, dan menghasilkan data untuk menentukan deformasi vertikal.
- d. Inklinometer setempat beroperasi dalam casing penunjuk yang sama seperti inklinometer jenis alat duga konvensional, tetapi unit transduser sensing gravitinya ditinggalkan di dalam *casing*. Jika dibandingkan dengan inklinometer konvensional, keuntungannya adalah pembacaan lebih cepat, opsi untuk pembacaan otomatis yang kontinu, dan opsi untuk hubungan antara “console” untuk transmisi data jarak jauh atau untuk menggerakkan alarm jika deformasi melebihi besaran awal yang ditentukan. Kerugiannya adalah lebih rumit, dan lebih mahal biaya perangkat kerasnya, perlindungan kerusakan lingkungan (air) untuk alat elektronik,



dan tidak dapat menentukan kualitas data dengan menggunakan prosedur pemeriksaan-jumlah inklinometer. Inklinometer setempat sebaiknya dipasang dengan jarak tertentu dengan zona geser yang telah ditentukan.

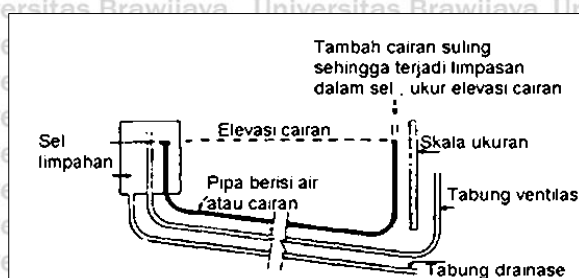
#### 7. Alat duga batas cairan (*liquid level gages*)

Alat duga batas cairan yang ditentukan dalam pedoman ini berupa instrumen yang menggabungkan pipa atau tabung berisi cairan untuk menentukan deformasi vertikal relatif. Elevasi relatif ditentukan dari keseimbangan batas cair dalam manometer atau dari tekanan yang diteruskan oleh cairan.

a. Aplikasi pertama alat duga batas cairan adalah memantau penurunan fondasi atau tubuh bendungan urugan, dan tanggul. Pada umumnya alat ini merupakan alternatif untuk ekstensometer alat duga vertikal, pelat penurunan, dan alat ukur penurunan lapisan bawah permukaan, yang membantu pemasangan tanpa mengganggu pengurugan, dan pemadatan normal, dan mengurangi potensi kerusakan instrumen.

b. Pada umumnya alat duga batas cair peka terhadap perubahan kepadatan cair akibat variasi temperatur, pengaruh tarikan permukaan, dan setiap diskontinuitas cairan dalam tabung berisi cairan. Kecermatan yang diperlukan oleh pabrik pembuat instrumen ini kadang-kadang tidak realistis sehingga berbagai sumber kesalahan harus dikurangi. Alat duga ini dapat dikategorikan sebagai alat duga titik tunggal, dan alat duga profil lengkap.

c. Alat duga titik tunggal yang paling sederhana diperlihatkan pada Gambar 2.16. Alat duga ini biasanya dibaca dengan menambahkan cairan ke dalam tabung berisi cairan pada stasiun pembacaan, yang menyebabkan limpasan dalam sel sehingga permukaan yang terlihat pada stasiun pembacaan menjadi stabil pada elevasi yang sama dengan tempat limpasan. Tabung dengan lubang udara diperlukan untuk mengatur tekanan tetap sama pada kedua permukaan cairan, dan tabung drainase diperlukan untuk mengalirkan cairan keluar dari sel.



Gambar 2.16. Skema Alat *Overflow Liquid Level* dengan Elevasi Sama

Sumber: Kep Men Peremukiman Prasarana Wilayah (2004,p.39)



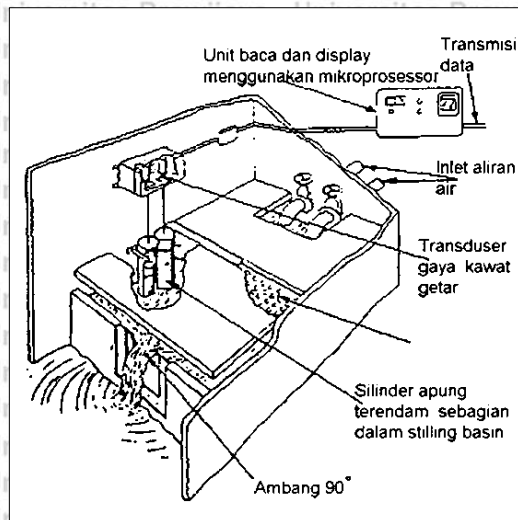
### 2.4.3. Alat Ukur Rembesan

Alat ukur rembesan pada bendungan urugan digunakan untuk mengukur besarnya rembesan melalui, sekeliling, dan di bawah bendungan. Pemantauan rembesan yang timbul di hilir diperlukan untuk menaksir perilaku bendungan pada waktu pengisian pertama waduk. Indikasi awal dari masalah potensi sering dinyatakan dengan perubahan laju rembesan yang teramati. Selain itu, pemantauan kadar zat padat dalam air rembesan dapat juga memberikan informasi yang penting. Pengamatan laju rembesan dapat dikorelasi dengan pengukuran tekanan pisometer, dan digunakan untuk memeriksa efektivitas saluran drainase, sumur pematics, dan dinding-halang. Pengukuran rembesan biasanya dilakukan selama umur layan bendungan untuk memantau kinerja jangka panjang. Sumur pematics, drainase pengeluaran (*outlet*), saluran, dan parit biasanya digunakan untuk mengukur rembesan tempat-tempat yang mengalami rembesan. Beberapa metode pengukuran rembesan yang biasa digunakan akan dibahas berikut ini. Tentang peralatan dijelaskan terperinci dalam publikasi *USBR* (1984, 1987).

#### 1. Ambang

Aliran rembesan sering diukur dengan ambang yang mempunyai bukaan limpahan berbentuk teratur, seperti V-notch, empat persegi panjang, trapesium, dan lain-lain. Laju rembesan ditentukan dengan mengukur jarak vertikal dari mercu bukaan limpahan ke permukaan air dalam waduk di bagian udik dari mercu. Kemudian pengukuran digunakan untuk menghitung laju aliran dengan mengacu pada Tabel untuk ukuran, dan bentuk ambang. Bagian kritis ambang mudah diperiksa, dan dibersihkan, dan setiap operasi yang tidak layak dapat mudah dideteksi, dan dikoreksi dengan cepat. Aliran ambang sering diukur dengan cara memantau elevasi air dalam ruang olak ambang. Metode pemantauan muka air meliputi alat duga muka air (*staff gage*), transduser tekanan pembersih gas, transduser tekanan terendam, pencatat grafik, *shaft-encoders*, transduser sonik, dan transduser gaya. Kriteria desain ruang olak ambang atau bendung meliputi panjang yang memadai, pencegahan pembacaan yang salah akibat adanya rintangan, dan perlindungan terhadap pembekuan. Jenis ambang yang bermanfaat dengan transduser gaya, yang dibuat oleh *Geonor, Norway* dapat dilihat pada Gambar 2.17.





Gambar 2.17. Monitoring Debit Bocoran Dengan Ambang  $90^\circ$  dengan Cara Pembacaan Jarak Jauh (*Remote*)

Sumber: Kep Men Peremukiman Prasarana Wilayah (2004,p.47)

## 2. Alat Ukur *Parshall Flumes*

*Parshall flumes* adalah bagian aliran saluran terbuka berbentuk khusus yang dapat dipasang dalam saluran atau parit untuk mengukur laju aliran. Batang leher saluran air (*flume*) yang menyempit menghasilkan tinggi tekan diferensial sesuai dengan laju aliran. Metode pemantauan muka air adalah sama seperti untuk ambang. Pendekatan kriteria desain *flume* meliputi panjang yang cukup memadai, alinyemen, pencegahan pembacaan yang salah akibat rintangan, dan perlindungan terhadap pembekuan.

## 2.5. Permeabilitas

Permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga pori. Pori-pori tanah saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya. Sehingga air dapat mengalir dari titik dengan tinggi energi tinggi ke titik dengan tinggi energi yang lebih rendah. Untuk tanah, permeabilitas dilukiskan sebagai sifat tanah yang mengalirkan air melalui rongga pori tanah (Hardiyatmo, 2002,p.145).

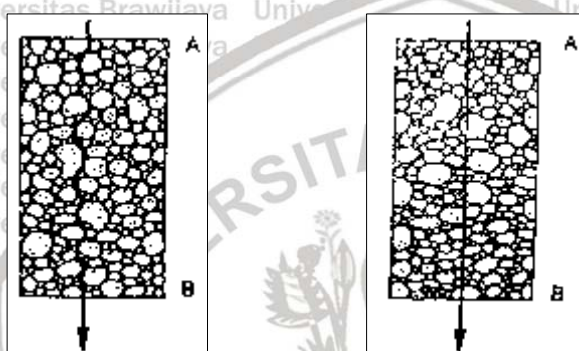
Di dalam tanah, sifat aliran mungkin laminar atau turbulen. Tahanan terhadap aliran bergantung pada jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga pori. Temperatur juga sangat mempengaruhi tahanan aliran (kekentalan dan tegangan permukaan). Walaupun secara teoritis semua jenis tanah lebih atau kurang mempunyai rongga pori, dalam praktek, istilah mudah meloloskan air (*permeable*) dimaksud untuk tanah yang benar-benar mempunyai sifat meloloskan air. Sebaliknya tanah



disebut kedap air (*impermeable*), bila tanah tersebut mempunyai kemampuan meloloskan air yang sangat kecil.

### 2.5.1. Garis Aliran

Aliran air lewat suatu kolom tanah diperlihatkan dalam gambar 2.18.a Masing-masing partikel air bergerak dari ketinggian A ke ketinggian B yang lebih rendah, mengikuti lintasan yang berkelok-kelok (ruang pori) diantara butiran padatnya. Kecepatan air bervariasi dari titik ke titik tergantung dari ukuran dan konfigurasi rongga pori. Akan tetapi, dalam praktek, tanah dianggap sebagai satu kesatuan dan tiap partikel air dianggap bergerak melewati lintasan lurus yang disebut garis aliran (lihat gambar 2.18.b).



(a) Aliran Sebenarnya

(b) Aliran Anggapan

Gambar 2.18. Aliran Air Tanah  
Sumber: Hardiyatmo (2002,p.146)

### 2.5.2. Aliran Air Dalam Tanah

Aliran air arah horisontal yang melewati tabung berisi tanah ditampilkan pada gambar 2.19. Tinggi energi total (*total head*) adalah tinggi energi elevasi atau *elevation head* ( $z$ ) ditambah tinggi energi tekanan atau *pressure head* ( $h$ ) yaitu ketinggian kolom air  $h_A$  atau  $h_B$  di dalam pipa ukur dalam milimeter atau meter di atas titiknya. Untuk aliran air di dalam tanah, tinggi energi kecepatan (*velocity head*) diabaikan karena nilainya sangat kecil. Ketinggian air di dalam pipa piezometer menunjukkan tekanan air pada titik tersebut. Tekanan air pada titik tertentu dapat dinyatakan oleh persamaan sebagai berikut:

$$p = \gamma_w \cdot h \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

Dengan demikian tinggi energi tekanan (*pressure head*) pada titik A dan B adalah:

$$h_A = \frac{p_A}{\gamma_w} \text{ dan } \frac{p_B}{\gamma_w} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan  $p$  adalah tekanan ( $t/m^2$ ,  $kN/m^2$ ),  $h$  adalah tinggi energi tekanan (m) dan  $\gamma_w$  adalah berat volume air ( $t/m^3$ ,  $kN/m^3$ ). Tekanan air pori biasanya diukur terhadap tekanan atmosfer relatif. Ketinggian air dengan tekanan atmosfer nol, didefinisikan sebagai



permukaan air tanah atau permukaan freatis. Kondisi artesis dapat terjadi jika lapisan tanah miring yang berpermeabilitas tinggi diapit oleh dua lapisan tanah yang berpermeabilitas rendah.

Tekanan hidrostatik bergantung pada kedalaman suatu titik di bawah muka air tanah. Untuk mengetahui besar tekanan air pori, teori Bernoulli dapat diterapkan. Menurut Bernoulli, tinggi energi total (*total head*) pada suatu titik A dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$h_A = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

dengan:

$h$  = tinggi energi total (*total head*) (m)

$p/\gamma_w$  = tinggi energi tekanan (*pressure head*) (m)

$p$  = tekanan air ( $t/m^2$ ,  $kN/m^2$ )

$v^2/2g$  = tinggi energi kecepatan (*velocity head*) (m)

$v$  = kecepatan air (m/det)

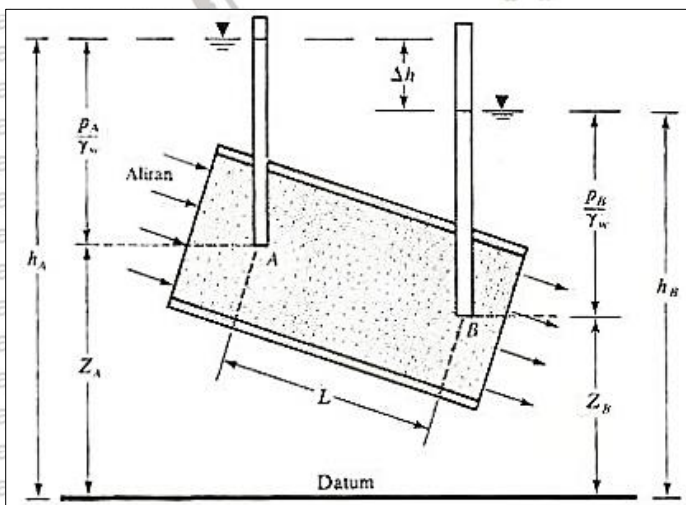
$\gamma_w$  = berat volume air ( $t/m^3$ ,  $kN/m^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/dt^2$ )

$z$  = tinggi energi elevasi (m)

Karena kecepatan rembesan di dalam tanah sangat kecil, maka tinggi energi kecepatan dalam dalam suku persamaan Bernoulli dapat diabaikan. Sehingga persamaan tinggi energi total menjadi,

$$h_A = \frac{p}{\gamma_w} + z \quad \dots \dots \dots (2-4)$$



Gambar 2.19. Aliran Air Tanah

Sumber: Hardiyatmo (2002,p.148)

Dari persamaan Bernoulli, kehilangan tinggi energi antara dua titik A dan B ( $\Delta h$ ) dinyatakan oleh persamaan:

$$\Delta h = \left( \frac{p_A}{\gamma_w} + z_A \right) - \left( \frac{p_B}{\gamma_w} + z_B \right) \quad (2-5)$$

Persamaan (2-5) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta h = (h_A + z_A) - (h_B + z_B) \quad (2-6)$$

dengan  $h_A$  dan  $h_B$  berturut-turut adalah tinggi energi tekanan pada titik A dan B. Gradien

hidrolik (*hydraulic gradient*) ( $i$ ), dirumuskan sebagai berikut:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (2-7)$$

dengan  $L$  adalah jarak antara potongan A dan B. Nilai tinggi energi elevasi ( $z$ ) diambil

positif bila titik yang ditinjau terletak di atas bidang referensi (datum) seperti gambar 2.19,

dan negatif bila di bawahnya. Jarak vertikal antara elevasi piezometer di A dan B, disebut

tinggi energi hidrolik (*hydraulic head*), yaitu  $\Delta h$ .

Jika kecepatan aliran air dalam tanah nol, semua ketinggian air dalam pipa piezometer akan menunjukkan elevasi yang sama dan berimpit dengan permukaan horisontal air tanah.

Bila terdapat aliran air tanah, ketinggian air dalam pipa piezometer akan berkurang dengan jarak alirannya.

Darcy (1956), mengusulkan hubungan antara kecepatan dan gradien hidrolik sebagai berikut:

$$v = k \cdot i \quad (2-8)$$

dengan:

$v$  = kecepatan air (cm/dtk)

$i$  = gradien hidrolik

$k$  = koefisien permeabilitas (cm/det)

sedangkan debit rembesan ( $q$ ) dinyatakan dalam persamaan:

$$q = k \cdot i \cdot A \quad (2-9)$$

dengan  $A$  = luas penampang pengaliran. Koefisien permeabilitas ( $k$ ) mempunyai satuan yang sama dengan kecepatan cm/det atau mm/det, yaitu menunjukkan ukuran tahanan tanah terhadap aliran air.

Perhatikan bahwa kecepatan yang diberikan dalam persamaan (2-8) adalah kecepatan air yang dihitung berdasarkan luas kotor penampang tanah. Karena air hanya dapat mengalir lewat ruang pori, maka kecepatan nyata rembesan lewat rongga tanah ( $v_s$ ), dinyatakan oleh persamaan:



$$v_s = \frac{v}{n} \dots \dots \dots (2-10)$$

atau,

$$v_s = \frac{ki}{n} \dots \dots \dots (2-11)$$

dengan  $n = V_v/V$  adalah porositas dari tanah.

## 2.6. Rembesan Pada Struktur Bendungan

Hukum Darcy dapat digunakan untuk menghitung debit rembesan yang melalui struktur bendungan. Dalam merencanakan sebuah bendungan, perlu diperhatikan stabilitasnya terhadap bahaya longsor, erosi lereng, dan kehilangan air akibat rembesan yang melalui tubuh bendungan. Beberapa cara yang diberikan untuk menentukan besarnya rembesan yang melewati bendungan yang dibangun dari tanah homogen. Berikut ini disajikan beberapa cara untuk menentukan debit rembesan (Hardiyatmo, 2002:233).

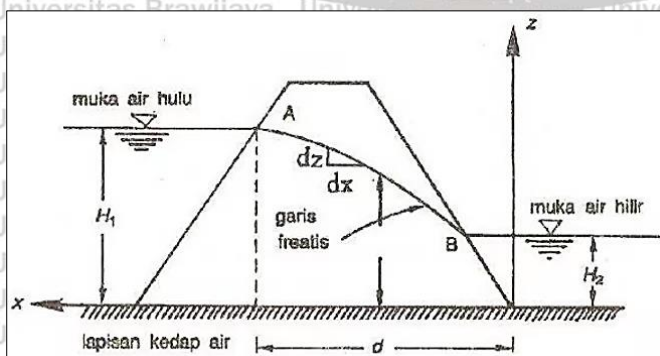
### 1. Cara Dupuit

Potongan melintang sebuah bendungan ditunjukkan pada gambar 2.20. Garis AB adalah garis permukaan freatis, yaitu garis rembesan paling atas. Besarnya rembesan per satuan lebar arah tegak lurus bidang gambar yang diberikan oleh Darcy, adalah  $q = kiA$ . Dupuit (1863), menganggap bahwa gradien hidrolik ( $i$ ) adalah sama dengan kemiringan permukaan freatis dan besarnya konstan dengan kedalaman yaitu  $i = dz/dx$ .

Maka,

$$q = \frac{k}{2d} (H_1^2 - H_2^2) \dots \dots \dots (2-12)$$

Persamaan (2-12) memberikan permukaan garis freatis dengan bentuk parabolis. Akan tetapi, derivatif dari persamaannya tidak mempertimbangkan kondisi masuk dan keluarnya air rembesan pada tubuh bendungan. Lagi pula, jika  $H_2 = 0$ , garis freatis akan memotong permukaan kedap air.

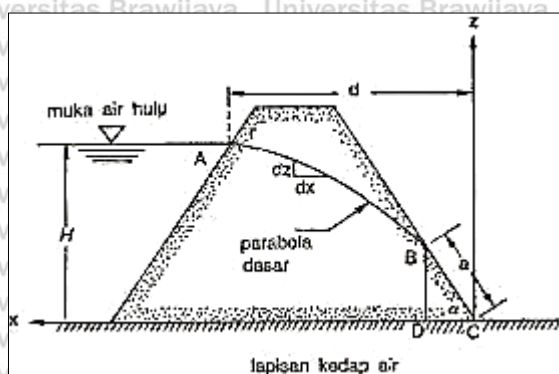


Gambar 2.20. Hitungan Rembesan Cara Dupuit

Sumber: Hardiyatmo (2002,p.234)

## 2. Cara Schaffernak

Untuk menghitung rembesan yang lewat bendungan, Schaffernak (1917) menganggap bahwa permukaan freatis akan merupakan garis AB dalam gambar 2.21, yang memotong garis kemiringan hilir pada jarak a dari dasar lapisan kedap air. Rembesan persatuan panjang bendungan dapat ditentukan dengan memperhatikan bentuk segitiga BCD dalam gambar 2.21:



Gambar 2.21. Hitungan Rembesan Cara Schaffernak

Sumber: Hardiyatmo (2002,p.235)

Debit rembesan  $q = kiA$

Luas aliran:  $A = BD \times 1 = a \sin \alpha$

Dari anggapan Dupuit, gradien hidrolik  $i = dz/dx = \text{tg } \alpha$ . Maka,

$$q = kz \frac{dz}{dx} k a \sin \alpha \text{tg } \alpha \dots\dots\dots (2-13)$$

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\left(\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{H^2}{\sin^2 \alpha}\right)} \dots\dots\dots (2-14)$$

setelah nilai a diketahui, debit rembesan dapat ditentukan dari persamaan:

$$q = ka \sin \alpha \text{tg } \alpha \dots\dots\dots (2-15)$$

## 3. Cara A. Casagrande

A. casagrande (1937) mengusulkan cara untuk menghitung rembesan lewat tubuh bendungan yang didasarkan pada pengujian model. Parabola AB (gambar 2.21) berawal dari titik A' seperti yang diperlihatkan dalam gambar 2.22,  $A'A = 0,3 (AD)$ .

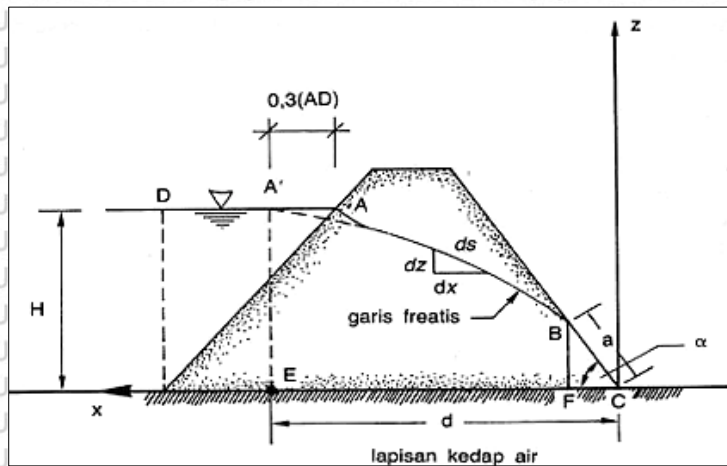
Pada modifikasi ini, nilai d yang digunakan dalam persamaan (2-14) akan merupakan jarak horizontal antara titik E dan C.

Persamaan (2.15) diperoleh berdasarkan anggapan cara Dupuit dimana gradien hidrolik (i) sama dengan  $dz/dx$ . A. Casagrade (1932) menyarankan hubungan secara pendekatan yang didasarkan pada kondisi kenyataannya. Dalam kenyataan cara Casagrande dapat dilihat pada (gambar 2.22).



$$i = \frac{dz}{ds} \quad (2-16)$$

Untuk kemiringan lereng  $\alpha$  yang lebih besar dari  $30^\circ$ , deviasi dari anggapan Dupuit menjadi kenyataan. Berdasarkan pada persamaan (2-16), debit rembesan adalah:

$$q = kiA.$$


Gambar 2.22. Hitungan Rembesan Cara Casagrande  
Sumber: Hardiyatmo (2002,p.238)

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{(d^2 - H^2)} \quad (2-17)$$

Tubuh bendungan maupun pondasinya diharuskan mampu mempertahankan diri terhadap gaya-gaya yang ditimbulkan oleh adanya air filtrasi yang mengalir melalui celah-celah antara butiran-butiran tanah pembentuk tubuh bendungan dan pondasi tersebut (Sosrodarsono, 1977,p.156). Untuk mengetahui kemampuan daya tahan tubuh bendungan serta pondasinya tersebut diatas, maka diperlukan langkah-langkah sebagai berikut:

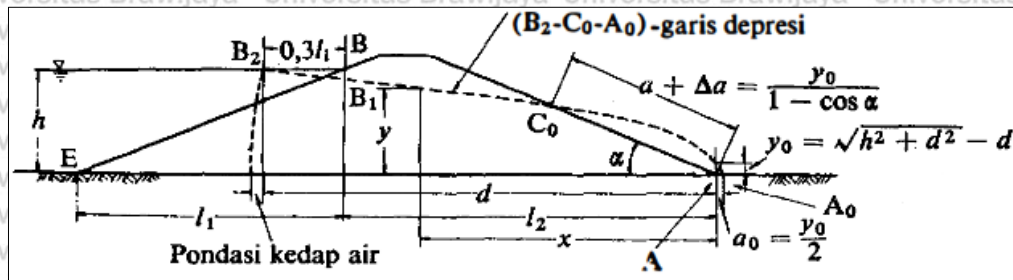
- Formasi garis depresi (*seepage line formation*) dalam tubuh bendungan dengan elevasi tertentu permukaan air dalam waduk yang direncanakan.
- Kapasitas air filtrasi yang mengalir melalui tubuh bendungan dan pondasi bendungan.
- Kemungkinan terjadinya gejala sufosi (*piping*) yang disebabkan oleh gaya-gaya hidrodinamis dalam aliran filtrasi.

Hal-hal tersebut dapat diketahui dengan mendapatkan formasi garis depresi (*seepage line formation*) dalam tubuh bendungan dan membuat suatu jaringan aliran trayektori aliran filtrasi (*seepage flow-net*) dalam tubuh serta pondasi bendungan.

a. Formasi Garis Depresi

Formasi garis depresi pada zona kedap air suatu bendungan dapat diperoleh dengan metode casagrande. Apabila angka permeabilitas vertikalnya  $\sqrt{k_v/k_h}$  kali.

Pada gambar 2.23, ujung tumit hilir bendungan dianggap sebagai titik permulaan koordinat dengan sumbu x dan y, maka garis depresi dapat diperoleh dengan persamaan parabola bentuk dasar sebagai berikut:



Gambar 2.23. Garis Depresi pada Bendungan Homogen (Sesuai Dengan Garis Parabola)

Sumber: Sosrodarsono (1977,p.156)

$$y = \sqrt{2y_0x + y_0^2} \dots\dots\dots (2-18)$$

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \dots\dots\dots (2-19)$$

dengan:

h = jarak vertikal antara titik-titik A dan B

d = jarak horizontal antara titik B<sub>2</sub> dan A

l<sub>1</sub> = jarak horizontal antara titik-titik B dan E

l<sub>2</sub> = jarak horizontal antara titik-titik B dan A

A = ujung tumit hilir bendungan

B = titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan

A<sub>1</sub> = titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis depresi dengan garis vertikal melalui titik B

B<sub>2</sub> = titik yang terletak sejauh 0,3 l<sub>1</sub>, horizontal ke arah udik dari titik B

b. Pembuatan Jaringan Trayektori aliran Filtrasi (*seepage flow-net*)

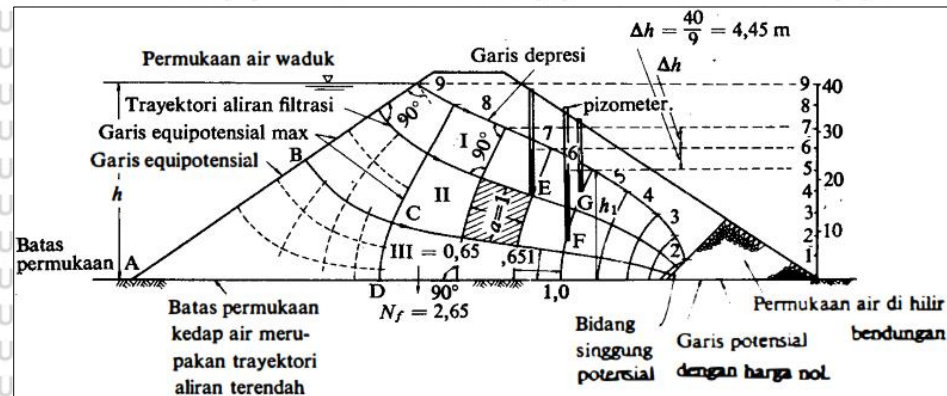
Berbagai metode telah dikembangkan untuk membuat jaringan trayektori aliran filtrasi pada bendungan urugan dan metode yang paling sesuai dan sederhana adalah metode grafis yang diperkenalkan oleh *Forchheimer* (*Forchheimer's diagramatical solution*).

Akan tetapi metode ini mempunyai kelemahan yang cukup menonjol, dimana penggunaannya akan mencapai hasil yang baik, hanya oleh tenaga ahli yang cukup



berpengalaman. Didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi yang telah tergambar, selanjutnya dapat dihitung kapasitas air filtrasi dengan ketelitian yang cukup baik dan gambar tersebut akan sangat cocok dengan kenyataan apabila dibuat oleh tenaga ahli yang cukup berpengalaman.

Contoh jaringan trayektori aliran filtrasi dapat dilihat pada gambar 2.24.



Gambar 2.24. Jaringan Trayektori Aliran Filtrasi Dalam Tubuh Bendungan (Dengan Jumlah Potensial = 9)

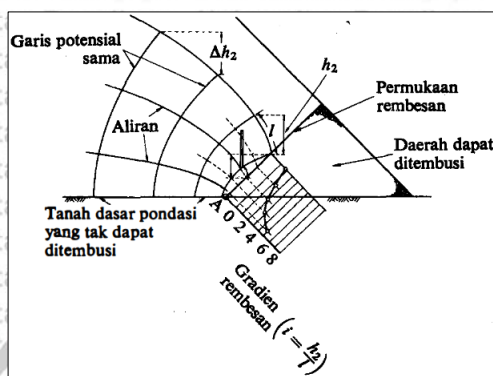
Sumber: Sosrodarsono (1977,p.161)

Untuk menggambar jaringan trayektori aliran filtrasi melalui sebuah bendungan supaya diperhatikan hal-hal sebagai berikut:

- Trayektori aliran filter dengan garis equi-potensial berpotongan secara tegak lurus, sehingga akan membentuk bidang-bidang yang mendekati bentuk-bentuk bujur-sangkar atau persegi panjang.
- Jadi apabila diperhatikan bentuk bidang ABCD pada gambar 2.23 hanya mendekati bujur sangkar, akan tetapi apabila dibagi-bagi lagi menjadi bagian yang lebih kecil, maka bentuk bujur sangkarnya akan semakin nyata.
- Biasanya bidang-bidang yang terbentuk oleh perpotongan trayektori aliran filtrasi dengan garis-garis equi-potensial tersebut di atas lebih mendekati bentuk-bentuk persegi panjang dan pada semua persegi panjang yang terjadi, perbandingan antara sisi pendek dan sisi panjangnya mendekati harga yang sama.
- Pada bidang di bawah atmosfer, dimana aliran filtrasi tersembul keluar, bukan merupakan trayektori aliran filtrasi dan bukan pula merupakan garis equi-potensial, karenanya tidak akan terbentuk bidang-bidang berbentuk persegi panjang dan trayektori aliran filtrasi dengan permukaan tersebut tidak akan berpotongan secara vertikal.



- Garis depresi yang berpotongan dengan bidang dibawah tekanan atmosfer (titik tertinggi tersembulnya aliran filtrasi), tertera pada gambar 2.24.
- Titik perpotongan antara garis-garis equi-potensial dengan garis depresi adalah dengan interval ( $\Delta h$ ) yang diperoleh dengan membagi tinggi tekanan air (perbedaan antara elevasi permukaan air dalam waduk dan permukaan air di bagian hilir bendungan) dengan suatu bilangan integer (bilangan bulat). Gradien rembesan pada bendungan urugan tanah dapat dilihat pada Gambar 2.25.



Gambar 2.25. Gradien Rembesan Pada Bendungan Urugan Tanah  
Sumber: Sosrodarsono (1977,p.162)

### c. Kapasitas Aliran Filtrasi

Kapasitas aliran filtrasi adalah kapasitas rembesan air yang mengalir ke hilir melalui tubuh dan pondasi bendungan. Kapasitas filtrasi suatu bendungan mempunyai batas-batas tertentu yang mana apabila kapasitas filtrasi melampaui batas tersebut, maka kehilangan air yang terjadi akan cukup besar, disamping itu kapasitas filtrasi yang besar dapat menimbulkan gejala sufosi (*piping*) yang membahayakan kestabilan tubuh bendungan. Untuk memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi suatu bendungan (baik yang melalui tubuh bendungan maupun yang melalui lapisan pondasi) dapat dilakukan dengan menggunakan jaringan trayektori aliran filtrasi atau dengan menggunakan rumus-rumus empiris.

#### 2.6.1. Keamanan Ijin Terhadap Rembesan (Menurut Look, 2007)

Kuantitas rembesan yang ditoleransi berkaitan dengan jumlah kuantitas rembesan yang diijinkan dan ditoleransi kemanannya. Pada umumnya batas rembesan maksimum dikaitkan dengan tinggi bendungan, panjang bendungan utama dan permeability dari core (Menurut Look, 2007,p.200). Kuantitas rembesan yang diijinkan dapat dilihat pada Tebel 2.4. dibawah ini.



Tabel 2.4. Rembesan yang Dijinkan pada Bendungan

Dam Height (m)	Seepage, litres/day/metre (litres/minute/metre)	
	O.K.	Not O.K.
<5,0	<25 (0,02)	<250 (0,03)
5,0 – 10,0	<250 (0,03)	<100 (0,07)
10,0 – 20,0	<100 (0,07)	<200 (0,14)
20,0 – 40,0	<200 (0,14)	<400 (0,28)
>40,0	<400 (0,28)	<800 (0,56)

Sumber: Look (2007,p.200)

### 2.6.2. Keamanan Ijin Terhadap Rembesan (Menurut Soedibyo, 2003)

Rembesan yang timbul di bawah pondasi dan di kaki kiri (*left abutment*) serta kaki kanan (*right abutment*) tidak boleh melebihi batas yang telah ditentukan. Perhitungan dapat dilakukan dengan membuat jaringan aliran air (*flow net*).

Ada 2 hal yang perlu diperhatikan dalam batasan atau ijin terhadap rembesan yang terjadi pada bendungan urugan (Soedibyo, 2003,p.80) yaitu:

1. Kecepatan kritis dari bahan bangunan tidak dilampaui. Apabila kecepatan kritisnya dilampaui maka ada butiran-butiran kecil yang terbawa aliran yang akan menimbulkan pori-pori. Dengan demikian lebih menambah kecepatan air dan kalau dibiarkan akan menimbulkan bahaya piping. Agar bendungan stabil kecepatan aliran tidak boleh melebihi kecepatan aliran kritis. Justin telah menemukan rumus sebagai berikut:

$$V_c = \sqrt{\frac{W_{ef} \cdot g}{F \cdot \gamma_w}} \dots \dots \dots (2-20)$$

dengan:

$V_c$  = kecepatan kritis butir

$W_{ef}$  = berat efektif

$g$  = percepatan gravitasi bumi = 9,78 m/detik<sup>2</sup>

$F$  = luas daerah butir yang memungkinkan terjadinya aliran

$\gamma$  = berat jenis air = 1

sehingga rumus dapat ditulis:

$$\sqrt{k} = \sqrt{9,87 \cdot \frac{W_{ef}}{F}} \dots \dots \dots (2-21)$$

2. Debit air rembesan tidak boleh dilampaui. Hal ini selain membahayakan bendungan juga menyebabkan pengoperasian waduk tidak efektif. Maka debit air rembesan harus

dibatasi yaitu maksimal 2% - 5% debit rata-rata yang masuk ke dalam waduk. Makin besar debit rata-rata, presentasi maksimal yang diambil harus makin kecil.

Untuk menentukan besarnya debit rembesan air terdapat rumus:

$$q = \frac{N_f}{N_p} \cdot k \cdot h \quad \dots \dots \dots (2-22)$$

dengan:

$q$  = debit rembesan air

$N_f$  = jumlah aliran air (*flow channels*)

$N_p$  = jumlah penurunan tenaga potensial yang sama

$k$  = koefisien rembesan

$h$  = selisih tinggi permukaan air

## 2.7. Deformasi

Jika lapisan tanah dibebani, maka tanah akan mengalami regangan atau penurunan (*settlement*). Regangan yang terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh dua akibat, yaitu berubahnya susunan tanah dan berkurangnya rongga pori di dalam tanah tersebut. Jumlah dari regangan diseluruh kedalaman lapisan tanah, merupakan penurunan total tanah. Persamaan umum untuk kriteria aman yang terhadap *settlement* menurut (Novak, 2007,p.99):

$$SI = \frac{\Delta s}{1000H \text{ Log } t_2/t_1} \leq 0,02 \quad \dots \dots \dots (2-23)$$

dengan:

$SI$  = *settlement index*

$\Delta s$  = penurunan puncak dalam millimeter (mm) yang terjadi dalam interval waktu  $t_1$  ke  $t_2$  setelah selesai tanggul dengan ketinggian H meter

$H$  = tinggi bendungan (m)

$t_1$  = waktu dari selesainya bendungan urugan sampai pengamatan penurunan pertama dalam satuan tahun

$t_2$  = waktu dari selesainya bendungan urugan sampai pengamatan penurunan kedua dalam satuan tahun



## 2.8. Analisis Stabilitas Lereng Bendungan

### 2.8.1. Umum

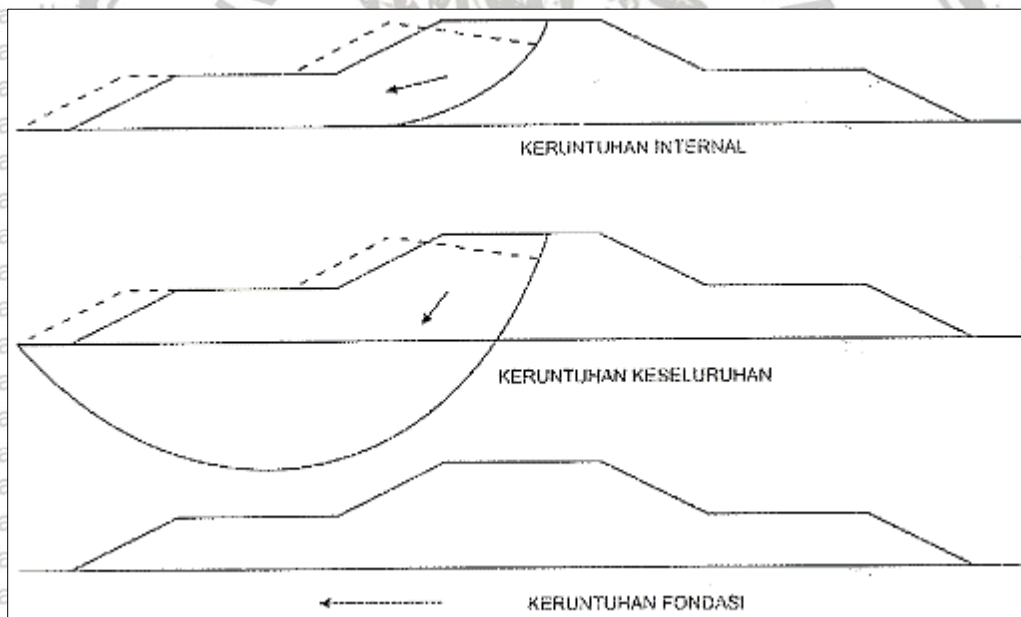
Perhitungan stabilitas lereng bendungan urugan tanah, dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu:

1. Cara keseimbangan batas (*limit equilibrium method*)
2. Cara elemen hingga (*finite elemen method*)

Pada cara keseimbangan batas, perlu diperhatikan empat pola keruntuhan yang terjadi yaitu:

1. Daya dukung (*bearing capacity*)
2. Keruntuhan internal (*internal stability*)
3. Keruntuhan fondasi (*foundation stability*)
4. Keruntuhan keseluruhan (*overall stability*)

Pola keruntuhan lereng pada bendungan di atas tanah lunak dapat dilihat pada gambar 2.26 di bawah ini.

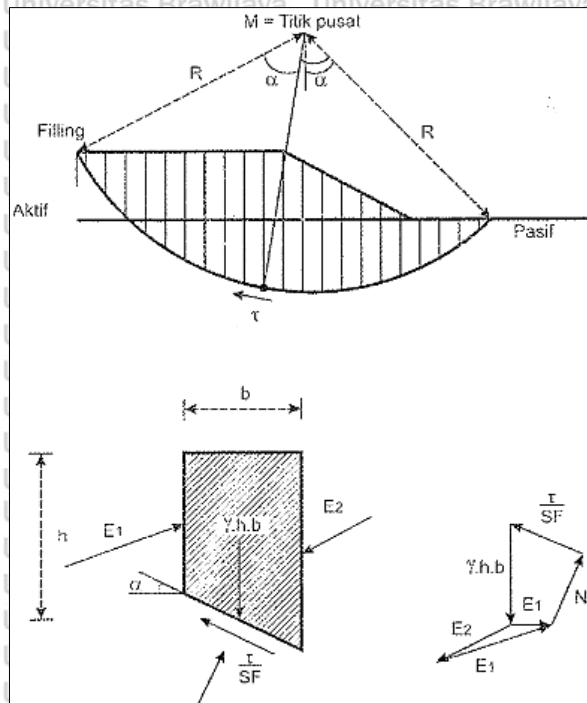


Gambar 2.26. Pola Keruntuhan Timbunan di Atas Tanah Lunak

Sumber: Pembangunan Bendungan Urugan pada Pondasi Tanah Lunak (2007,p.43)

## 2.8.2. Metode Bidang Longsor Lingkaran

Metoda Bishop yang dimodifikasi digunakan untuk bidang longsor berbentuk sirkular (*circular slip surface*). Bidang longsor sirkular dengan penampang-penampang irisannya dapat dilihat pada gambar 2.27 di bawah ini.



Gambar 2.27. Bidang Longsor Sirkular dengan Penampang-penampang Irisannya

Sumber: Pembangunan Bendungan Urugan pada Pondasi Tanah Lunak (2007,p.43)

Metoda bishop yang digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng mempunyai beberapa keterbatasan yaitu:

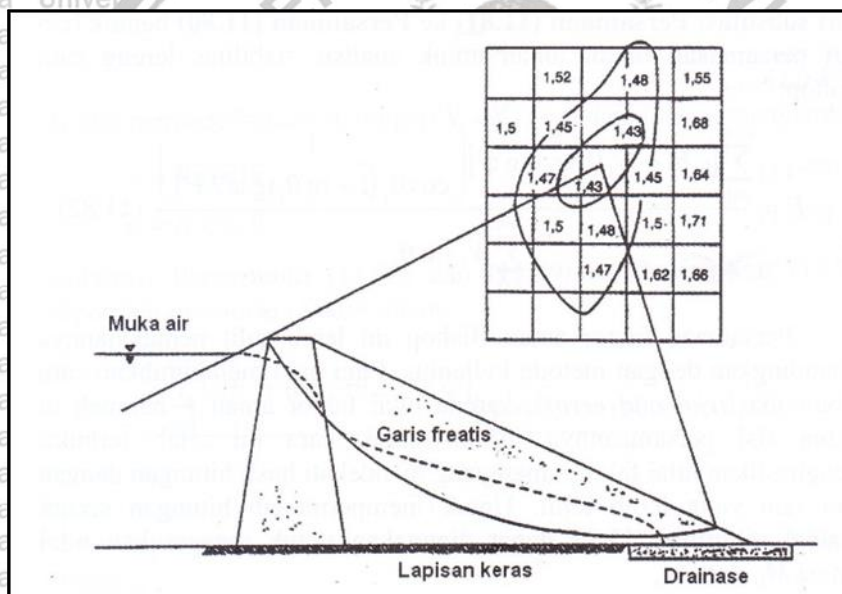
1. Hanya cocok untuk bidang kelongsoran berbentuk sirkular/lingkaran.
2. Tidak memperhitungkan gaya-gaya yang bekerja antara irisan dan yang diperhitungkan hanya gaya-gaya horisontalnya saja.

Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metode Fellenius. Lagi pula membutuhkan cara coba-coba (*trial and error*), karena nilai faktor aman  $F$  nampak di kedua sisi persamaannya. Akan tetapi, cara ini telah terbukti menghasilkan nilai faktor aman yang mendekati hasil hitungan dengan cara lain yang lebih teliti (Hardiyatmo, 2010,p.451).

Lokasi lingkaran longsor kritis dari metode Bishop (1955), biasanya mendekati dengan hasil pengamatan di lapangan. Karena itu, walaupun metode Fellenius lebih mudah, metode Bishop (1955) lebih disukai.



Dalam praktek, diperlukan cara coba-coba dalam menemukan bidang longsor dengan nilai faktor aman yang kecil. Jika bidang longsor dianggap lingkaran, maka lebih baik kalau dibuat kotak-kotak dimana tiap titik potong garis-garisnya merupakan tempat kedudukan pusat lingkaran longsor. Pada titik-titik potong garis yang merupakan pusat lingkaran longsor, dituliskan nilai faktor aman terkecil pada titik tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.28. Perlu diketahui bahwa pada tiap titik pusat lingkaran harus dilakukan pula hitungan faktor aman untuk menentukan nilai faktor aman terkecil dari bidang longsor dengan pusat lingkaran pada titik tersebut, yaitu dengan cara mengubah jari-jari lingkarannya. Kemudian, setelah faktor aman terkecil pada tiap-tiap titik pada kotaknya diperoleh, digambarkan garis kontur yang menunjukkan tempat kedudukan dari titik-titik pusat lingkaran yang mempunyai faktor aman yang sama. Gambar 2.28 menunjukkan contoh kontur-kontur faktor aman yang sama. Dari kontur faktor aman tersebut dapat ditentukan letak kira-kira dari pusat lingkaran yang menghasilkan faktor aman terkecil (Hardiyatmo, 2010,p.453).



Gambar 2.28. Contoh Kontur Faktor Aman

Sumber: Hardiyatmo (2010,p.452)

## 2.9. Simulasi Tampang Waduk

Salah satu bentuk persamaan tampang yang sering digunakan untuk operasi waduk adalah persamaan kontinuitas yang memberi hubungan antara masukan, keluaran dan perubahan tampang yang disebut analitis perilaku (model simulasi).

Persamaan tersebut dinyatakan sebagai berikut (Mc. Mahon, 1978,p.24):



$$S_{(t+1)} = S_t + Q_t - O_t - E_t - L_t \dots\dots\dots (2-24)$$

$$\text{Kendala } 0 \leq S_t \leq C$$

dengan:

$S_{(t+1)}$  = Tampungannya akhir pada periode t (tampungannya awal pada periode t+1)

$S_t$  = Tampungannya awal pada periode t

$Q_t$  = Inflow pada saat periode t

$O_t$  = Outflow pada periode t

$E_t$  = Kehilangan akibat evaporasi pada saat periode t

$C$  = Tampungannya efektif (tampungannya efektif)

$L_t$  = Kehilangan air di waduk (bisa diabaikan)

Aturan umum dalam waduk:

1. Air waduk tidak boleh turun dibawah tumpangannya aktif. Dalam banyak keadaan maka batas bawah tumpangannya aktif ini ditentukan oleh tingginya lubang outlet waduk.
2. Air waduk tidak dapat melebihi batas atas tumpangannya aktif. Dalam banyak keadaan maka batas atas tumpangannya aktif ini ditentukan oleh puncak spillway. Apabila terjadi kelebihan air, maka kelebihan air ini akan melimpah (spillout).
3. Ada beberapa waduk (waduk multiguna) yang memiliki batasan debit yang dikeluarkan (*outflow*), baik debit maksimum atau debit minimum.

## 2.10. Penelitian Terdahulu

Berdasarkan beberapa referensi terdahulu tentang keamanan dari bendungannya urugannya yang mana diakibatkan oleh tekanan air pori, rembesannya, pergerakan horisontal dan vertikal tubuhnya bendungannya, kelongsorannya pada lereng hulu, dan pengaruh gempa terhadap keamanan bendungannya maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

### 1. Xiaoping Chen, Jingwu Huang (2011), (*Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown*)

#### a) Hasil dan Diskusi

Pengujian pada lereng ini dilakukan pada 3 (tiga) kondisi yaitu: (1) kemiringannya lereng alami di bawah level muka air normal, (2) kemiringannya lereng alami di bawah level muka air yang turun secara cepat, (3) kemiringannya lereng yang diperkuat di bawah level muka air normal dan penurunan level muka air secara cepat. Hasil pengujian akan diuraikan secara detail:



■ Kemiringan lereng alami di bawah level muka air normal. Tes model sentrifugal untuk kemiringan alami menunjukkan bahwa beberapa retakan muncul di lereng depan ketika permukaan air naik menjadi 146,9 m, diikuti oleh gerusan lokal di kaki lereng ketika permukaan air waduk mencapai ketinggian air normal (154,6 m). Retakan dan gerusan lokal yang ditangkap oleh video tes model sentrifugal. Hasil menunjukkan bahwa lereng di atas permukaan air mengalami deformasi ketika kaki lereng tergerus, dan kekuatan geser akan berkurang secara bertahap dengan meningkatnya perpindahan. Dari hasil pengujian Interaksi antara gerusan kaki lereng dan kekuatan tanah secara progresif mengalami pengurangan.

■ Kemiringan lereng alami di bawah level muka air yang turun secara cepat. Menggunakan kemiringan model yang sama, pengujian model sentrifugal di bawah level muka air yang turun secara cepat dilakukan. Dibandingkan dengan yang berada di bawah level muka air normal, gerusan pada kaki lereng berkembang ketika ketinggian air bervariasi dari 154,6 hingga 144,5 m. Saat permukaan air yang turun dipercepat, gerusan bertambah secara cepat.

Hasil pengujian kemiringan alami menunjukkan bahwa level muka air normal menyebabkan lereng tergerus dan permukaan lereng berubah bentuk, dan penurunan level muka air secara cepat menyebabkan gerusan yang intensif dan peningkatan deformasi. Karakteristik menunjukkan bahwa kegagalan progresif terjadi karena reduksi kekuatan tanah dan tekanan air yang dinamis, yang dapat menyebabkan longsor jika tidak dilakukan tindakan penguat untuk lereng lereng.

■ Kemiringan lereng yang diperkuat di bawah level muka air normal dan penurunan level muka air secara cepat.

Untuk mempelajari langkah-langkah penguatan, konstruksi model yang diperkuat berbeda dari kemiringan alami. Kepadatan kering di kemiringan lereng depan meningkat dan kadar air di bagian depan zona gerusan menurun. Sama seperti kemiringan alami, uji model sentrifugal dari lereng yang diperkuat dilakukan selama proses level muka air normal dan penurunan level muka air secara cepat. Terlepas dari respons perpindahan terhadap fluktuasi ketinggian air, tidak ada retakan atau runtuh. Dibandingkan dengan lereng alami, langkah-langkah penguatan kaki lereng sangat berperan penting dalam meningkatkan stabilitas lereng, meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi permeabilitas.



Dapat disimpulkan bahwa jika bagian terendam dari lereng dapat tetap stabil di bawah level muka air normal atau penurunan level air secara cepat, maka stabilitas lereng dapat dipertahankan.

b) Kesimpulan

Analisis stabilitas di bawah lereng bendungan saat level muka air normal dan penurunan level muka air secara cepat disajikan dengan laboratorium dan analisis numerik. Beberapa kesimpulan dapat ditarik sebagai berikut:

- Metode reduksi kekuatan yang digunakan dalam analisis numerik efektif dalam mengurangi kegagalan progresif yang disebabkan oleh fluktuasi level muka air waduk. Perilaku reduksi kekuatan tanah dapat disimulasikan dengan mengurangi parameter kekuatan dengan akumulasi tegangan geser. Perubahan kegagalan permukaan lereng yang disimpulkan dari simulasi numerik ternyata mirip dengan yang diamati dalam model tes sentrifugal.
- Kegagalan progresif lereng dapat diilustrasikan sebagai berikut: (i) menurunnya resistensi pada kaki lereng; (ii) gerusan pada kaki lereng; (iii) penurunan kekuatan tanah di dekat daerah gerusan; (iv) perubahan lereng; dan (v) selanjutnya penurunan dari daya dukung tanah. Oleh karena itu, perkuatan lereng pada kaki lereng bendungan efektif untuk mencegah kegagalan lereng.

**2. Mohammad Rashidi, S. Mohsen Haeri (2017), (*Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling*)**

a) Hasil dan Diskusi

Pada bagian hasil dan diskusi, data yang direkam oleh instrumen di bendungan Gavanshan termasuk penurunan pondasi, tegangan vertikal total dan tekanan air pori pada akhir konstruksi dan awal pengisian waduk dievaluasi dan kemudian dibandingkan dengan yang diperoleh dengan analisis numerik.

- Perbandingan Penurunan yang diperoleh dari Pengukuran Istrumen dan Pemodelan Numerik. Penurunan inti pada Juni 2004 (menjelang akhir konstruksi) dan April 2006 (setelah pengisian awal waduk) yang diperoleh dari pengukuran instrumen dan pemodelan numerik, masing-masing. Dapat dilihat bahwa hasil numerik sangat dekat dengan yang sebenarnya di kedua periode waktu.



Penurunan timbunan random hilir yang diperoleh dari instrumen dan pemodelan numerik dalam dua periode yang disebutkan di atas. Pada akhir konstruksi, hasil ini dekat satu sama lain. Tren ini terus konstan di pondasi bendungan setelah pengisian awal waduk. Tetapi di puncak bendungan, hasil dari instrumen jelas berbeda dari yang numerik. Alasannya adalah kepadatan rendah bahan di bagian atas hilir dan salju berat dan hujan di musim dingin tahun itu di Provinsi Kurdistan, di mana jumlah tahunan hujan dalam kondisi iklim umum adalah 600 mm.

Meteran tekanan di bagian hulu rusak sebelum konstruksi selesai. Pembacaan meter tekanan yang tersisa pada September 2003 dibandingkan dengan hasil numerik.

Hasilnya tidak begitu berbeda hingga tanggal itu. Perbedaannya terjadi pada ketinggian 45-65 m, yang terletak di daerah penurunan bendungan. Spesifikasi material di daerah penurunan berbeda dengan yang ada di timbunan filter. Namun, karena spesifikasi material-material ini tidak tersedia, kami harus mempertimbangkan spesifikasi material-material filter sebagai salah satu bahan dari area transfer. Pembacaan inclinometer juga dibandingkan dengan hasil numerik pada tingkat yang berbeda dari bendungan dalam kaitannya dengan waktu. Seperti yang diamati, hasil numerik sangat dekat dengan yang sebenarnya. Juga ditunjukkan bahwa penyelesaian bendungan meningkat secara signifikan setelah 48 bulan (pada akhir konstruksi dan dimulainya pengisian awal waduk).

- Perbandingan Tekanan Air Pori dari Pengukuran Instrumentasi dan Analisis Numerik.  
Perbandingan tekanan air pori di lapisan pertama yang diperoleh dari pengukuran instrumentasi dan pemodelan numerik pada akhir konstruksi. Dapat diamati bahwa di bagian atas dari filamen, tekanan air pori dekat satu sama lain; tetapi pada intinya, tekanan air pori maksimum yang diukur oleh piezometer adalah sekitar 980 kPa, kurang dari nilai 1280 kPa dari pemodelan numerik. Perbandingan tekanan air pori pada bulan April 2006 (setelah pengisian awal waduk). Perbedaan tekanan air pori yang diperoleh dari pemodelan numerik dan pengukuran menurun. Untuk menjelaskan perbedaan ini, kami pertama-tama memeriksa tekanan air pori pada piezometer EP 306 yang terletak di lapisan pertama. Selama konstruksi, tekanan air pori yang diperoleh dari pemodelan numerik sangat berbeda dari yang diukur, sementara perbedaan ini menjadi kurang pada bulan ke-50 (mulai dari pengisian awal waduk). Seperti disebutkan sebelumnya, pembacaan piezometer yang terletak di lapisan kedua tersedia pada September 2003. Perbandingan hasil tekanan air pori dari pemodelan numerik dan pengukuran piezometer listrik yang dipasang di lapisan kedua pada bulan



Juni dan September 2003. dapat diamati bahwa hasilnya sangat dekat satu sama lain di lapisan kedua, dan perbedaan terbesar adalah 20-40 kPa. Perbandingan tekanan air pori yang diukur dengan piezometer EP 339 dan EP 336 yang terletak di lapisan kedua dengan hasil numerik.

Seperti disebutkan sebelumnya, kadar air rata-rata di lapisan kedua (1455 m) selalu lebih tinggi dari yang diinginkan, serta kadar air rata-rata di lapisan pertama (1430,5 m). Ini berarti bahwa pada lapisan kedua, timbunan inti benar-benar basah dan telah menyebabkan peningkatan derajat kejenuhan timbunan inti, mendukung premis pertama dari analisis numerik bahwa cairan dan gas dapat kompresibel. Oleh karena itu, hasil numerik cocok dengan pembacaan instrumen.

Alasan yang disebutkan di atas lebih berlaku untuk mencocokkan hasil di lapisan kedua. Perbedaan tekanan air pori antara pemodelan numerik dan pengukuran instrumen yang terletak di lapisan pertama sangat besar, jadi kami tidak dapat menganggap kelembaban lapisan sebagai kesalahan pemodelan. Peta sketsa bendungan Gavoshan yang terletak pada pondasi berbatu. Dalam analisis numerik, pondasi tidak dimodelkan karena penurunan minor selama konstruksi (5 cm), absorbansi rendah (konduktivitas hidrolis  $K$  sekitar  $1 \times 10^{-6}$  m/s), dan pelat beton di bagian bawah timbunan inti dengan ketebalan 2 m. Koefisien permeabilitas pada dasar bendungan ( $K = 5 \times 10^{-5}$  m/s) dekat dengan fondasi bendungan ( $K = 5 \times 10^{-6}$  m/s). Selama konstruksi, tekanan air pori secara bertahap turun di lapisan pertama dari sisi lempengan beton. Bahkan ketika lantai beton pecah di beberapa titik di bagian bendungan yang dianalisis, tekanan air pori berkurang di lapisan pertama. Tetapi pada lapisan kedua, karena piezometer pada lapisan ini jauh dari pondasi bendungan, tekanan air pori pada level ini tidak terpengaruh.

Karena pondasi bendungan telah diabaikan dan dasar bendungan diasumsikan tidak dapat ditembus dalam pemodelan, tekanan air pori pada lapisan bawah yang diukur dengan instrumen sangat berbeda dari hasil numerik. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa ketika konduktivitas hidrolis pada dasar pondasi, dalam keadaan apa pun, pondasi bendungan harus dimodelkan.

Diamati bahwa setelah pengisian awal waduk, tekanan air pori yang diperoleh dari instrumen dekat dengan hasil yang diperoleh dari pemodelan numerik di bagian bawah. Setelah pengisian awal, hulu dan pondasi bendungan benar-benar jenuh dan air tidak bisa lagi meresap ke dalam pondasi bendungan melalui inti bendungan. Tekanan air pori yang diperoleh dari analisis numerik dan pengukuran instrumen lebih dekat satu



sama lain setelah 2 tahun. Oleh karena itu, pondasi bendungan harus dimodelkan bersama dengan tubuh bendungan agar hasil analisis akan sangat dekat dengan kenyataan.

- Perbandingan Tegangan Vertikal yang diperoleh dari Pengukuran dan Pemodelan Numerik.

Perkembangan Tegangan Vertikal dari PC 321 pada waktu yang berbeda. Dapat dilihat bahwa perbedaan Tegangan Vertikal numerik dan aktual adalah 150-200 kPa dari awal konstruksi hingga akhir awal pengisian waduk. Tegangan vertikal yang diperoleh dengan analisis numerik lebih besar dari yang sebenarnya, yang keduanya berkembang dalam tren yang sama. Alasannya adalah bahwa tanah di sekitar sel dipadatkan ke kepadatan yang lebih rendah dibandingkan dengan bagian inti lainnya untuk mencegah kerusakan sel-sel tegangan. Akibatnya, kekakuan tanah di tubuh bendungan sebagian besar lebih besar daripada di sekitar sel.

#### b) Kesimpulan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyajikan evaluasi umum fungsi bendungan selama konstruksi dan pengisian awal waduk menggunakan data yang diperoleh dari instrumen di bendungan Gavoshan dan juga pemodelan numerik mengenai perilaku regangan tegangan dari bendungan. Hasil berikut ini yang diambil:

- Penurunan maksimum inti adalah 238 cm pada akhir konstruksi. Dalam 6 tahun berikutnya setelah konstruksi (periode awal pengisian dan eksploitasi), penurunan akumulasi bendungan adalah 270 cm. Jelas bahwa 88% dari total penurunan bendungan terjadi dalam konstruksi bendungan karena inti tanah lempung yang dipadatkan di sisi basah kadar air optimal.
- Sebelum pengisian awal waduk dimulai, tekanan air pori simetris antara hulu dan hilir. Dengan meningkatnya jarak dari timbunan inti ke hulu dan hilir, tekanan air pori menurun. Namun, setelah pengisian waduk, timbunan inti hulu memiliki tekanan air pori yang lebih tinggi dibandingkan dengan hilir.
- Total Tegangan Vertikal, yang diperoleh dari analisis numerik, terbukti memiliki tren yang sama dengan data yang dicatat oleh instrumen, tetapi perbedaan kecil dalam kuantitas ditemukan di antara pencatatan tersebut. Ini disebabkan oleh fenomena pelengkungan lokal di tempat pemasangan instrumen tekanan, karena pemadatan yang tidak memadai di sekitar instrumen ini yang telah menyebabkan zona tekanan rendah.



3. Sanjay Nimbalkar, V.S. Ramakrishna Annapareddy, Anindya Pain, (2018),  
(*A simplified approach to assess seismic stability of tailings dams*)

a) Hasil dan Pembahasan

Pembahasan tentang hasil analisis jurnal yang berkaitan dengan pengaruh gempa akan di uraikan dalam beberapa bagian yang sudah di teliti pada bendungan tailing:

- Perbandingan hasil dari metode sekarang dengan yang dari metode pseudo-statis
- Perbandingan nilai keamanan dari metode ini dengan yang dari metode pseudo-statis untuk nilai kh yang berbeda. Kecenderungan hasil dari penelitian ini sangat mirip dengan yang dari metode pseudo-statis. Seperti dapat dilihat, faktor nilai keamanan dari analisis ini (dengan fondasi yang kaku dan fleksibel) dan metode pseudo-statis adalah sama untuk kh = 0 (yaitu dalam kondisi statis, kedua metode menghasilkan hasil yang sama). Juga diamati bahwa faktor keamanan menurun dengan meningkatnya kh. Faktor keamanan yang diperoleh dari analisis ini dengan fondasi yang kaku adalah maksimum 27% lebih tinggi dibandingkan dengan dari metode pseudo-statis. Demikian pula, faktor keamanan dari analisis ini dengan fondasi fleksibel adalah maksimum 16% lebih besar dari metode pseudostatik; Namun, itu menurun hingga maksimum 15% dibandingkan dengan hasil dari analisis ini dengan fondasi yang kaku. Ini menunjukkan variasi koefisien percepatan horizontal pada tingkat yang berbeda dari bendungan tailing untuk metode pseudo-statis dan analisis saat ini dengan fondasi yang kaku dan fleksibel. Profil akselerasi yang sama digunakan untuk menghitung gaya inersia seismik dari metode masing-masing. Dalam kasus metode pseudo-statis, koefisien percepatan konstan diasumsikan pada semua tingkat bendungan tailing, tetapi variasi nonlinear koefisien percepatan diamati dari metode ini. Selain itu, untuk yang diberikan frekuensi input, bendungan tailing bergetar dalam mode getaran kedua di mana bagian-bagian gaya inersia bertindak dalam satu arah dan aksi lainnya dalam arah yang berlawanan. Ini adalah alasan bahwa faktor nilai-nilai keamanan dari analisis ini dengan fondasi yang kaku dan fleksibel lebih tinggi daripada yang dari metode pseudo-statis. Seperti dapat dilihat, koefisien akselerasi bersih dari analisis ini dengan fondasi fleksibel secara signifikan lebih besar daripada dengan fondasi kaku, karena pertimbangan ketebalan lapisan pasir yang terbatas sebagai dasar untuk analisis. Untuk alasan ini, faktor keamanan dari analisis saat ini dengan fondasi fleksibel lebih rendah daripada dengan fondasi yang kaku.

Untuk frekuensi input  $f = 1$  Hz, faktor keamanan dari analisis ini dengan fondasi fleksibel adalah maksimum 12,5% lebih rendah dari pada metode pseudo-statis.



Sebaliknya, untuk frekuensi input lain  $f = 2,5$  Hz, faktor keamanan dari analisis ini dengan fondasi fleksibel adalah maksimum 16% lebih besar dari pada metode pseudo-statis. Bendungan tailing bergetar dalam mode getaran pertama untuk frekuensi input 1 Hz. Dalam mode ini, semua gaya inersia bekerja dalam arah yang sama. Tetapi untuk frekuensi input 2,5 Hz, bendungan masuk ke mode getaran kedua. Ini bisa menjadi alasan yang memungkinkan untuk faktor keamanan yang lebih rendah pada  $f = 1$  Hz dan faktor keamanan yang lebih tinggi pada  $f = 2.5$  Hz dibandingkan dengan metode pseudo-statis. Oleh karena itu, diindikasikan bahwa bendungan tailing mungkin rawan kerusakan karena berpengaruh pada input frekuensi rendah.

#### ■ Studi parametrik

Variasi faktor keamanan dari penelitian ini dengan fondasi yang kaku dan fleksibel untuk nilai sudut gesek internal yang berbeda. Seperti dapat dilihat, peningkatan sudut gesekan internal menghasilkan faktor keamanan yang lebih tinggi. Untuk set parameter input, faktor keamanan ditingkatkan sebesar 56% ketika sudut gesekan internal bervariasi dari  $20^\circ$  hingga  $40^\circ$ . Variasi faktor keamanan untuk dua nilai  $k_h$  yang berbeda. Untuk set parameter input, pada  $k_h = 0,1$ , faktor keamanan dari analisis ini dengan fondasi yang kaku dan fleksibel hampir 8% - 9% dan 14% - 15% lebih tinggi daripada yang di  $k_h = 0,2$ , masing-masing. Faktor keamanan dari analisis saat ini dengan fondasi yang kaku lebih besar daripada dari analisis dengan fondasi yang fleksibel. Alasannya telah dijelaskan di bagian sebelumnya.

Faktor nilai keamanan dari analisis ini dengan fondasi fleksibel untuk nilai  $k_h$  dan  $\lambda$  yang berbeda (rasio impedansi). Untuk parameter input yang diberikan, faktor keamanan menurun secara signifikan ketika  $\lambda$  berubah antara 2 dan 1. Rasio impedansi  $\lambda > 1$  menandakan fondasi yang lebih lembut. Ketika  $\lambda$  berkurang dari 2 menjadi 1, amplifikasi percepatan seismik terjadi. Akibatnya, jumlah percepatan seismik yang bekerja pada bendungan juga meningkat yang pada akhirnya menyebabkan penurunan faktor keamanan. Lebih lanjut, ketika rasio impedansi sama dengan 1, ini menunjukkan bahwa tidak ada gelombang pantulan yang dihasilkan dan impedans pada setiap sisi permukaan adalah sama. Faktor keamanan terkecil dinyatakan untuk rasio impedansi 1 dan  $k_h = 0,3$ . Faktor keamanan dari analisis ini dengan fondasi fleksibel untuk nilai  $k_h$  yang berbeda dan kedalaman pondasi yang dinormalisasi  $H_f/H$ . Untuk set parameter input yang diberikan, faktor keamanan berkurang maksimum 17,5% ketika kedalaman pondasi bervariasi dari  $H/3$  hingga  $2H/3$ . Dengan peningkatan lebih lanjut pada kedalaman fondasi menjadi  $3H/2$ , faktor keamanan meningkat maksimum 21%



dibandingkan dengan nilai-nilai pada  $H_f = 2H/3$ . Oleh karena itu, diindikasikan bahwa ketebalan fondasi memiliki efek yang signifikan pada faktor keamanan seismik bendungan tailing. Analisis perilaku perubahan mode merupakan prasyarat penting untuk desain bendungan tailing yang aman dan ekonomis. Arti fisik dari perilaku "perubahan mode". Dalam kasus gelombang geser frekuensi rendah atau panjang gelombang panjang, bendungan bergetar dalam mode pertama di mana percepatan seismik total sepanjang kedalaman baji kegagalan bekerja dalam satu arah tunggal, dan oleh karena itu, itu menarik gaya inersia yang lebih besar yang pada akhirnya menyebabkan faktor keamanan yang lebih rendah. Sebaliknya, untuk gelombang geser frekuensi tinggi atau gelombang pendek, bendungan masuk ke mode getaran yang lebih tinggi (kedua dan lebih besar) di mana sebagian akselerasi seismik bekerja dalam satu arah dan aksi lainnya dalam arah yang berlawanan. Akibatnya, jumlah total gaya inersia seismik yang bekerja pada bendungan berkurang, dan dengan demikian faktor keamanan yang lebih tinggi diinduksi.

b) Kesimpulan

Analisis stabilitas seismik merupakan komponen penting dari desain ketahanan gempa bendungan tailing. Metode yang ada mengalami banyak kekurangan seperti yang dibahas dalam Pendahuluan. Oleh karena itu, dalam makalah ini, metode baru yang disederhanakan telah dikembangkan dan disajikan. Metode yang diusulkan mampu mempertimbangkan pengaruh sifat-sifat tanah pondasi terhadap faktor keamanan bendungan tailing. Suatu upaya telah dilakukan untuk menggunakan sifat dinamis yang bergantung-regangan (modulus geser dan rasio redaman) untuk evolusi stabilitas seismik bendungan tailing. Di bawah kondisi statis (mis.  $K_h = 0$ ), faktor keamanan dari metode ini persis sama dengan yang dari metode pseudostatik. Di bawah kombinasi parameter input yang diberikan, faktor keamanan mempunyai pengaruh untuk input frekuensi rendah hampir 26% lebih rendah daripada input frekuensi tinggi. Ini dapat dikaitkan dengan perilaku perubahan mode bendungan tailing.

Perilaku perubahan mode bendungan tailing harus dipertimbangkan karena desainnya yang aman dan ekonomis. Rasio impedansi (pada pertemuan antara bendungan dan pondasi) dan kedalaman pondasi memiliki efek signifikan pada faktor keamanan seismik bendungan tailing. Bendungan tailing rentan terhadap kerusakan untuk gerakan input frekuensi rendah.



4. **Shivakumar S. Athani, Shivamant, C. H. Solanki, G. R. Dodagoudar, (2015),**  
*(Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method)*

a) Hasil dan Diskusi

Jurnal ini menyajikan hasil pemodelan elemen hingga dari analisis stabilitas dan rembesan bendungan urugan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 3D. Analisis telah memasukkan semua pengaruh yang digabungkan dan terutama mempertimbangkan interaksi antara air permukaan dan air tanah yang membentuk komponen penting dari analisis digabungkan (Freeze, 1971; Zhou dan Li, 2011). Dua parameter utama yang bervariasi dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi indikator dalam stabilitas bendungan urugan adalah modulus Young ( $E$ ) dan sudut gesekan dalam ( $\phi$ ). Stabilitas bendungan telah dianalisis untuk kondisi sebagai berikut:

- Level air penuh (*high water level*)
- Penurunan muka air secara cepat (RDD 1 dan RDD2) dalam durasi 5 dan 10 hari
- Penurunan muka air perlahan-lahan dalam durasi 50 hari dan
- Level air rendah (*low water level*).

Hasil analisis elemen hingga yang ditunjukkan: variasi tegangan normal di tubuh bendungan urugan dan lapisan tanah. Variasi dari regangan normal dan tekanan pori aktif.

Hasil stabilitas dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan (FS) untuk semua kasus. Nilai FS ditampilkan di sepanjang sumbu-y. Perpindahan yang ditunjukkan di sepanjang sumbu-x adalah total, yang tidak memiliki makna fisik. HR singkatan dari level muka air tinggi dan LL singkatan dari level muka air rendah. Analisis numerik yang digunakan adalah beberapa Sudut geser dalam ( $\phi$ )  $30^\circ$  dan  $35^\circ$ .

Terlihat dari semua angka bahwa pola variasi FS berkenaan dengan perubahan  $\phi'$  tetap sama untuk nilai yang berbeda dari nilai Young. Ketika  $E_s$  melebihi nilai modulus Young lapisan bawah tanah, peningkatan nilai  $\phi'$  mengakibatkan penurunan nilai FS hanya untuk kondisi penurunan muka air secara cepat (RDD1 dan RDD2).

Variasi perpindahan dan tegangan efektif sehubungan dengan  $E'$  untuk jumlah iterasi yang sama untuk berbagai kasus yang disebutkan di atas. Setiap kali  $E_s$  mendekati nilai modulus Young dari lapisan tanah, ada kejutan tiba-tiba dalam pengamatan.

b) Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada jurnal ini maka dapat di ambil beberapa kesimpulan seperti berikut:



- Nilai-nilai FS yang dievaluasi menggunakan PLAXIS lebih dapat diandalkan dibandingkan dengan metode keseimbangan batas. Dalam PLAXIS, mudah untuk melakukan studi sensitivitas parametrik.
- Nilai FS berkurang secara signifikan selama penurunan muka air cepat (misalnya: penurunan muka air cepat secara dalam durasi 5 hari, RDD1) diikuti oleh penurunan muka air secara cepat dalam durasi 10 hari (RDD2). Untuk itu perlu dilakukan analisis pada bagian penurunan muka air secara cepat karena ada setiap peluang perubahan tekanan air pori berlebih karena perubahan tiba-tiba di permukaan air, tetapi permukaan freatik tidak dapat berubah dengan cepat.
- FS ditemukan lebih besar dari 1,6 untuk kondisi tampungan penuh dan kondisi tampungan rendah. Untuk kondisi lain, nilai FS ditemukan lebih kecil dari nilai yang ditentukan.
- Peningkatan nilai  $\phi'$  dan  $E_s$  (misalnya: lebih besar dari Young modulus lapisan tanah) menghasilkan pengurangan FS untuk kedua kondisi penurunan muka air secara cepat pada periode singkat (misalnya: RDD1 dan RDD2). Ini berbeda dengan kondisi penurunan muka air secara lambat.
- Ketika  $E_s$  mendekati nilai modulus Young dari lapisan tanah, ada lompatan tiba-tiba dalam perpindahan untuk jumlah iterasi yang sama dan hal yang sama juga diamati untuk variasi tegangan efektif.

**5. Undayani Cita Sari, Sri Prabandiyani Retno Wardani, Suharyanto, Windu Partono, (2017), (*Influence of pore water pressure to seepage and stability of embankment dam “case study of Sermo Dam Yogyakarta, Indonesia”*)**

a) Hasil dan Diskusi

Berdasarkan analisis yang dilakukan, hasil pelepasan rembesan menggunakan pemodelan PLAXIS di setiap level muka air dianalisis dalam penelitian ini. Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi permukaan air maka semakin tinggi debit rembesan. Ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (H. Sudraja, 2012), yang meneliti efek fluktuasi ketinggian air di rembesan bendungan menggunakan model laboratorium. Stabilitas dalam studi ini adalah untuk mengevaluasi penurunan tubuh bendungan. Penurunan yang besar pada tubuh bendunga dapat menyebabkan ketidakstabilan bendungan.

Dari hasil analisis numerik menggunakan aplikasi plaxis kondisi operasional, level air semakin tinggi demikian juga dengan penurunan. Ini relevan dengan penelitian yang



telah dilakukan sebelumnya (W. Zhou, S. Li, Z. Zhou, X. Chang, 2016), yang meneliti pemantauan penurunan di Bendungan Shuibuya, Cina. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa ketika ketinggian air meningkat, penurunan di bendungan juga akan meningkat. Selain itu, ada juga penelitian yang mempelajari pengaruh fluktuasi ketinggian air dalam deformasi bendungan dalam model laboratorium yang memberikan kesimpulan yang relevan (N. Meisyara, 2012).

Menurut (B. G. Look, 2007) debit rembesan yang dihasilkan tidak boleh melebihi 0,56 liter / menit / meter, untuk bendungan tinggi lebih dari 40 meter. Bendungan Sermo yang dianalisis dalam penelitian ini adalah penampang STA 15, memiliki ketinggian 56,70 m. Sementara itu, debit maksimum menggunakan PLAXIS adalah di level air 136,71 meter dengan debit 0,83 l/dtk atau sama dengan 0,26 l/dtk/m. Nilai debit lebih kecil dari 0,56 l/dtk/m, sehingga masih kurang dari persyaratan debit yang dapat ditoleransi. Sementara itu, dilihat dari penurunan, nilai hasil penurunan maksimum dari pemodelan numerik menggunakan PLAXIS adalah 1,16 meter di permukaan air 136,71 meter. Penyelesaian toleransi pada konstruksi akhir adalah 2% dari tinggi bendungan (C. Kutzner.1997). Nilai ini mendekati dengan nilai hasil penyelesaian dari pemodelan menggunakan PLAXIS.

Dalam penelitian ini, juga diberikan hubungan antara level air dan tekanan air pori menggunakan pemodelan PLAXIS. Seperti yang sudah dijelaskan, piezometer ditinjau pada hulu dan hilir, yaitu PC-7, PC-8, PF-13, dan PF-16. Nilai tekanan air pori dari pemodelan PLAXIS diperoleh dengan mengambil titik tegangan dalam PLAXIS yang memiliki koordinat serupa atau mendekati (dalam sumbu x dan sumbu y) dengan koordinat di setiap piezometer yang ditinjau. Hubungan antara level air dan tekanan air pori pada pemodelan PC-7 dan PC-8 menggunakan PLAXIS. Sementara hubungan antara level air dan tekanan air pori pada PF-13 dan PF-16.

Berdasarkan hasil analisis numerik dinyatakan bahwa semakin tinggi level air, semakin tinggi tekanan air pori, dan pada posisi hilir bendungan (zona batuan dasar di PF-13 dan PF-16), tekanan air pori akan lebih kecil daripada di hulu. bendungan (zona inti di PC-7 dan PC-8). Selain itu, dapat disimpulkan bahwa ketika level air meningkat, tekanan air pori juga akan meningkat. Peningkatan level air dapat menyebabkan peningkatan air pori

Tekanan, ini karena bahan berada dalam kondisi jenuh yang dihasilkan dari aliran rembesan air ke tubuh bendungan, sebagai konsekuensi dari ketinggian permukaan air. Material jenuh akan meningkatkan tekanan air pori, terutama dengan jalur rembesan



yang panjang karena material dalam inti Dam Sermo adalah tanah yang kohesif (sebagai lokasi PC-7 dan PC-8). Sehingga pada PC-7 dan PC-8 memiliki nilai tekanan air pori yang lebih besar daripada pada PF-13 dan PF-16. Dapat diketahui bahwa PF-13 dan PF-16 terletak di zona batuan dasar atau fondasi bendungan, yang terdiri dari batuan andesit breksi yang membuat material lebih mudah untuk pengeringan rembesan air.

Peningkatan tekanan air pori yang terjadi dapat menyebabkan peningkatan debit rembesan. Pembuangan rembesan dapat menyebabkan penurunan pada tubuh bendungan yang terjadi juga meningkat secara signifikan. Meningkatnya penurunan terjadi karena rembesan air di tubuh bendungan menyebabkan perubahan material dalam kondisi jenuh. Kemudian, nilai material akan berubah. Sehingga, tegangan akan berkurang. Pengurangan tegangan akan berdampak pada peningkatan penurunan dan mengurangi stabilitas bendungan dalam menahan air. Ini juga menurut penelitian yang dilakukan pada dinding tinggi (K.L. Morton, M.C. Muresan, F.R. Debswana, 2008), yang merupakan peningkatan tekanan air pori akan menyebabkan pengurangan tegangan, sedangkan penurunan tekanan air pori akan menyebabkan peningkatan tegangan. Ketika tegangan meningkat, sehingga bisa meningkatkan kekuatan tanah untuk melawan ketidakstabilan.

#### b) Kesimpulan

Berdasarkan masalah yang ada pada penelitian ini adalah tentang pengaruh tekanan air pori pada rembesan dan stabilitas dengan studi kasus pada Bendungan Sermo, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Analisis pemodelan PLAXIS menunjukkan bahwa ketinggian air mempengaruhi peningkatan tekanan air pori. Semakin tinggi level air, semakin tinggi tekanan air pori. Dengan meningkatnya tekanan air pori, pelepasan rembesan yang terjadi juga akan meningkat.
- Peningkatan tekanan air pori karena perubahan ketinggian permukaan air menyebabkan peningkatan pembuangan rembesan dan penurunan tubuh bendungan. Hal ini diakibatkan oleh rembesan air yang menyebabkan material menjadi jenuh dan nilai material akan berubah dan tegangan tanah akan berkurang. Pengurangan tegangan tanah akan berdampak pada ketidakstabilan struktur bendungan.



### 2.11. Pengertian Umum Analisis Gempa

Beban gempa adalah beban atau gaya inersia yang timbul sebagai akibat adanya guncangan gempa di permukaan tanah. Risiko gempa ialah peluang terjadinya gempa dengan besaran gempa (percepatan, kecepatan, dan lama guncangan) serta kebesaran gempa pada periode ulang rata-rata tertentu selama masa guna bangunan yang dinyatakan dengan  $R_n$ .

Percepatan gempa maksimum di permukaan tanah (*maximum ground acceleration*,  $a_g$ ) ialah percepatan gempa yang diperoleh dari hasil analisis risiko gempa dengan menggunakan rumus empiris dari Fukushima-Tanaka, tetapi belum dikoreksi terhadap pengaruh jenis tanah setempat. Percepatan gempa maksimum terkoreksi (*peak ground acceleration*,  $PGA = a_d$ ) ialah percepatan gempa maksimum di permukaan tanah yang dihitung berdasarkan koreksi pengaruh jenis tanah setempat (Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa, 2004).

Gempa bolehjadi maksimum penentu (*Controlling maximum credible earthquake*, CMCE) ialah gempa maksimum bolehjadi paling kritis yang dapat mempengaruhi suatu lokasi studi. CMCE ini ditentukan sesudah diperkirakan besarnya gempa maksimum bolehjadi yang terjadi sepanjang sesaran atau di daerah tektonik terdekat dengan daerah studi. Untuk daerah tektonik dengan laju aktivitas yang rendah dan tanda tanda identifikasi yang kurang nyata, konsep CMCE merupakan gempa maksimum bolehjadi yang menjadi signifikan di daerah studi. Evaluasi untuk kondisi ini sebaiknya dilakukan dengan cara probabilistik bencana gempa.

Gempa desain maksimum (*Maximum design earthquake*, MDE) ialah gempa yang memberikan guncangan terbesar di lokasi studi yang akan digunakan untuk desain atau analisis. Untuk bendungan yang keruntuhannya akan mengancam kehidupan, gempa desain maksimum sebaiknya diambil pada batas yang sama dengan CMCE, untuk mempertahankan kapasitas pengisian waduk. Jika keruntuhan bendungan tidak mengancam kehidupan, dapat diambil gempa yang lebih kecil dari CMCE sebagai MDE.

Gempa dasar operasi (*Operating basis earthquake*, OBE) ialah gempa dengan batasan guncangan di permukaan tanah pada lokasi studi dengan 50% kemungkinan tidak terlampaui dalam 100 tahun, yang sebaiknya ditentukan secara probabilistik. Bendungan dan bangunan pelengkap serta peralatannya harus tetap berfungsi dengan baik dan mudah perbaikannya jika terjadi gempa dasar operasi, tetapi tanpa memperhitungkan tinjauan keamanan terhadap kehidupan manusia.



Gempa imbas (*Reservoir induced earthquake*, RIE) ialah gempa bumi yang terjadi akibat pengisian waduk yang memberikan tingkat guncangan permukaan maksimum di lokasi bendungan. Pengaruh gempa imbas hanya dipertimbangkan pada bendungan yang lebih tinggi dari 100 m atau waduk yang sangat besar dengan kapasitas lebih dari  $10^9 \text{ m}^3$  dan pada bendungan baru dengan ukuran lebih kecil di daerah yang sensitif terhadap pergerakan tektonik. Meskipun terdapat banyak perbedaan pendapat mengenai gempa imbas pada waduk, RIE harus tetap dipertimbangkan untuk menentukan beban gempa pada bendungan tinggi dengan waduk yang mengandung sesaran aktif di daerah hidrauliknya. Meskipun sesaran di daerah waduk tidak aktif terhadap tektonik, tetapi gempa imbas tidak boleh diabaikan, jika geologi lokal ataupun regional serta kegempaan bersifat signifikan. Besaran gempa imbas ditentukan berdasarkan MCE dan OBE, lokasi bendungan, dan kondisi seismotektonik sehingga gempa imbas dapat menjadi lebih kecil atau sama, ataupun lebih besar dari OBE, atau sama dengan MDE (Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa, 2004).

## 2.12. Evaluasi Penentuan Beban Gempa dan Pemilihan Parameter Gempa

Beban gempa yang akan digunakan untuk desain bendungan baru atau evaluasi keamanan bangunan yang ada diperoleh dari MDE, OBE dan kadang-kadang RIE. Tergantung pada kondisinya, suatu bendungan dapat dievaluasi terhadap satu atau beberapa beban gempa. Persyaratan utama desain bendungan tahan gempa ialah dapat memberikan perlindungan terhadap keamanan umum, kehidupan ataupun harta benda. Pada umumnya bendungan harus dapat menahan guncangan gempa kuat atau pergerakan sesaran yang mungkin terjadi di lokasi bendungan sehingga tidak terjadi pelimpahan air waduk yang tidak terkontrol (bobol). Pada kasus CMCE, jika terjadi kerusakan pada bendungan yang cukup besar, bendungan harus tetap dalam batasan keamanan yang dapat ditoleransi, dan tidak terjadi bencana banjir (*overtopping*). Selain itu, faktor-faktor yang dibutuhkan untuk evaluasi keamanan bendungan terhadap 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.

Sebagai contoh, pembangunan bendungan besar dengan penekanan fungsi ekonomis perlu dianalisis dengan ketentuan beban MDE, OBE dan RIE. Bendungan yang cukup



tinggi dengan waduk yang digunakan untuk penyediaan air minum di daerah permukiman harus didesain dengan mempertimbangkan persyaratan beban baik pada MDE ataupun OBE. Bangunan yang rendah faktor ekonomisnya, tetapi keruntuhannya akan menyebabkan kehilangan nyawa manusia harus tetap dievaluasi dengan MDE. Untuk bendungan buri (*tailing dams*), bendungan limbah atau bangunan pengendali banjir dapat diperhitungkan hanya terhadap OBE, karena bendungan semacam ini kerap kali dikeringkan pada masa operasionalnya. Penentuan analisis bendungan dengan menggunakan besaran MDE, OBE, dan atau RIE harus ditentukan bersama dengan pemilik bendungan, pendesain, dan instansi berwenang lainnya berdasarkan pertimbangan utama, yaitu kepentingan umum.

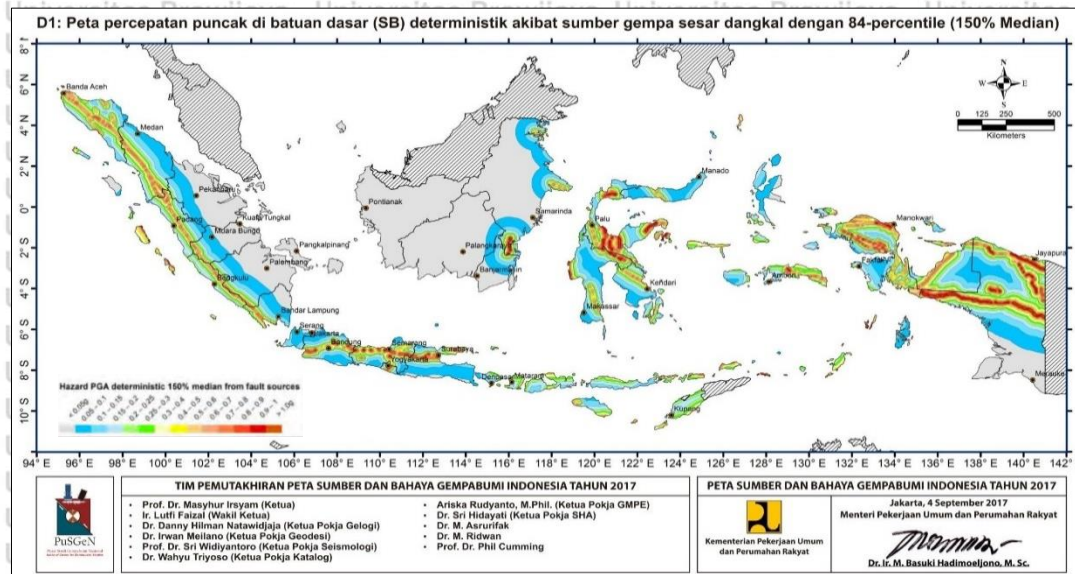
Parameter gempa dapat terdiri atas salah satu atau beberapa karakteristik guncangan di permukaan tanah dasar, seperti percepatan, kecepatan atau alihan, dan ragam sambutan atau sejarah waktu percepatan gempa yang memberikan karakteristik tersendiri bagi MDE, OBE dan RIE. Pemilihan parameter dapat dilakukan secara deterministik atau secara probabilistik bencana gempa atau kombinasi keduanya. Sebagai contoh, hubungan percepatan gempa dengan periode ulang untuk menentukan MDE, dan dengan OBE terdiri dari percepatan gempa maksimum (*Peak ground acceleration*, PGA) dan bentuk sambutan gempa (*spektrum*) yang spesifik. Parameter gempa yang mencerminkan besaran MDE, OBE atau RIE sering digunakan sebagai data masukan untuk analisis numerik pada bendungan. Hasil dari analisis numerik tersebut digunakan untuk evaluasi perilaku bendungan dan keamanan bendungan yang menghasilkan besaran guncangan.

Secara geografis, jika beberapa tempat cenderung mengalami guncangan gempa lebih tinggi dibandingkan dengan tempat lain. Klasifikasi tingkat kerusakan dapat dibuat berdasarkan percepatan gempa maksimum (PGA) yang mungkin terjadi pada MDE dan OBE. Penentuan ini dapat dilakukan dengan menggunakan peta zona gempa yang dapat diperlihatkan pada Gambar 2.29– Gambar 2.42.

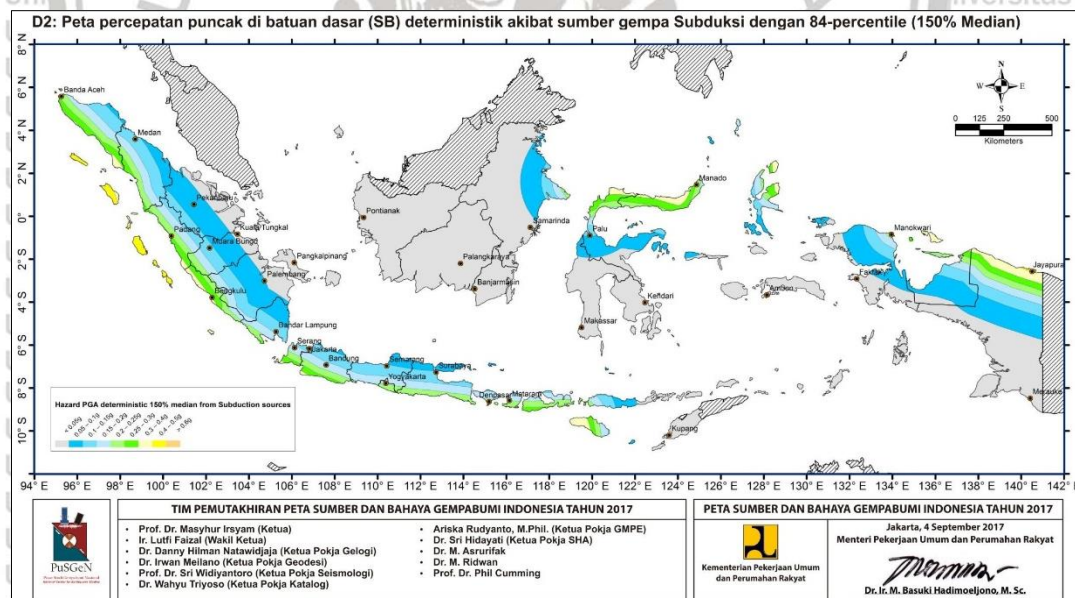
Hasil analisis PSHA untuk peta percepatan puncak di batuan dasar (*peak ground acceleration*) pada delapan periode ulang dapat dilihat pada Gambar 2.29 – Gambar 2.36 serta Gambar 2.41 dan Gambar 2.42. Periode ulang yang dipergunakan adalah 50, 100, 200, 500, 1000, 2500, 5000, dan 10000 tahun. Kemudian juga dilakukan perhitungan seismic hazard percepatan untuk respon spektrum 0,2 detik dan 1 detik pada periode ulang 2500 tahun (lihat Gambar 2.37 dan Gambar 2.38). Selain itu juga dilakukan perhitungan peta hazard deterministik PGA di batuan dasar akibat sumber gempa sesar dangkal dan



akibat sumber gempa subduksi dengan 84 percentile (150% medium) yang ditunjukkan pada Gambar 2.39 dan Gambar 2.40 (Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia, 2017).

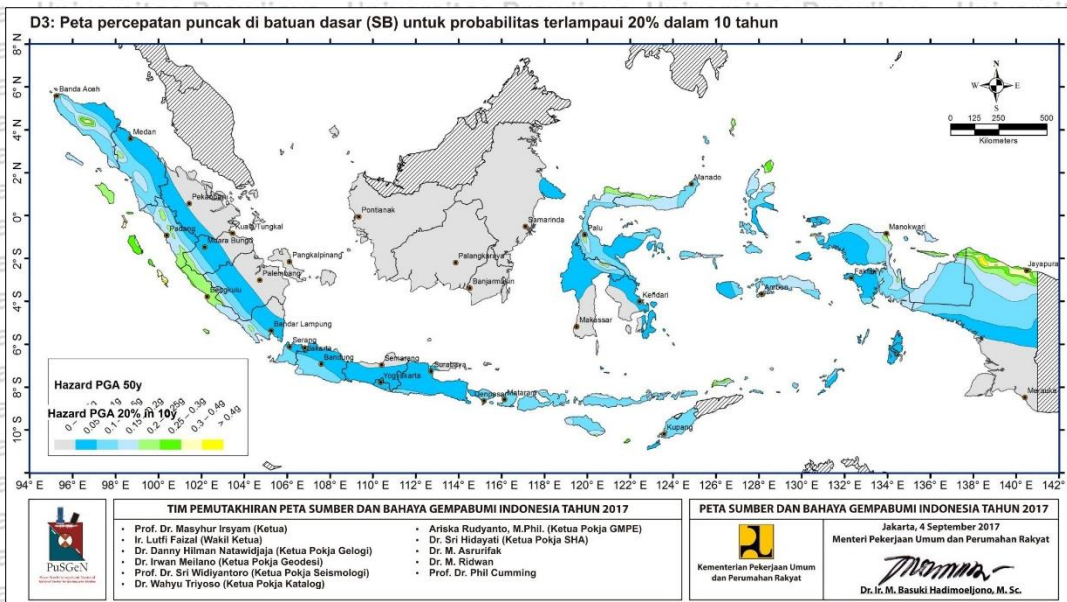


Gambar 2.29. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) Deterministik Akibat Sumber Gempa Sesar Dangkal Dengan 84-Percentile (150% Median)  
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.277)



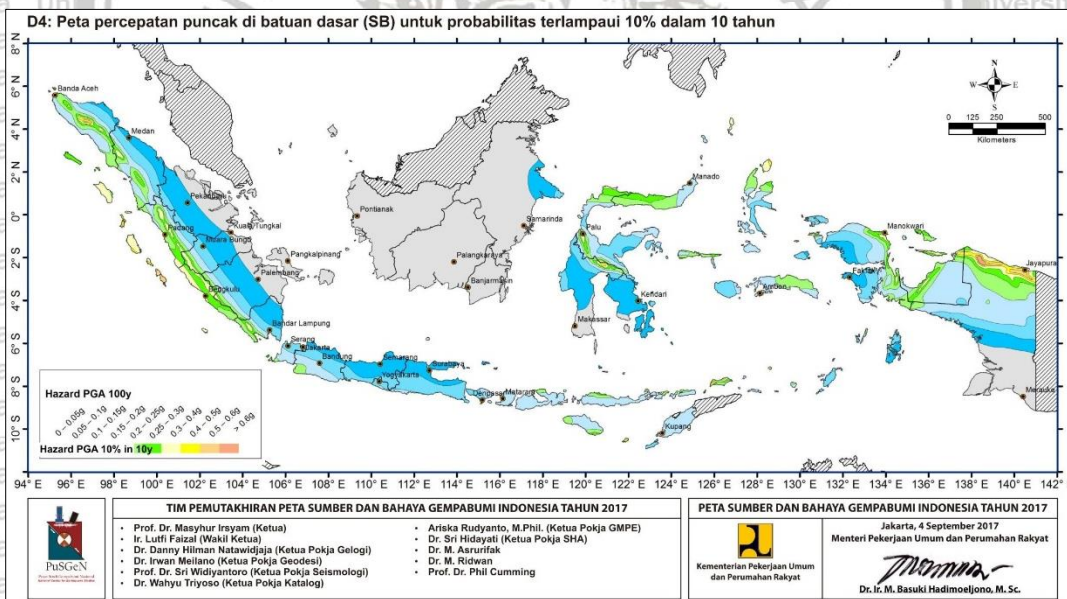
Gambar 2.30. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) Deterministik Akibat Sumber Gempa Subduksi Dengan 84-Percentile (150% Median)  
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.277)





Gambar 2.31. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 20% dalam 10 Tahun.

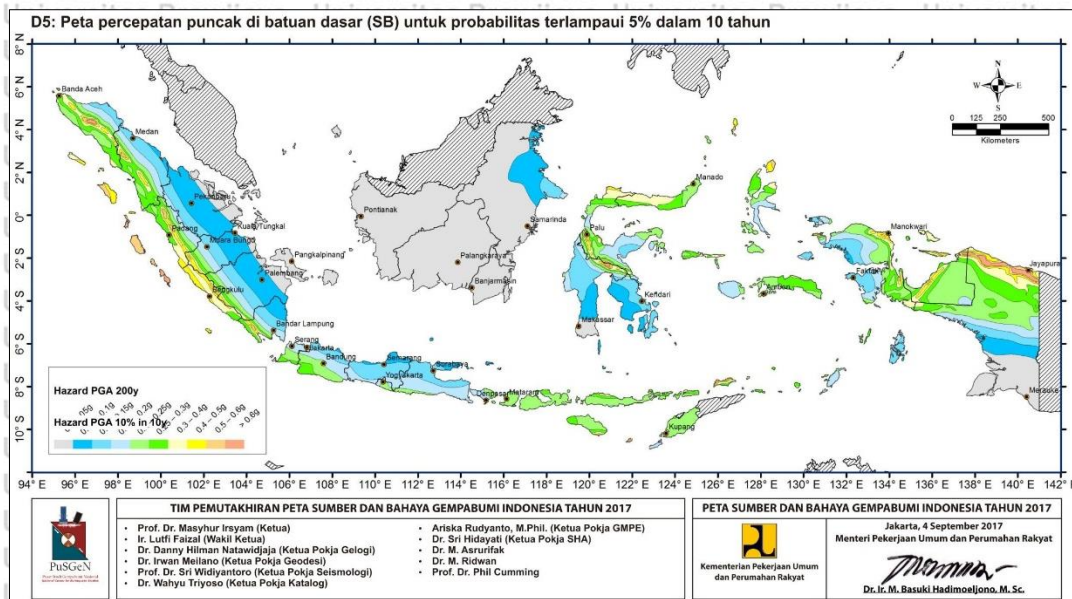
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.278)



Gambar 2.32. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 10 Tahun.

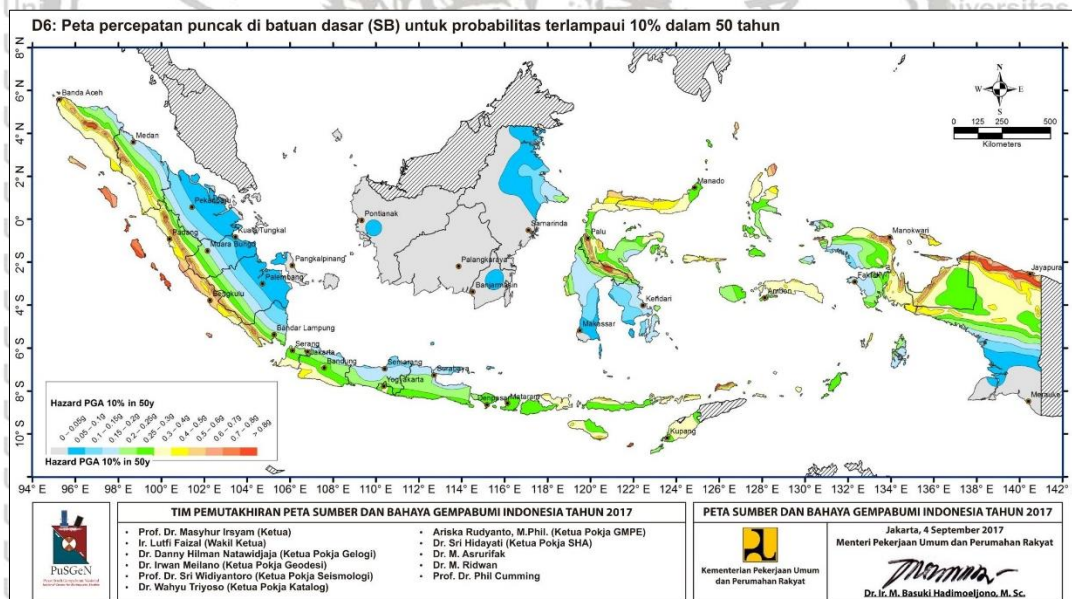
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.278)





Gambar 2.33. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 5% dalam 10 Tahun.

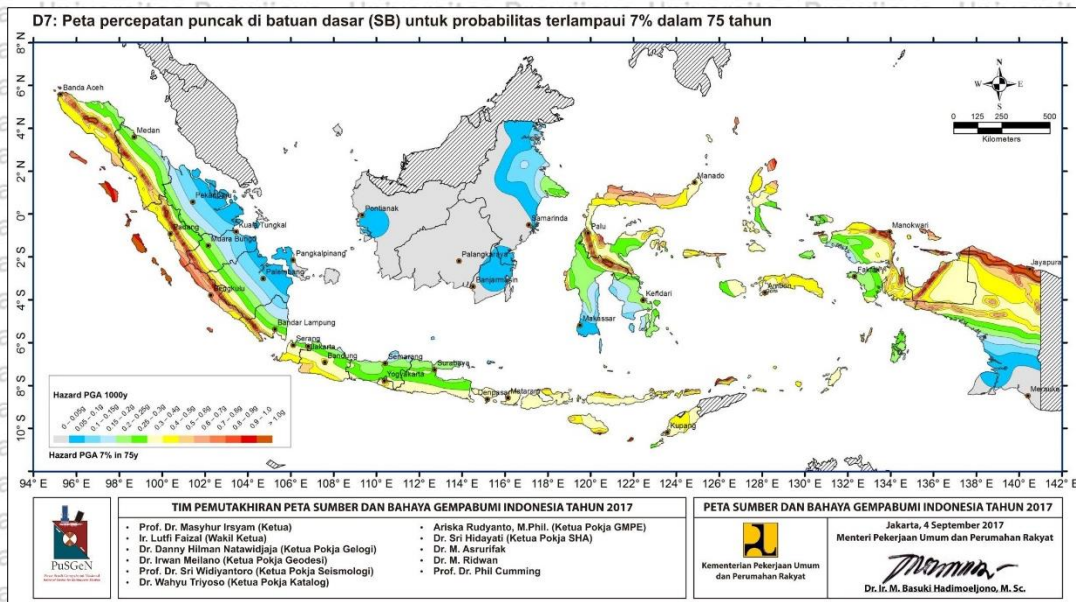
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.279)



Gambar 2.34. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 10% dalam 50 Tahun.

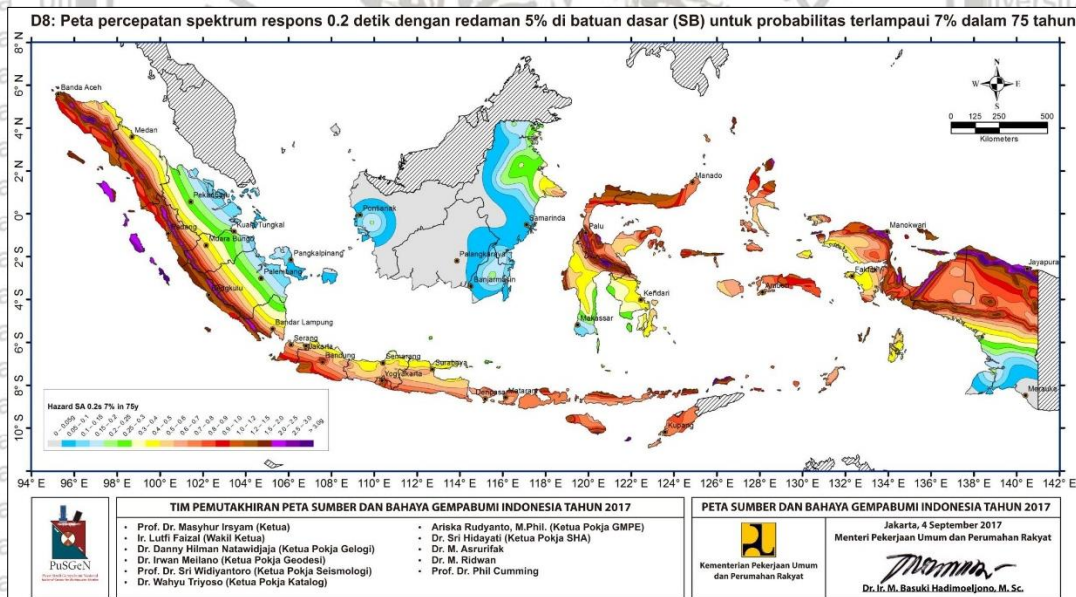
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.279)





Gambar 2.35. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun.

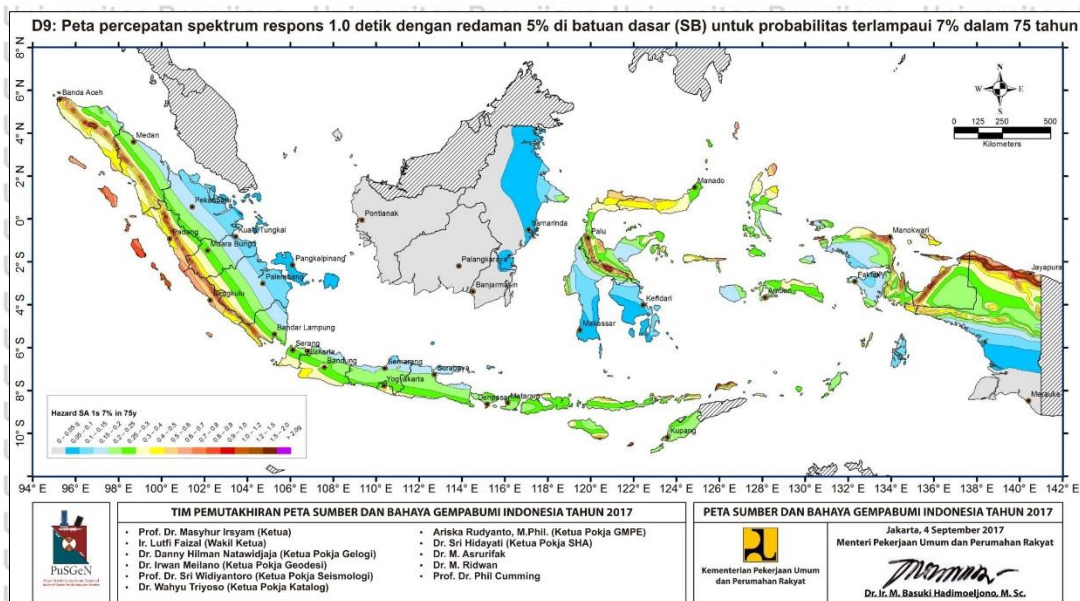
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.280)



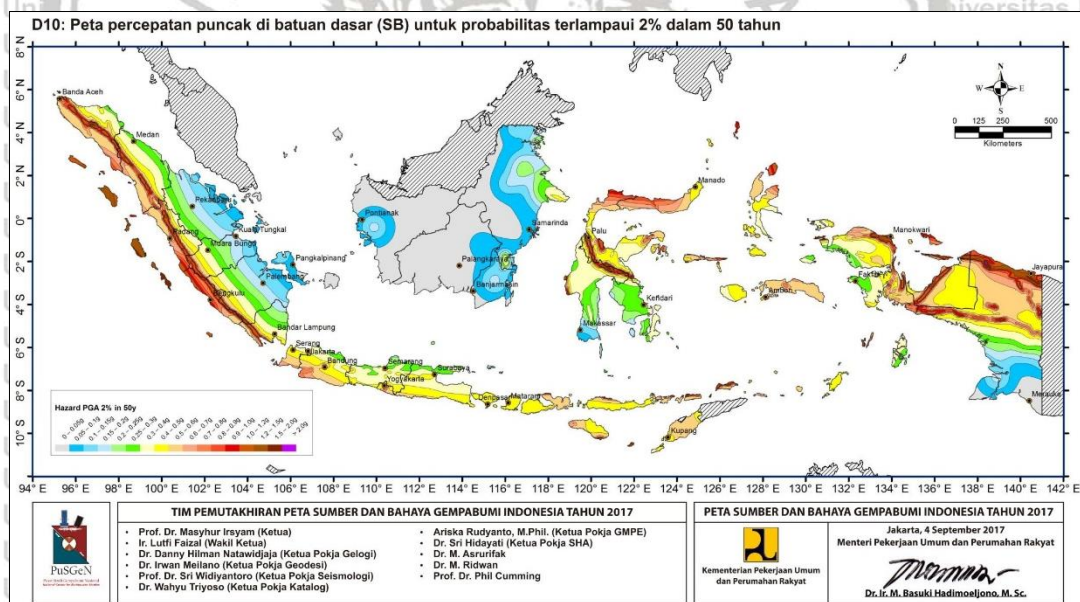
Gambar 2.36. Peta Percepatan Spektrum Respon 0,2 deitk dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun.

Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.280)



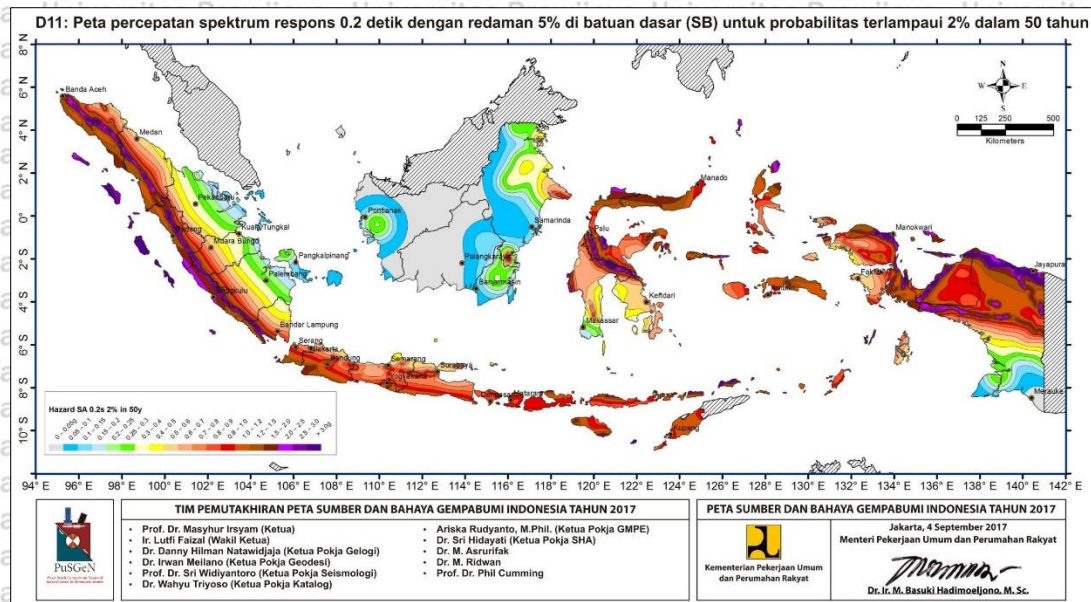


Gambar 2.37. Peta Percepatan Spektrum Respon 1,0 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 Tahun.  
 Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.281)



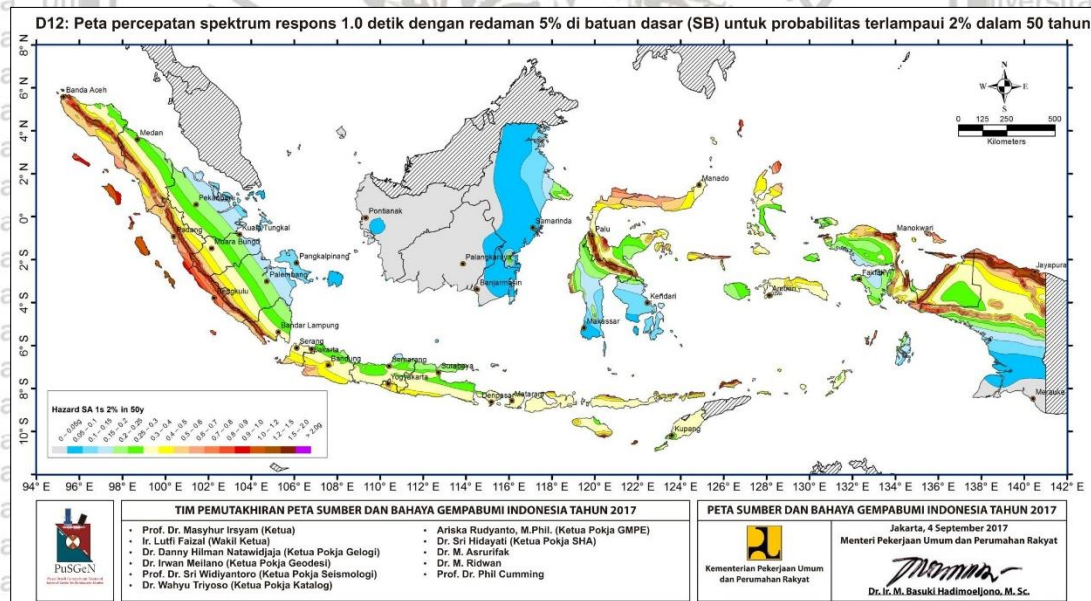
Gambar 2.38. Peta Percepatan di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun.  
 Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.281)





Gambar 2.39. Peta Percepatan Spektrum Respon 0,2 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun.

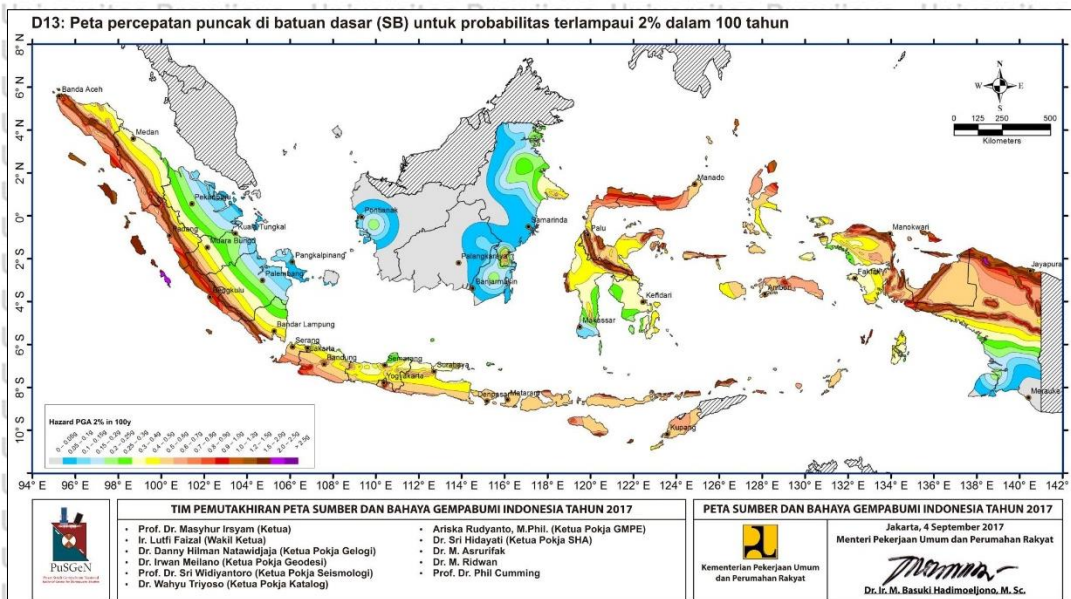
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.282)



Gambar 2.40. Peta Percepatan Spektrum Respon 1,0 detik dengan Redaman 5% di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 50 Tahun.

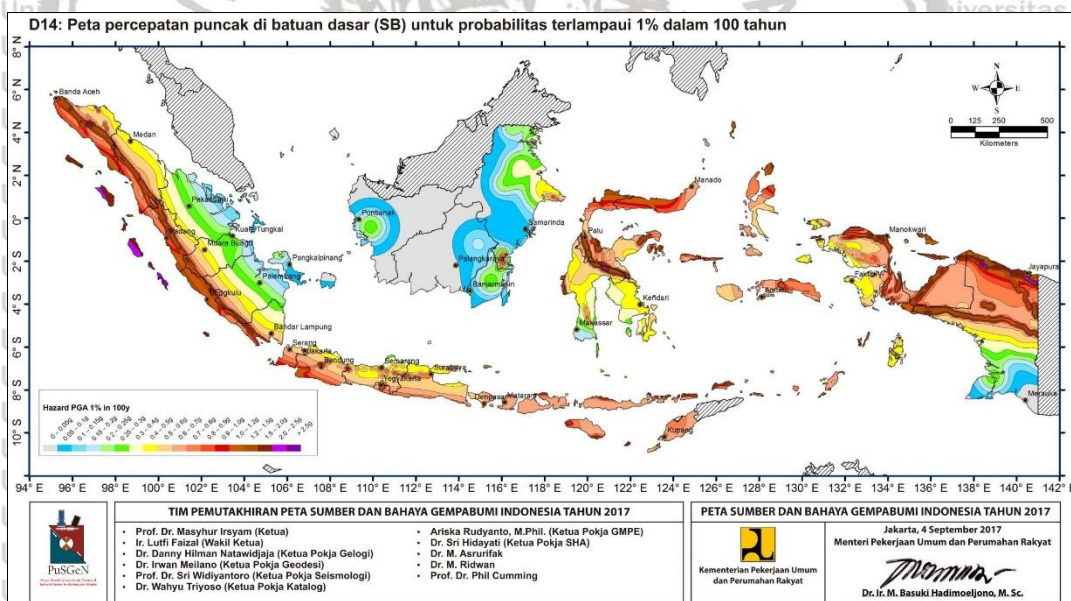
Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.282)





Gambar 2.41. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 2% dalam 100 Tahun.

Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.283)



Gambar 2.42. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 1% dalam 100 Tahun.

Sumber: Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (2017,p.283)





## 2.13. Metode Analisis Stabilitas Gempa Bendungan Urugan Akibat Beban Gempa

### 2.13.1. Tinjauan Umum

Untuk mencegah ketidakstajikan akibat penurunan kuat-geser, akibat peningkatan tekanan pori yang dapat menimbulkan terjadinya proses likuifaksi, deformasi berlebihan dan pengaruh gelombang tinggi, perlu diperhatikan hal-hal sebagai berikut:

1. Pemadatan urugan pada konstruksi bendungan urugan harus dilakukan dengan baik sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan.
2. kemiringan lereng untuk bendungan urugan tanah ialah 1:2,5 sampai dengan 1:3 (vertikal : horisontal). Untuk bendungan tipe urugan batu dengan inti tegak atau miring, kemiringan lereng dapat dibuat lebih curam.
3. Faktor keamanan beban statik untuk bidang longsor kritis dari hasil analisis stabilitas lereng ialah 1,5 kali lebih besar daripada faktor keamanan minimum yang dipersyaratkan untuk kondisi pembebanan dengan gempa.
4. Tinggi jagaan minimum disesuaikan dengan melihat RSNI T-01-2002. Jika kondisi tersebut tidak dapat dipenuhi, harus dilakukan analisis deformasi dengan menggunakan cara *Newmark* atau *Makdisi & Seed*.

### 2.13.2. Analisis Cara Koefisien Gempa

Cara ini dilakukan dengan menghitung koefisien gempa dan gaya-gaya vibrasi yang bekerja dengan arah yang berubah-ubah yang diganti dengan satu gaya statik mendarat, seperti persamaan berikut ini.

$$K_h = \frac{a_d}{g} \dots \dots \dots (2-25)$$

dengan:

$K_h$  = adalah koefisien gempa dasar yang tergantung pada periode ulang  $T$ ;

$a_d$  = adalah percepatan gempa terkoreksi oleh pengaruh jenis tanah ( $g$ );

$g$  = adalah gravitasi ( $=980 \text{ cm/det}^2$ ).

Dalam metode analisis ini, percepatan gempa dari dasar sampai dengan puncak bendungan dianggap sama. Anggapan ini sebetulnya kurang tepat karena bendungan tipe urugan bersifat lebih fleksibel sehingga percepatan gempa seharusnya makin membesar di puncak. Analisis stabilitas dilakukan dengan metode keseimbangan batas dengan koefisien gempa  $K$  yang keluarannya berupa faktor keamanan (Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa, 2004).



Percepatan gempa diperoleh berdasarkan pada peta zona gempa, koefisien zona gempa, dan percepatan gempa dasar yang dihitung dengan persamaan berikut.

$$a_d = Z \cdot a_c \cdot v \quad \dots\dots\dots (2-26)$$

dengan:

$a_d$  = adalah percepatan gempa maksimum yang terkoreksi di permukaan tanah (gal)

$a_c$  = adalah percepatan gempa dasar, lihat Tabel 2.5.

$Z$  = adalah koefisien zona, lihat gambar peta zona gempa.

$v$  = adalah koreksi pengaruh jenis tanah setempat, lihat Tabel 2.6.

Tabel 2.5. Percepatan Gempa Dasar untuk Berbagai Periode Ulang

T (Tahun)	$a_c$ (gal)
10	0,127
20	0,155
50	0,196
100	0,227
200	0,255
500	0,289
1000	0,313
5000	0,364
10000	0,385

Sumber: Analisis Dinamik Bendungan Urugan, (2008,p.53)

Tabel 2.6. Faktor Koreksi Pengaruh Jenis Tanah Setempat

No	Jenis Tanah	Periode Predominan $T_s$ (detik)	Koreksi ( $v$ )
1	<b>Batuan</b> a) Perlapisan terbentuk sebelum periode kuarter disebut batuan. b) Lapisan diluvial di atas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 10 m.	$T_s \leq 0,25$	0,80
2	<b>Deluvium</b> a) Lapisan diluvial di atas lapisan batuan dengan tebal lebih dari 10 m. b) Lapisan aluvial di atas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 10 m.	$0,25 < T_s \leq 0,50$	1,00



No	Jenis Tanah	Periode Predominan $T_s$ (detik)	Koreksi ( $v$ )
3	<b>Aluvium</b> a) Lapisan aluvial di atas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 25 m. b) Lapisan aluvial di atas lapisan batuan dengan tebal kurang dari 25 m dan lapisan aluvial lunak kurang dari 5 m.	$0,50 < T_s \leq 0,75$	1,10
4	<b>Aluvium Lunak</b> a) Lapisan tanah pasiran jenuh air dengan tebal kurang dari 10 m dari permukaan dengan $N_{SPT} \leq 10$ pk1/30 cm penetrasi. b) Lapisan tanah kohesif atau lanauan lunak ditemukan mulai pada kedalaman 3 m dari permukaan dengan nilai $c_u \leq 0,25$ kg/cm <sup>2</sup> dari uji lapangan.	$T_s > 0,75$	1,20

Sumber: Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Urugan Akibat Beban Gempa, (2004,p.25)

### 2.13.3. Analisis Cara Koefisien Gempa Termodifikasi

Analisis cara koefisien gempa yang telah dijelaskan di atas perlu dimodifikasi karena sudah tidak sesuai lagi (Analisis Dinamik Bendungan Urugan, 2008). Oleh karena itu, digunakan cara dari Jepang “*Seismic Design Guideline for Fill Dam*” dengan koefisien gempa desain  $K_h = a_d/g$ , yang diperoleh dari (persamaan 2-25). Koefisien gempa desain untuk tubuh bendungan urugan merupakan fungsi dari kedalaman, dapat dihitung dengan persamaan 2-27 di bawah ini:

$$K_o = \alpha \cdot K_h \quad (2-27)$$

dengan:

$K_o$  = koefisien gempa desain terkoreksi dipermukaan tanah.

$\alpha$  = koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan = 0,5

$K_h$  = koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang  $T$ .

Dalam analisis ini, koefisien gempa pada kedalaman  $y$  dari puncak bendungan berbeda-beda. Karena itu, peninjauan dilakukan pada  $y = 0,25h$ ;  $0,5h$ ;  $0,75h$  dan  $1h$  ( $h$  adalah tinggi bendungan) dengan menggunakan  $K_h$  pada periode ulang sesuai dengan yang disyaratkan.



Koefisien gempa rata-rata  $K_s$  pada  $y$  yang berbeda-beda, dapat dihitung dengan persamaan 2-27 dan persamaan 2-28. namun cara ini tidak berlaku untuk bendungan yang kaku seperti bendungan beton.

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

$$K_s = K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (y/h)\} \dots\dots\dots (2-28)$$

Untuk  $0,4 < y/h \leq 1,0$

$$K_s = K_o \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\} \dots\dots\dots (2-29)$$

#### 2.13.4. Penentuan Klasifikasi Kelas Resiko Gempa

Klasifikasi kelas resiko beban gempa yang harus digunakan dalam desain gempa ditentukan oleh tingkat resiko bangunan seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.7

Tabel 2.7. Kriteria Faktor Resiko untuk Evaluasi Keamanan Bendungan Urugan

Faktor Resiko	Angka Bobot Dalam Kurung				
	Ekstrem	Tinggi	Moderat	Rendah	
Kapasitas ( $10^6 m^3$ ) (FR <sub>k</sub> )	>100 (6)	100 – 1,25 (4)	1,00 – 0,125 (2)	<0,125 (0)	
Tinggi (m) (FR <sub>t</sub> )	>45 (6)	45 – 30 (4)	30 – 15 (2)	<15 (0)	
Kebutuhan Evakuasi (orang) (FR <sub>e</sub> )	>1000 (12)	1000 – 100 (8)	1000 – 1 (4)	0 (0)	
Tingkat kerusakan hilir (FR <sub>h</sub> )	Sangat Tinggi (12)	Tinggi (10)	Agak Tinggi (8)	Moderat (4)	Tidak ada (0)

Sumber: Analisis Dinamik Bendungan Urugan, (2008,p.113)

Empat faktor resiko yang harus dipertimbangkan dalam analisis adalah kapasitas waduk, tinggi bendungan, kebutuhan evakuasi dan kerusakan di hilir. Tiap-tiap faktor resiko terbagi lagi dalam kondisi resiko ekstrim, tinggi, moderat dan rendah dengan nilai yang tertera pada Tabel 2.7. Penentuan kelas beban gempa dilakukan dengan menghitung faktor resiko total (FR<sub>tot</sub>) yang merupakan penjumlahan dari faktor resiko pengaruh kapasitas waduk (FR<sub>k</sub>), tinggi bendungan (FR<sub>t</sub>), kebutuhan evakuasi (FR<sub>e</sub>) dan kerusakan di hilir (FR<sub>h</sub>) dengan menggunakan persamaan seperti di bawah ini.

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \dots\dots\dots (2-30)$$

dengan:

FR<sub>tot</sub> = faktor resiko total (bobot).



$FR_k$  = faktor resiko pengaruh kapasitas waduk (bobot).

$FR_t$  = faktor resiko pengaruh tinggi bendungan (bobot).

$FR_e$  = faktor resiko kebutuhan evakuasi (bobot).

$FR_h$  = faktor resiko tingkat kerusakan hilir (bobot).

### 2.13.5. Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan

Menurut faktor total, kelas resiko untuk desain bendungan akan diuraikan dalam Tabel

2.8 terbagi atas kelas I (rendah), kelas II (moderat), kelas III (tinggi) dan kelas IV (ekstrim).

Tabel 2.8. Kelas Resiko Bendungan Urugan dan Bangunan Air

Faktor Resiko Total	Kelas Resiko
(0 – 6)	I (Rendah)
(7 – 18)	II (Moderat)
(19 – 30)	III (Tinggi)
(31 – 36)	IV (Ekstrim)

Sumber: Analisis Dinamik Bendungan Urugan, (2008,p.113)

Analisis gempa pada bendungan urugan dilakukan pada dua tingkat gempa, yaitu sebagai berikut:

1. Persyaratan tanpa kerusakan dengan periode ulang T, ditentukan (OBE), sehingga beban gempa dapat diperoleh dari peta zona gempa. Analisis dilakukan dengan cara koefisien gempa. Kestabilan bendungan harus lebih tinggi dari faktor keamanan minimum yang disyaratkan, bendungan tidak mengalami kerusakan yang serius, dan masih tetap beroperasi, serta tidak diperlukan pekerjaan perbaikan yang menyeluruh.
2. Persyaratan yang diperkenankan ada kerusakan tanpa terjadi keruntuhan dengan periode ulang T ditentukan untuk kelas I, II, III dan IV, sehingga percepatan gempa maksimum di permukaan tanah dapat diperoleh dari peta zona gempa. Analisis dilakukan dengan cara dinamik dengan menggunakan ragam sambutan gempa atau sejarah waktu percepatan gempa. Bendungan harus mampu menahan desain gempa MDE tanpa keruntuhan atau diperkenankan ada kerusakan dengan alihan tetap tidak melampaui 50 % dari tinggi jagaan.



Kriteria beban gempa untuk desain bendungan urugan akan ditunjukkan berdasarkan Tabel 2.9 dan ditentukan menurut kelas resiko di bawah ini.

Tabel 2.9. Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan

Kelas resiko dengan masa guna	Persyaratan tanpa kerusakan		Persyaratan diperkenankan ada kerusakan tanpa keruntuhan	
	T (Tahun)	Medode Analisis	T (Tahun)	Medode Analisis
IV N=100	100 – 200 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. gempa	10.000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik
III N=100	50 – 100 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. gempa	5.000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik
II N=100	50 – 100 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. gempa	3.000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik
I N=100	50 – 100 $a_d \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. gempa	1.000 (MDE)	Koef. gempa atau dinamik

Catatan:

1. Untuk bendungan besar dengan kondisi geologi setempat yang khusus, Peta Zona Gempa dalam bab 4 tetap dapat digunakan, namun perlu diklarifikasi dengan melakukan studi gempa tersendiri.
2. Analisis dinamik dapat dilakukan dengan analisis spektrum percepatan gempa (cara simplifikasi) atau sejarah waktu percepatan gempa.

Sumber: Analisis Dinamik Bendungan Urugan, (2008,p.114)

#### 2.14. Kriteria Faktor Keamanan Minimum

Nilai faktor keamanan minimum untuk setiap kondisi pembebanan menunjukkan kriteria dalam analisis stabilitas lereng. Deviasi untuk kriteria umum diperkenankan, jika ditunjang oleh alasan-alasan yang dapat dipertanggung jawabkan.

Nilai faktor keamanan ini harus diperhitungkan terhadap faktor-faktor:

- a) Kondisi desain selama analisis dan resiko keruntuhan.
- b) Tingkat ketelitian parameter kuat geser (*shear strength*) dan prediksi tekanan air pori.
- c) Struktur tubuh bendungan.
- d) Investigasi di lapangan.
- e) Kompatibilitas tegangan-regangan dari material fondasi dan tubuh bendungan.
- f) Kualitas pengawasan konstruksi.
- g) Tinggi bendungan.
- h) Penilaian berdasarkan pengalaman di masa lalu terhadap bendungan tipe urugan.



Faktor keamanan untuk analisis stabilitas lereng, didefinisikan sebagai rasio dari total tahanan geser tanah yang diperkenankan terhadap tegangan geser tanah. keamanan disini diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan sepanjang permukaan bidang yang berpotensi untuk longsor atau tergelincir.

Faktor keamanan minimum untuk desain stabilitas lereng ditentukan terutama berdasarkan pertimbangan faktor-faktor pengawasan terhadap tekanan air pori dan asumsi kuat geser material.

Kriteria faktor keamanan dipertimbangkan terhadap hal-hal seperti berikut ini:

- a) Berdasarkan analisis dari USBR dengan menggunakan cara keseimbangan batas.
- b) Bila cara analisis berbeda maka faktor keamanan berbeda, sekalipun untuk bendungan yang sama dengan sifat fisik material dan kondisi pembebanan yang sama.
- c) Untuk kondisi pembebanan pada waktu selesai konstruksi, tekanan air pori berlebihan akan meningkat di dalam zona kedap air dari bendungan atau fondasi. Hal ini disebabkan karena tanah tidak dapat terkonsolidasi sepenuhnya selama masa konstruksi berlangsung. Oleh karena itu, penggunaan parameter kuat geser efektif sangat berpengaruh terhadap faktor keamanan.
  - Faktor keamanan minimum sebesar 1,3 cukup memadai, jika tekanan air pori diawasi selama konstruksi berlangsung atau untuk menganalisis pada kondisi kuat geser total.
  - Jika digunakan kuat geser efektif tanpa pengawasan tekanan air pori di lapangan, maka faktor keamanan minimum diambil 1,4 untuk mengurangi pengaruh tekanan air pori berlebihan.
- d) Untuk kondisi aliran langgeng pada elevasi muka air waduk normal, harus diperhitungkan faktor keamanan minimum sebesar 1,5. Hal ini untuk mengantisipasi pengaruh ketidakpastian kuat geser material, tekanan air pori di dalam material kedap air, dan pembebanan jangka panjang, serta keruntuhan lereng hilir dan pelepasan air darurat.
- e) Untuk kondisi surut cepat, pembebanan mengalami ketidakseimbangan, sehingga lereng udik tidak stabil walaupun pembebanan ini berlangsung singkat. Namun, keruntuhan pada lereng udik tidak menimbulkan pelepasan air waduk. Karena itu faktor keamanan minimum dapat diambil sebesar 1,3 atau lebih rendah sesuai dengan kondisi pembebanan.

Faktor keamanan minimum yang disyaratkan untuk analisis stabilitas lereng bendungan tipe urugan, ditunjukkan dalam Tabel 2.10 di bawah ini.



Tabel 2.10. Persyaratan Faktor Keamanan Minimum Stabilitas Bendungan Tipe Urugan

No	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa
1.	<b>Selesai konstruksi tergantung:</b> 1. Jadwal konstruksi. 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu.  Lereng U/S dan D/S.  Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koefisien gempa desain.	1. Efektif	Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data lab. dan pengawasan instrumen.	1,30	1,20
			Idem hanya tanpa pengawasan instrumen.	1,40	1,20
			Hanya pada urugan tanpa data lab. dan dengan/ tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
		2. Total	Tanpa pengawasan instrumen.	1,30	1,20
2.	<b>Aliran langgeng tergantung:</b> 1. Elevasi muka air normal sebelah udik. 2. Elevasi muka air sebelah hilir. Lereng U/S dan D/S. Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100% koef. gempa desain.	1. Efektif	Dari analisis rembesan	1,50	1,20
3.	<b>Pengoerasian waduk tergantung:</b> 1. Elevasi muka air maksimum di udik. 2. Elevasi muka air minimum di udik ( <i>dead storage</i> ). Lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat.	1. Efektif	Surut cepat dari El. muka air normal sampai El. muka air minimum. Lereng U/S dan D/S	1,30	1,10
			Surut cepat dari El. MA maksimum sampai El. MA minimum. Pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain.	1,30	-
4.	<b>Kondisi darurat tergantung:</b> 1. Pembuntuan pada sistem drainase. 2. Surut cepat karena penggunaan air melebihi kebutuhan. 3. Surut cepat keperluan darurat.	1. Efektif	Surut cepat dari El. MA maksimum sampai El. terendah bangunan pengeluaran. Pengaruh gempa diabaikan.	1,20	-

Sumber: SNI-8064 (2016,p.28)





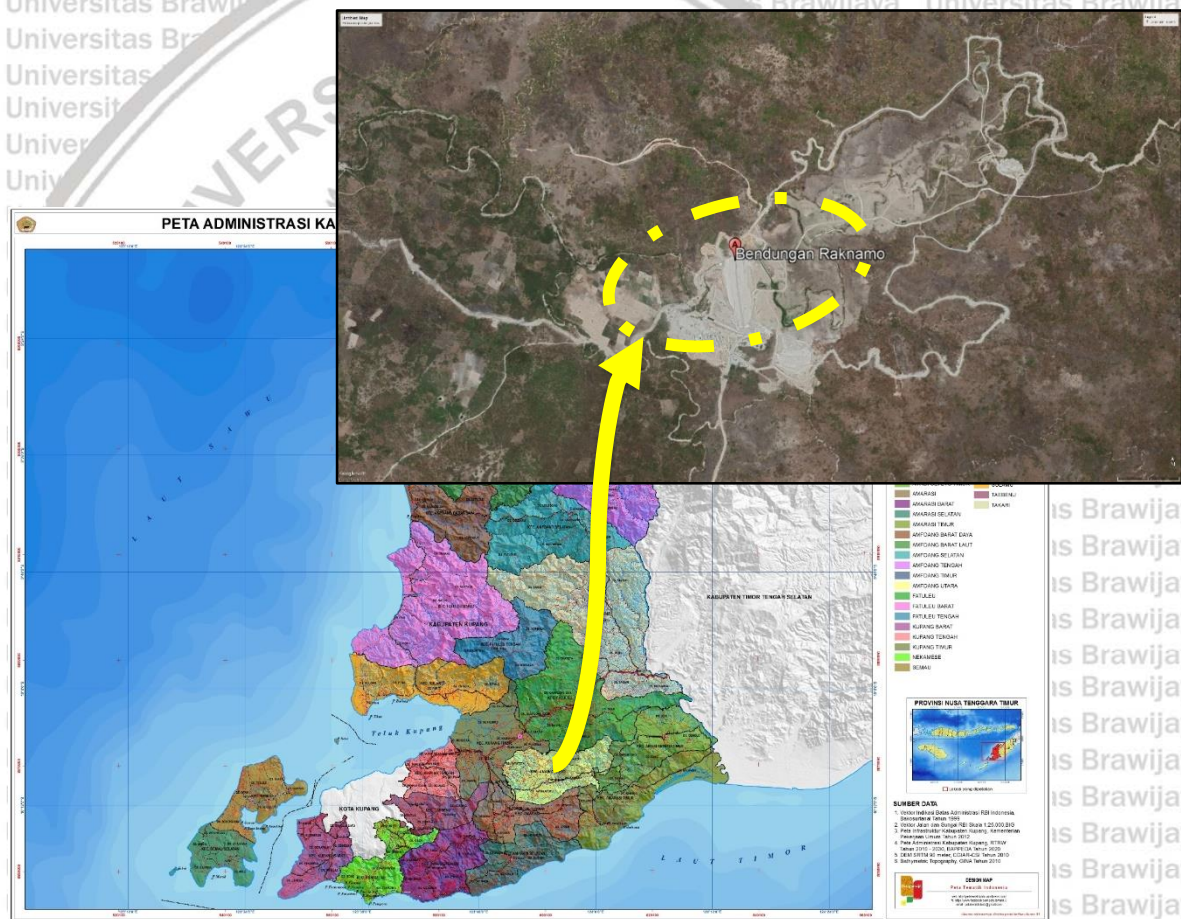
**Halaman ini sengaja dikosongkan**



### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Lokasi Penelitian

Bendungan Raknamo berlokasi di Dusun Raknamo Desa Raknamo Kecamatan Amabi Oefeto Kabupaten Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur. Bendungan Raknamo ini adalah bagian dari pemanfaatan sumber daya air untuk mengatasi kekurangan air baik untuk air baku maupun air irigasi yang selama ini dialami oleh masyarakat di Kabupaten Kupang. Gambar peta lokasi bendungan Raknamo dapat di lihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Peta Lokasi Penelitian

Sumber: Peta Kabupaten Kupang (2019)



### 3.2. Informasi Kegiatan Konstruksi

Konstruksi Bendungan Raknamo dikerjakan oleh PT. Waskita Karya (Persero) Tbk. pada Tanggal 4 Desember 2014 dan dapat diselesaikan pada Tanggal 28 Desember 2017, bendungan tersebut mulai dilakukan pengisian awal waduk (*impounding*) Tanggal 9 Januari 2018. Sedangkan informasi sesuai kontrak kerja dapat di lihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Informasi Kegiatan Konstruksi Bendungan Raknamo

Uraian	Keterangan
Lokasi	Desa Raknamo, Kecamatan Amabi Oefeto, Kabupaten Kupang
Pengguna Jasa	Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II, SNVT Pembangunan Bendungan BWS Nusa Tenggara II, PPK Kegiatan Bendungan I
Pelaksana Kegiatan Konstruksi	PT. Wakita Karya (Persero) Tbk.
Tanggal Kontrak Konstruksi	26 November 2014
Waktu Pelaksanaan Konstruksi	1.530 Hari Kalender (51 Bulan)
Waktu Selesai Kontrak	11 Februari 2019
Pelaksanaan Kegiatan Supervisi	PT.CATURBINA GUNA PERSADA (KSO) – PT. JASAPATRIA GUNATAMA – PT. ARGAS PASCA RENCANA – PT. SARANA BAGJA BUMI
Tanggal Kontrak Supervisi	17 Desember 2014
Waktu Pelaksanaan Supervisi	1.520 Hari Kalender (51 Bulan)
Waktu Selesai Supervisi	11 Februari 2019
Masa Pemeliharaan	365 Hari Kalender



### 3.3. Data-data Penunjang

Dalam penelitian ini diperlukan data-data penunjang untuk melakukan proses analisis. Data-data yang diperlukan dalam untuk melakukan analisis pada penelitian adalah sebagai berikut:

#### 1. Data Bacaan Instrumen

- a. Bacaan Instrument Pisometer: Prinsip dasar bekerjanya pisometer adalah bahwa suatu elemen yang porous dari pisometer dimasukkan ke dalam tanah, sehingga air tanah dapat masuk kedalamnya dan terkumpul di dalam unit elemen. Pengukuran permukaan air atau tekanan air di dalam alat pisometer dapat digunakan untuk menghitung besarnya tekanan air pori.
- b. Bacaan *Automatic Double Fluid Settlement Device* (ADFSD): Sistem ini direncanakan untuk mengukur Penurunan (*settlement*) secara menerus dengan suatu tubing yang dipasang melingkari geometri bendungan secara horizontal pada elevasi tertentu (*horizontal loop*).
- c. Bacaan Inclinometer: Instrumen inklinometer ini dipasang untuk mengamati atau memonitor suatu pergerakan ke arah horizontal di dalam lapisan tanah atau batuan. Pipa aluminium atau plastik yang mempunyai empat alur bersudut antara  $90^\circ$  dipasang di dalam lubang bor, atau pada tahapan penimbunan tanah, atau pada dinding suatu struktur. Bendungan besar yang menggunakan instrumen ini antara lain adalah bendungan Tarbela (Pakistan) dan Wadaslintang (Jawa Tengah).
- d. Bacaan Instrumen Ukur Rembesan : Instrumen ini dipasang untuk mengamati; (a) Gejala pelarutan pada fondasi batuan yang dapat mengakibatkan kekuatan geser menurun dan permeabilitas fondasi meningkat, (b) Gejala erosi buluh (*Piping*) pada tubuh atau fondasi bendungan.

#### 2. Data Penunjang Lain

Data-data tersebut yang akan dipakai untuk proses analisis dalam penelitian ini adalah:

- a. Data Debit Inflow
- b. Data Debit Outflow
- c. Data Mekanika Tanah (Material Timbunan dan Pondasi)
- d. Data Penampang Instrumen Bendungan dan Denah Instrumen Bendungan



### 3.4. Analisis Data

Data-data penunjang yang dipakai akan dianalisis, untuk menganalisis data-data tersebut akan diuraikan seperti penjelasan di bawah ini:

1. Data debit inflow dan debit outflow serta data teknis operasi waduk di peroleh dari data yang sudah ada, sehingga dapat dilakukan analisis simulasi waduk. Berdasarkan hasil simulasi waduk nantinya bisa diperoleh nilai tinggi muka air sesuai pola operasi waduk sehingga dapat dilanjutkan dengan analisis menggunakan model numerik (Menggunakan Aplikasi Geostudio 2012).

2. Data mekanika tanah (material timbunan dan pondasi)

Keamanan Bendungan terhadap rembesan, *settlement*, kestabilan lereng dianalisis menggunakan aplikasi Goestudio 2012 (SEEP/W, SIGMA/W dan SLOPE/W). Untuk dapat dianalisis menggunakan model numerik, maka diperlukan data inputan yaitu:

- Berat volume tanah ( $\gamma$ )
- Kohesi tanah ( $c$ )
- Sudut geser tanah ( $\theta$ )
- Water content (%)
- Koefisien permeabilitas (cm/dtk)
- Coffisiend of volume compressibility (cm<sup>2</sup>/g)

3. Data penampang instrumen bendungan dan denah instrumen bendungan

Data penampang instrumen digunakan untuk menggambarkan penampang bendungan sesuai dengan posisi pemasangan instrumen yang ada, sehingga dapat dianalisis dengan model numerik. Sedangkan data denah instrumen bendungan dibutuhkan agar kita dapat mengetahui posisi pemasangan instrumen pada bendungan tersebut.

4. Data pisometer

Data pisometer dipakai untuk membandingkan berapa besar nilai tekanan air pori saat awal impounding dengan data pembacaan instrumen sampai akhir tahun 2020. Data pisometer juga digunakan untuk dapat menggambar garis elevasi muka air atau garis freatik yang terjadi dalam tubuh bendungan, serta dilakukan analisis lanjut mengenai tekanan air pori yang terjadi pada tubuh bendungan dengan model numerik.



#### 5. Data *Multilayer Settlement*

Data *multilayer settlement* digunakan untuk membandingkan berapa besar penurunan secara vertikal pada tubuh bendungan saat awal konstruksi sampai setelah impounding dengan data hasil bacaan instrumen sampai akhir tahun 2020.

#### 6. Data V-notch

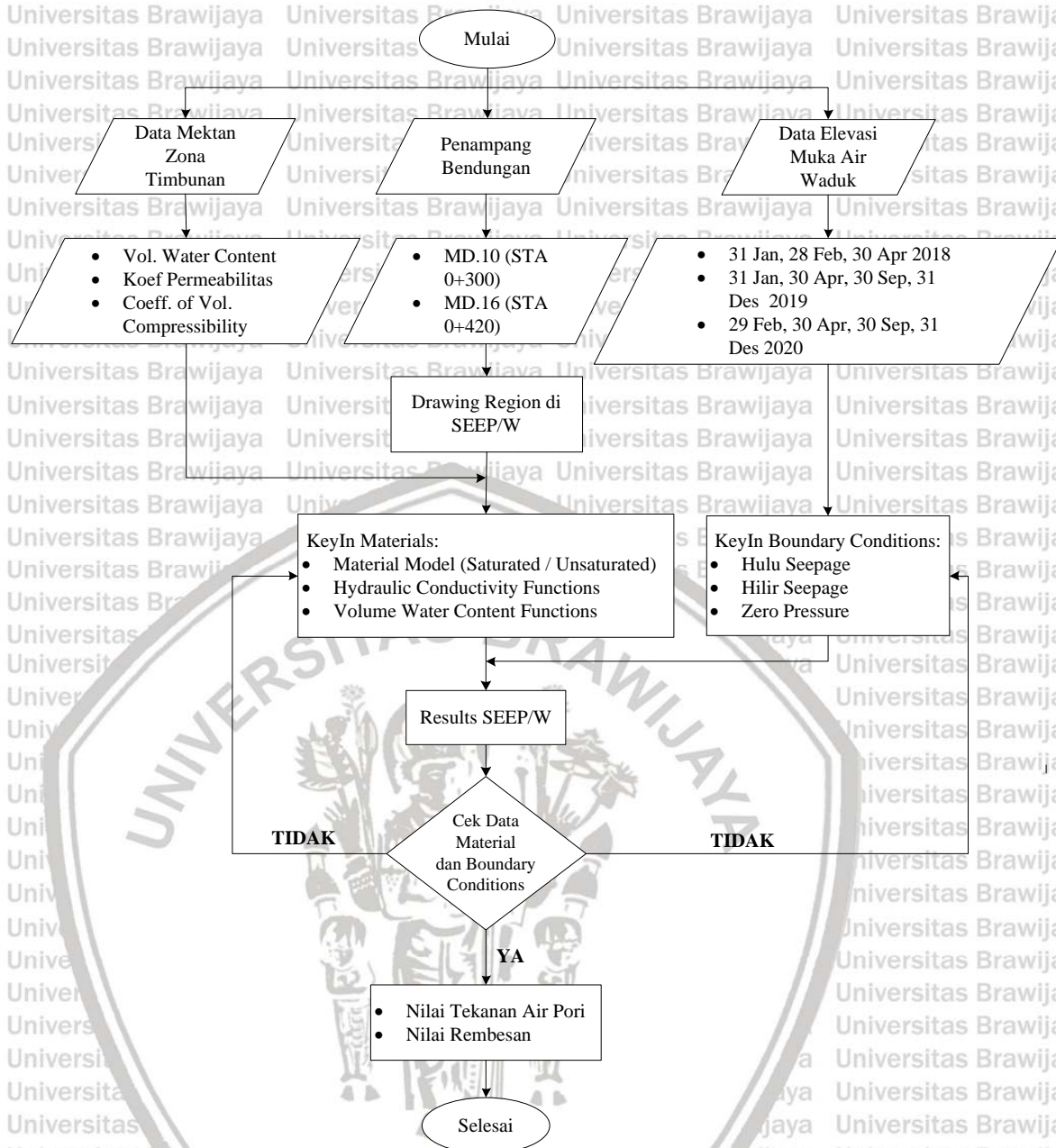
Data V-notch digunakan untuk membandingkan berapa besar nilai debit rembesan yang terjadi pada saat awal impounding dengan data hasil pembacaan instrumen sampai akhir tahun 2020.



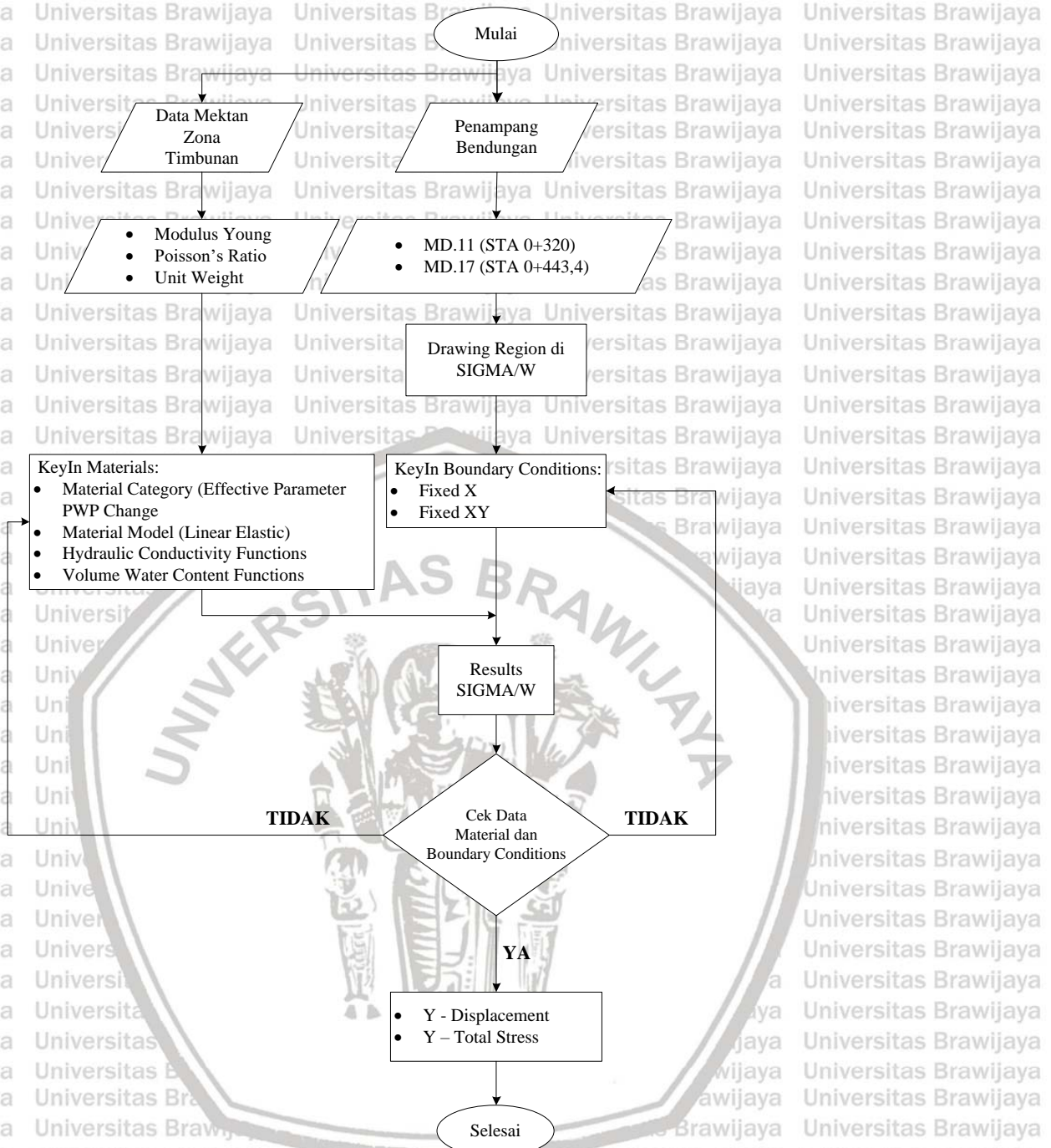






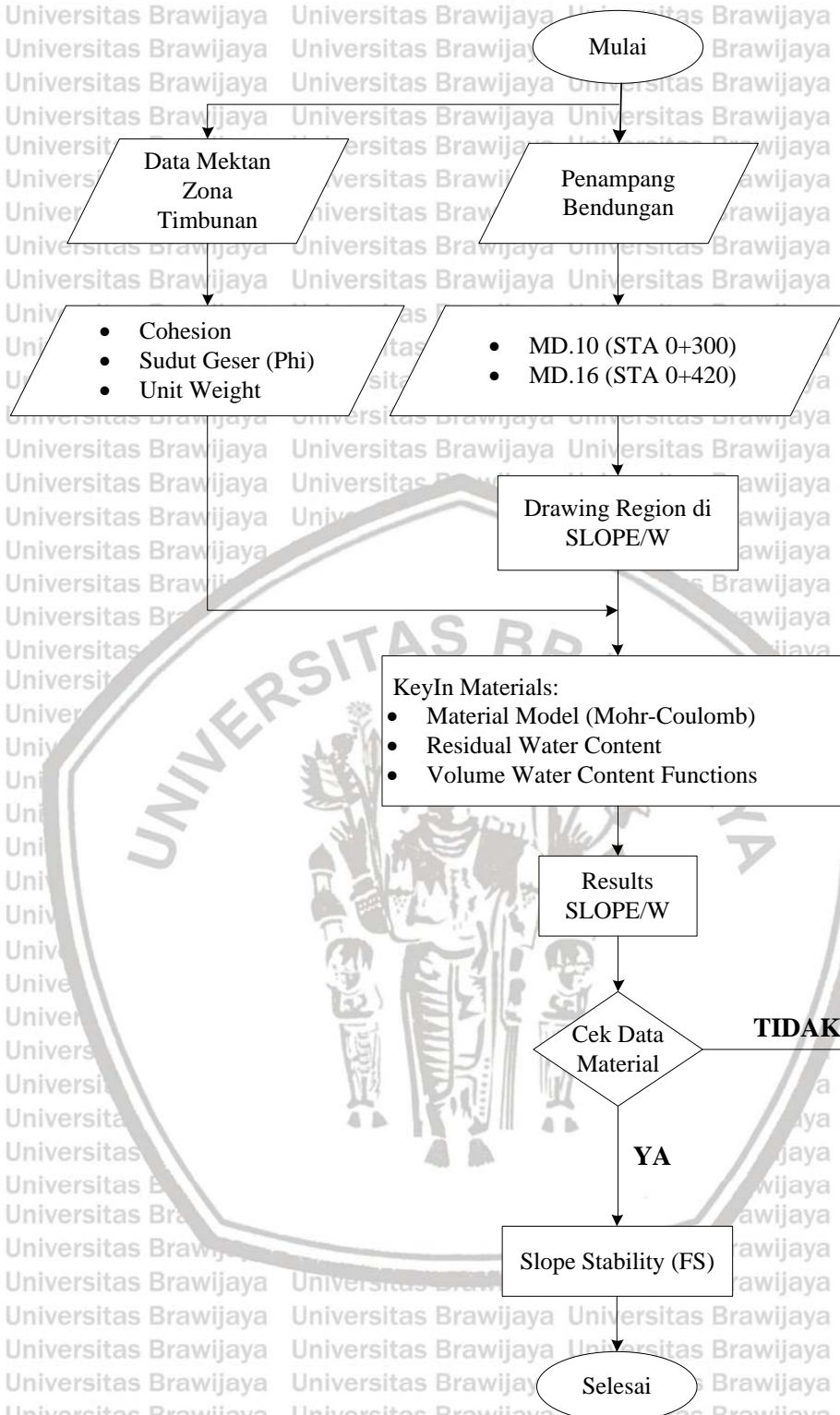


Gambar 3.3. Bagan Alir Analisis Numerik (SEEP/W)



Gambar 3.4. Bagan Alir Analisis Numerik (SIGMA/W)





Gambar 3.5. Bagan Alir Analisis Numerik (SLOPE/W)



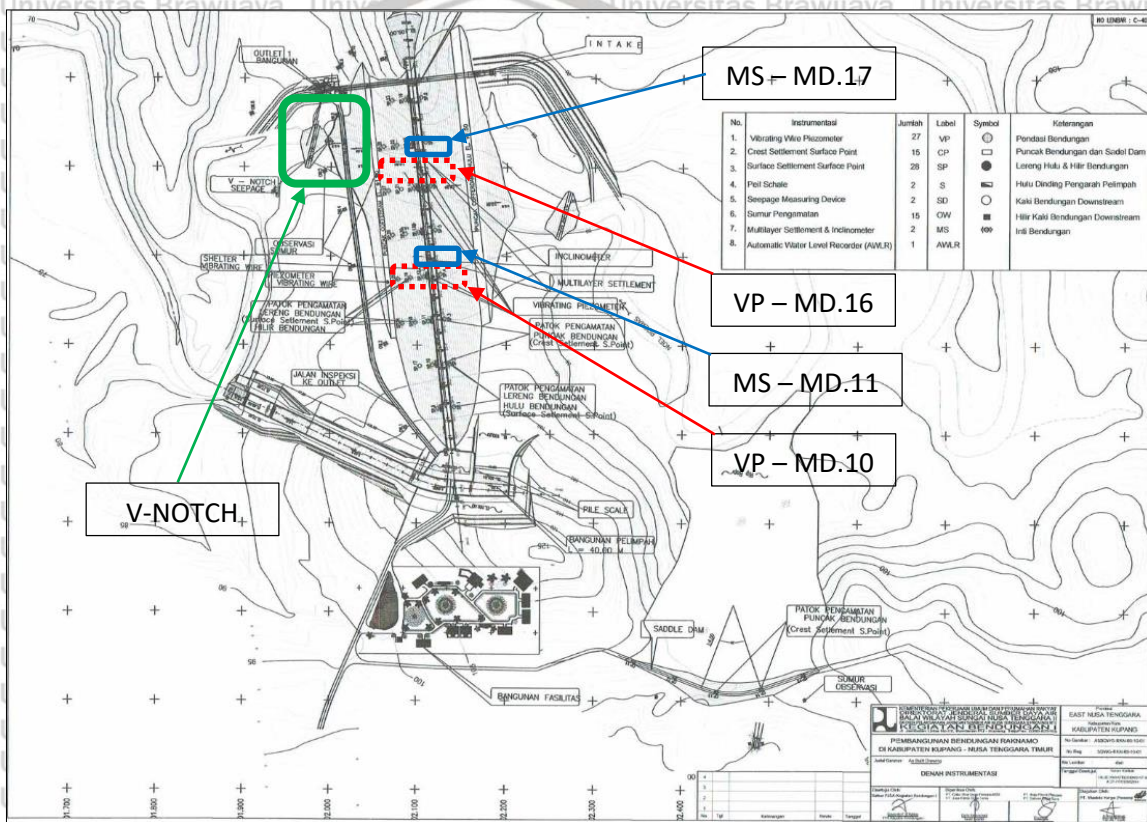
Halaman ini sengaja di kosongkan



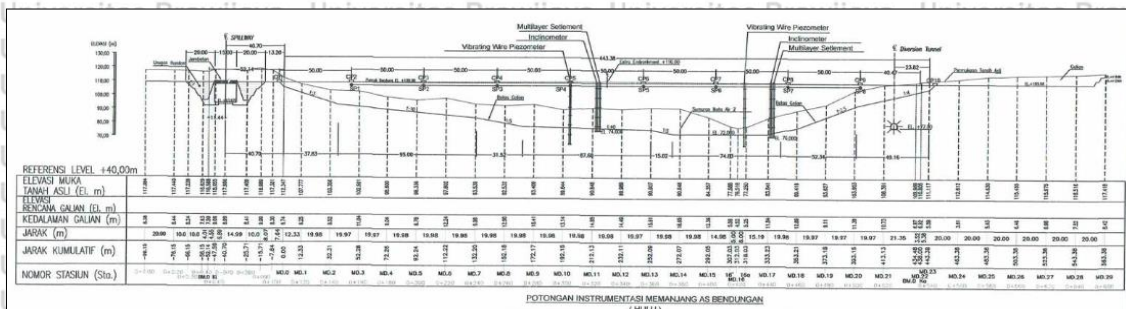
## BAB IV HASIL DAN ANALISIS

### 4.1. Data Instrumentasi Bendungan Raknamo

Data instrumentasi yang di pakai sebagai analisis adalah; *Vibrating Weir Piezometer*, *Multilayer Settlement*, dan *V-Notch*. Posisi atau denah pemasangan untuk masing-masing instrument pada Bendungan Raknamo dapat dilihat pada Gambar 4.1. sedangkan posisi pemasangan instrumen pada inti Bendungan Raknamo dapat dilihat pada Gambar 4.2.



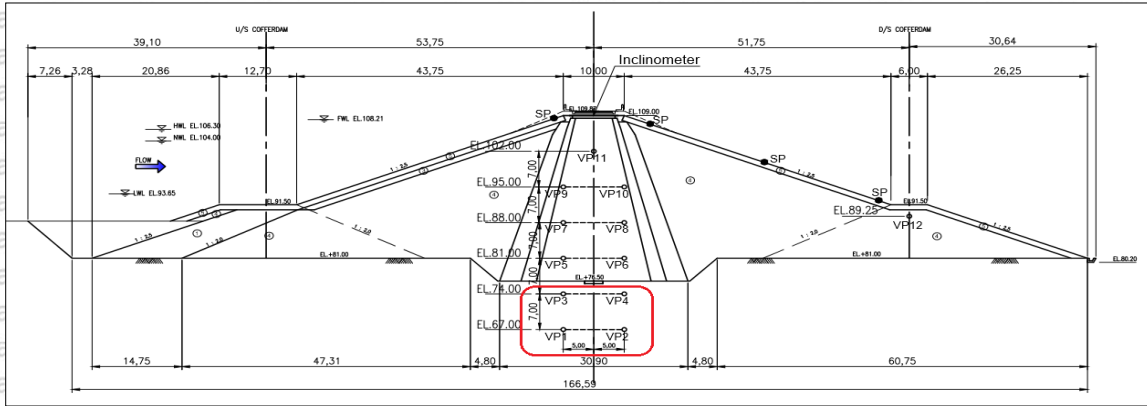
Gambar 4.1 Denah Penempatan Instrumen Bendungan Raknamo



Gambar 4.2. Potongan Memanjang Instrumen Pada As Bendungan Raknamo

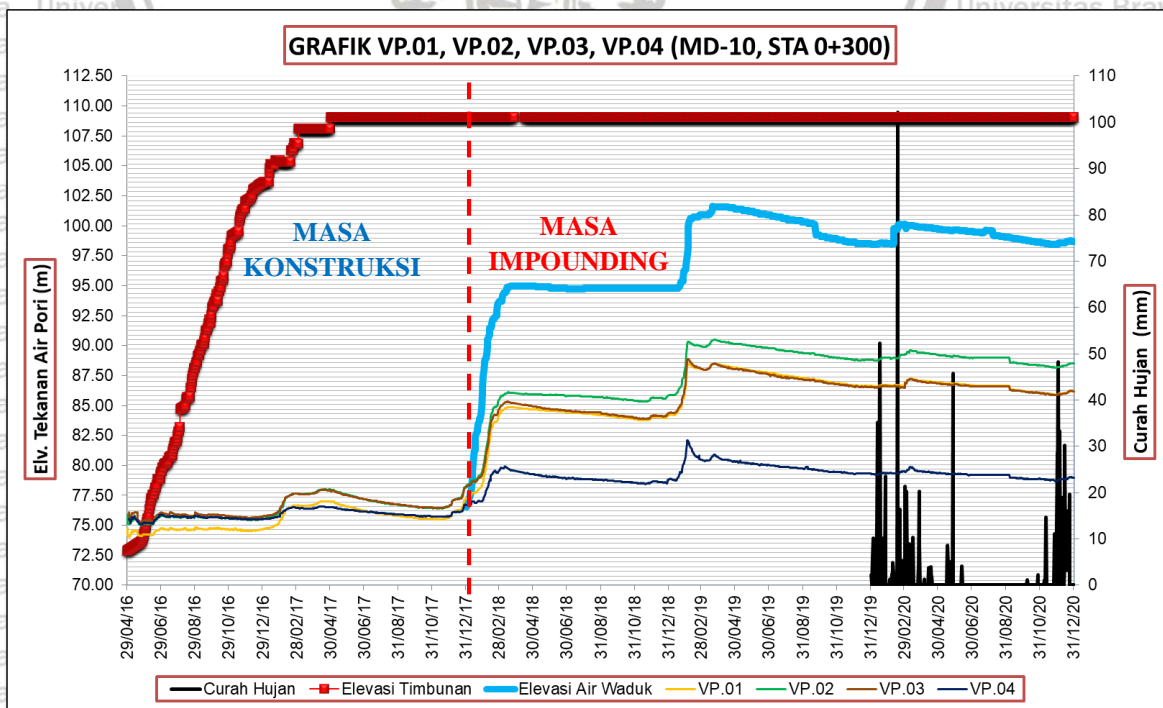
#### 4.1.1. Data Instrumen *Vibrating Wire Piezometer*

Data Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP) dipasang pada as maindam ada 2 titik dan pada as *cofferdam* hilir 1 titik. Instrumen pada posisi maindam MD.10 terletak pada (STA 0+300) dengan jumlah pantauan alat instrument sebanyak 4 di bagian Pondasi dan 7 dibagian inti timbunan, dapat dilihat pada Gambar 4.3. sampai Gambar 4.6. di bawah ini.



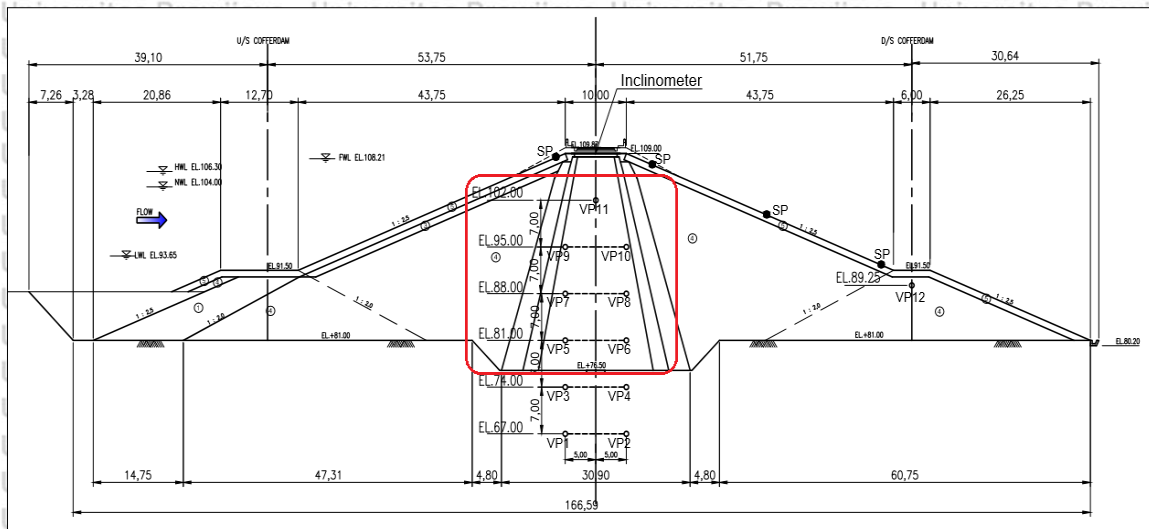
Gambar 4.3. Potongan Melintang Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* Pada Pondasi – MD.10 (STA 0+300)

Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP) MD.10 yang berada pada pondasi bendungan berjumlah 4 unit yaitu VP.01 – VP.04. Hasil bacaan *Total Head* pada VP.01 – VP.04, elevasi timbunan, elevasi muka air waduk dan curah hujan dapat dilihat pada Gambar 4.4. dibawah ini.



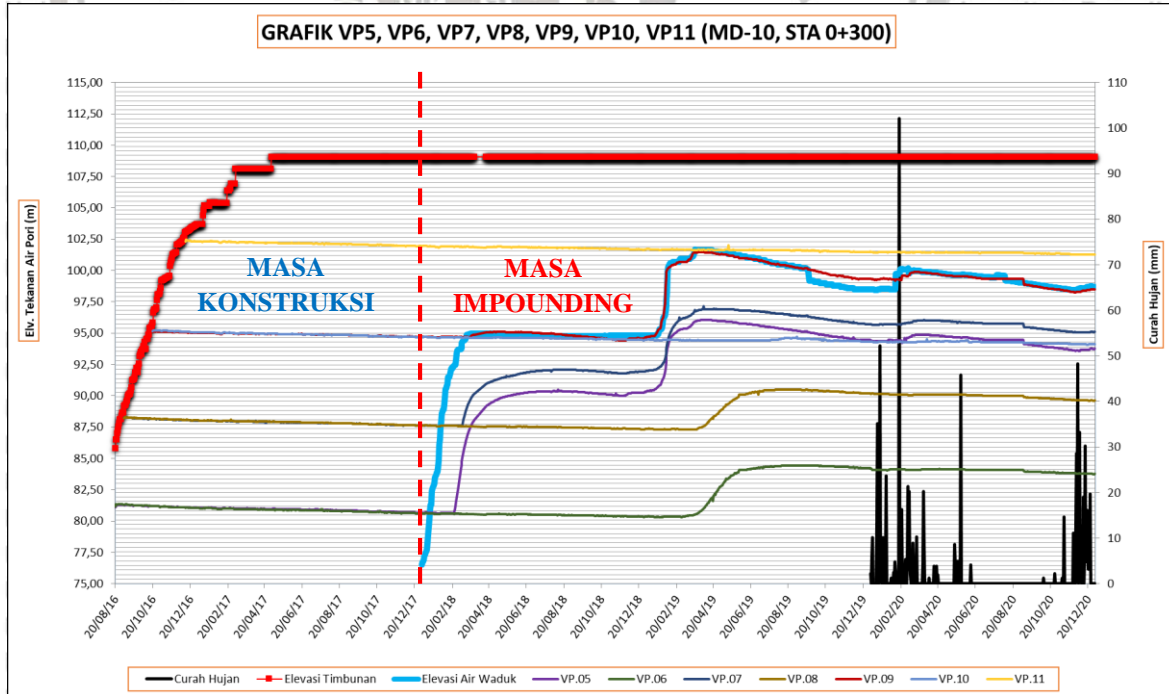
Gambar 4.4. *Pressure Head* Pada Pondasi Bendungan – MD.10





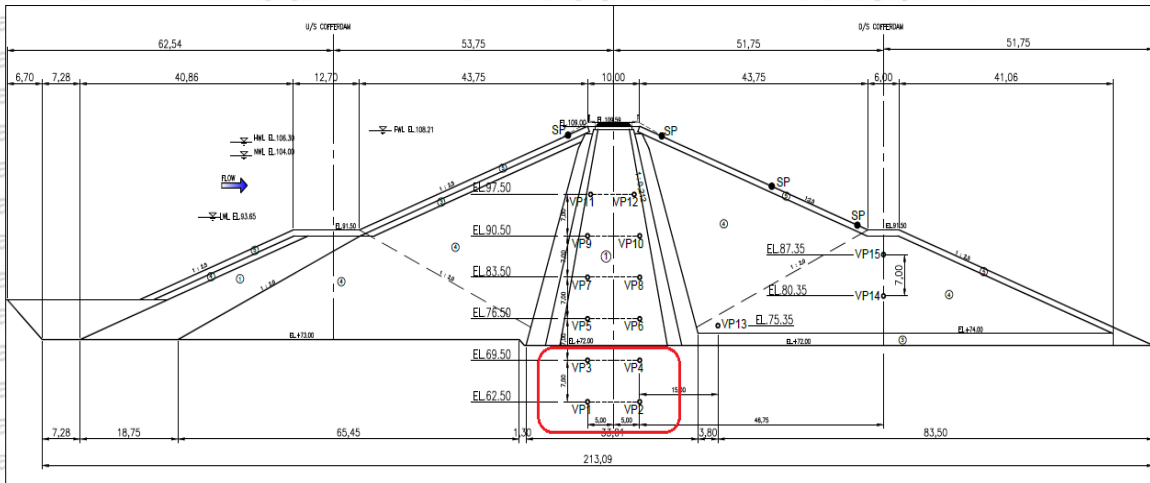
Gambar 4.5. Potongan Melintang Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* Pada Timbunan – MD.10 (STA 0+300)

Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP) MD.10 yang berada pada timbunan inti bendungan berjumlah 7 unit yaitu VP.05 – VP.11. Hasil bacaan *Total Head* pada VP.05 – VP.11, elevasi timbunan, elevasi muka air waduk dan curah hujan dapat dilihat pada Gambar 4.6. dibawah ini.



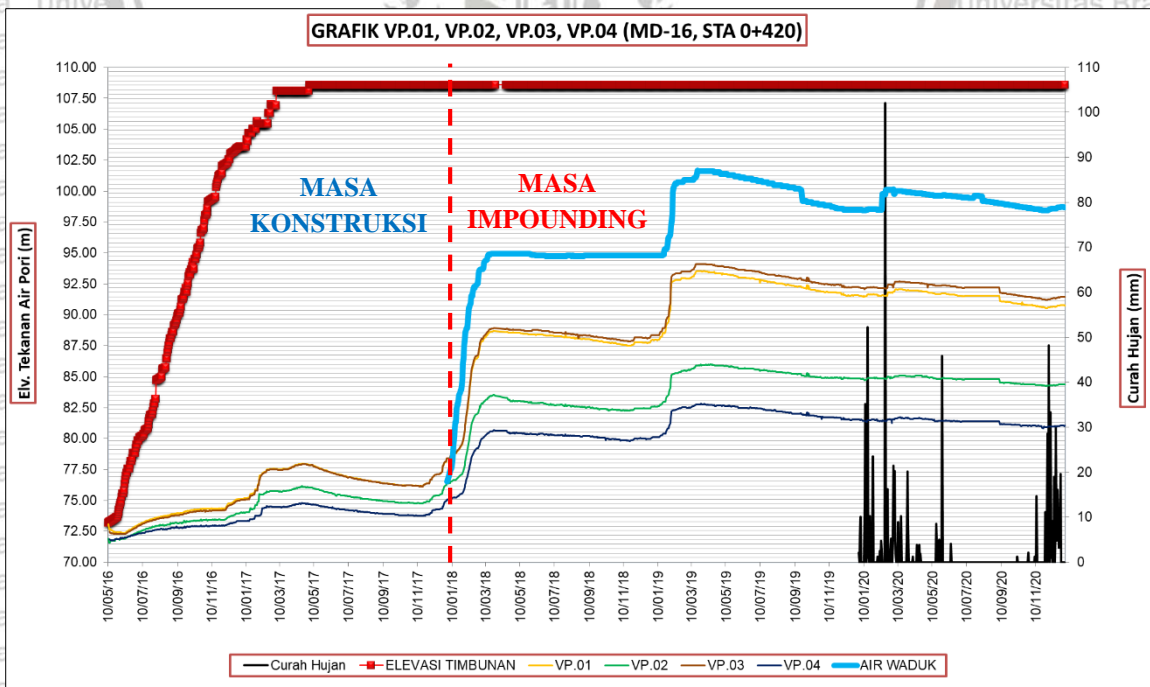
Gambar 4.6. *Pressure Head* Pada Inti Timbunan Bendungan – MD.10

Instrumen pada posisi maindam MD.16 terletak pada (STA 0+420) dengan jumlah pantauan alat instrumen sebanyak 4 di bagian Pondasi, 8 dibagian inti timbunan dan juga 3 di bagian *cofferdam* hilir, dapat dilihat pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.12. dibawah ini.



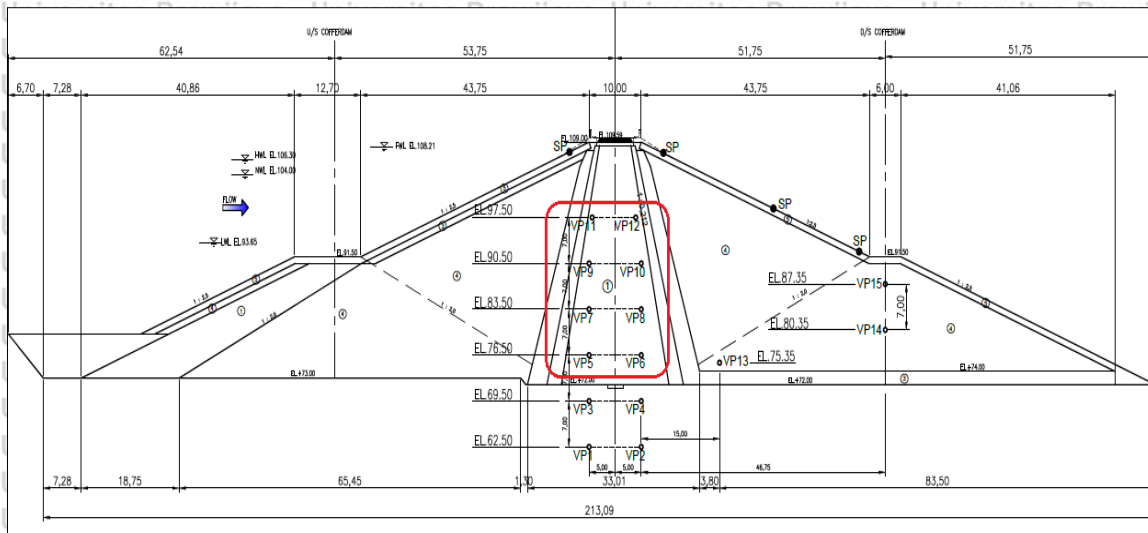
Gambar 4.7. Potongan Melintang Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* Pada Pondasi – MD.16 (STA 0+420)

Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP) MD.16 yang berada pada pondasi bendungan berjumlah 4 unit yaitu VP.01 – VP.04. Hasil bacaan *Total Head* pada VP.01 – VP.04, elevasi timbunan, elevasi muka air waduk dan curah hujan dapat dilihat pada Gambar 4.8. dibawah ini.



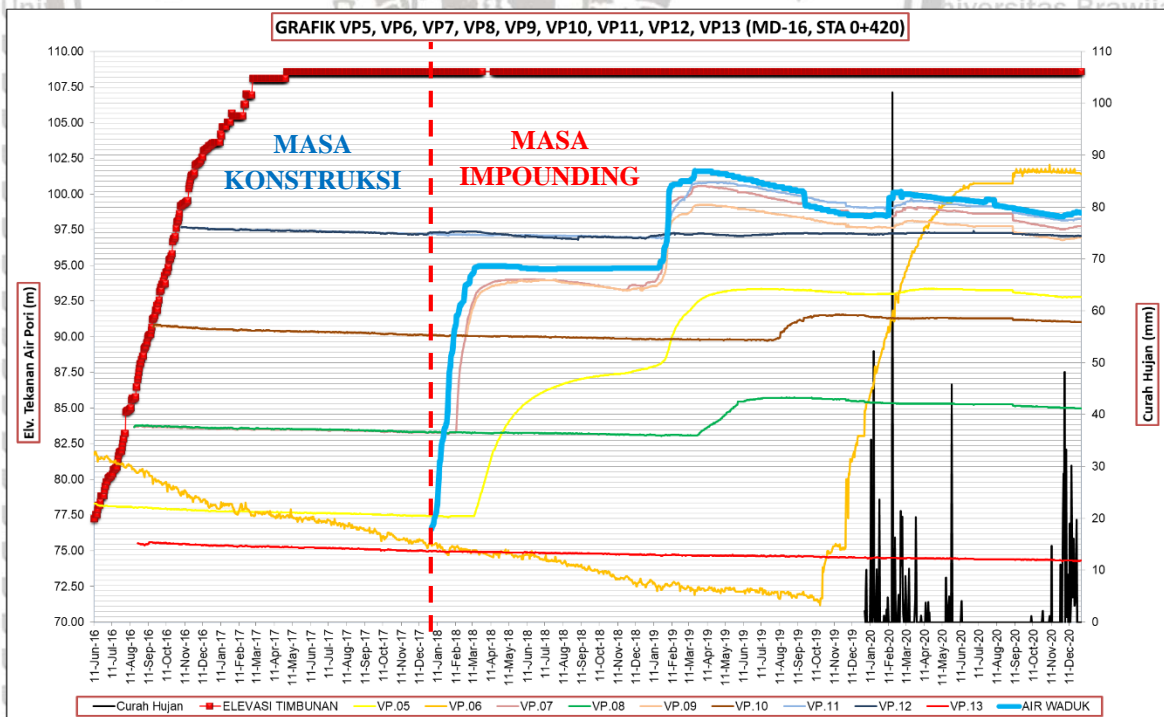
Gambar 4.8. *Pressure Head* Pada Pondasi Bendungan – MD.16



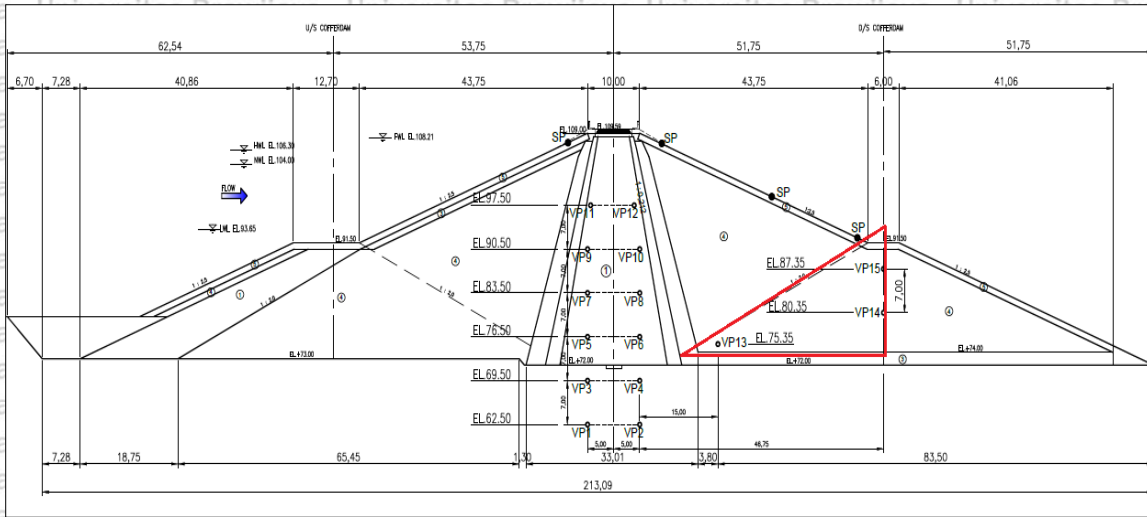


Gambar 4.9. Potongan Melintang Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* Pada Timbunan MD.16 (STA 0+420)

Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP) MD.16 yang berada pada timbunan inti bendungan berjumlah 8 unit yaitu VP.05 – VP.13. Hasil bacaan *Total Head* pada VP.05 – VP.13, elevasi timbunan, elevasi muka air waduk dan curah hujan dapat dilihat pada Gambar 4.10. dibawah ini.

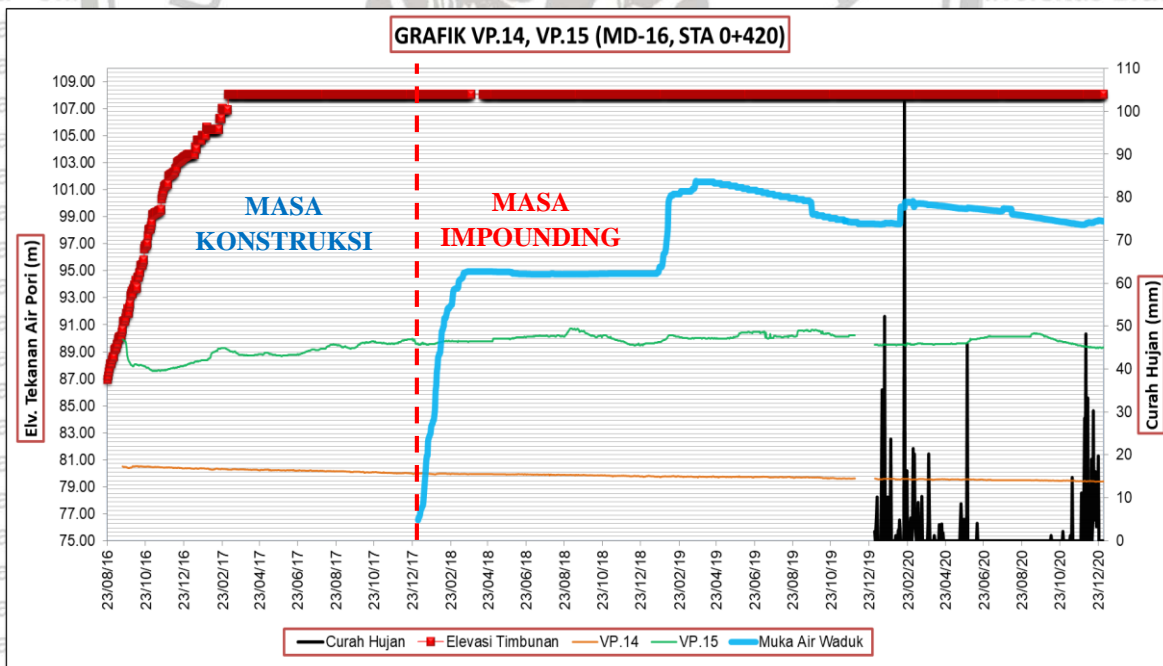


Gambar 4.10. *Pressure Head* Pada Inti Timbunan Bendungan – MD.16



Gambar 4.11. Potongan Melintang Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* Pada *Cofferdam* Hilir – MD.16 (STA 0+420)

Instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP) MD.16 yang berada pada *cofferdam* hilir bendungan berjumlah 3 unit yaitu VP.14 – VP.15. Hasil bacaan *Total Head* pada VP.14 – VP.15, elevasi timbunan, elevasi muka air waduk dan curah hujan dapat dilihat pada Gambar 4.12. dibawah ini.

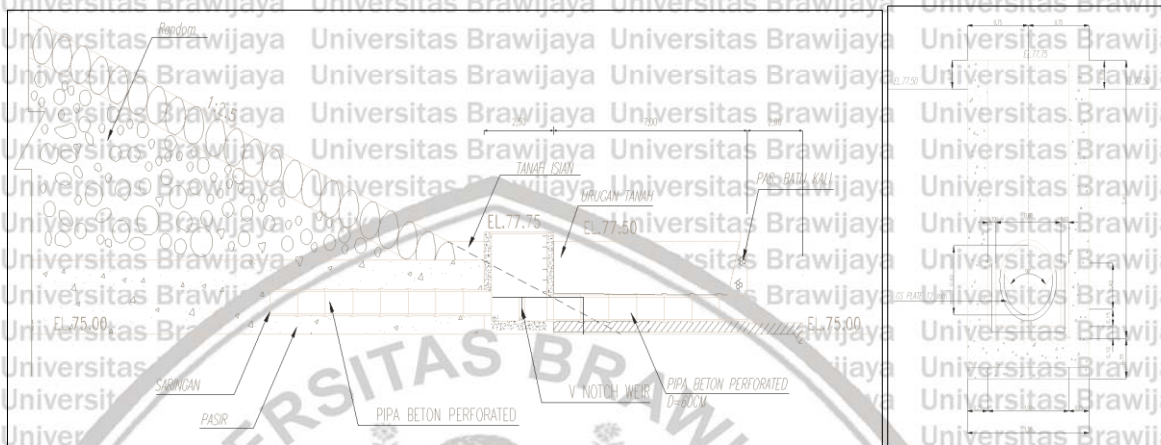


Gambar 4.12. *Pressure Head* Pada *Cofferdam* Hilir Bendungan – MD.16



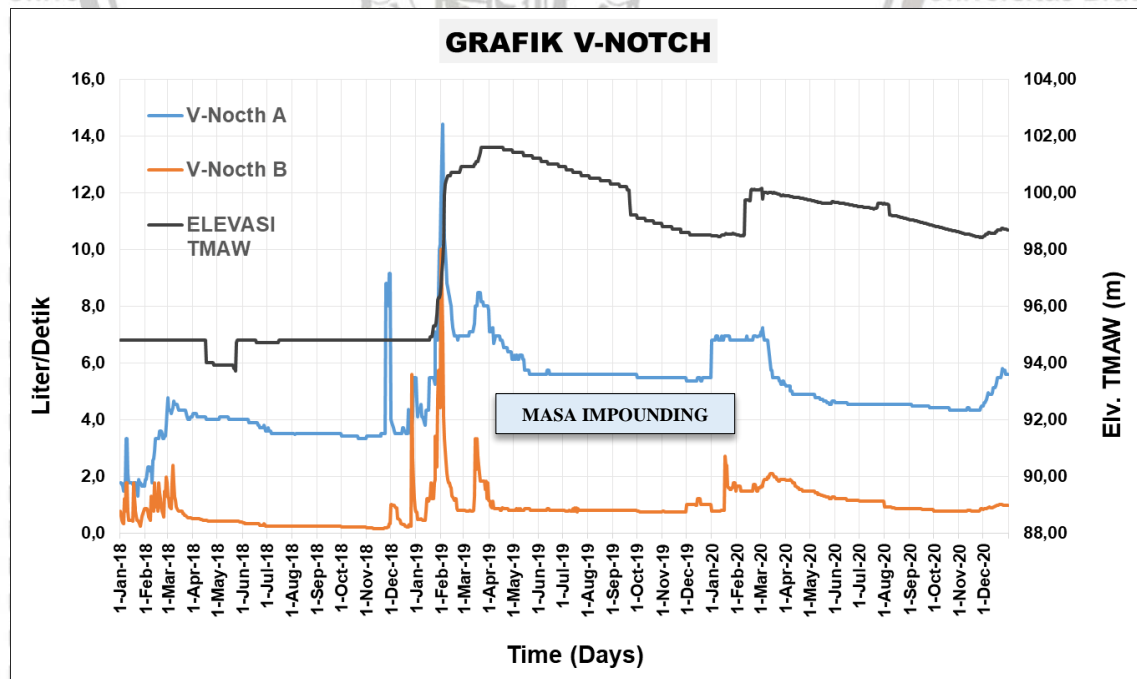
#### 4.1.2. Data Instrumen V-Notch

Instrumen *V-Notch* dipasang di alur sungai pada kaki timbunan bagian hilir, instrumen *V-Notch* yang dipakai pada Bendungan Raknamo adalah *V-Notch triangular*. Instrumen tersebut dipakai untuk dapat mengetahui debit rembesan yang keluar melalui timbunan maupun pondasi dari Bendungan Raknamo. Penempatan dan tipe *V-Notch* dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Penempatan Instrumen *V-Notch* Pada Bagian Hilir Kaki Timbunan

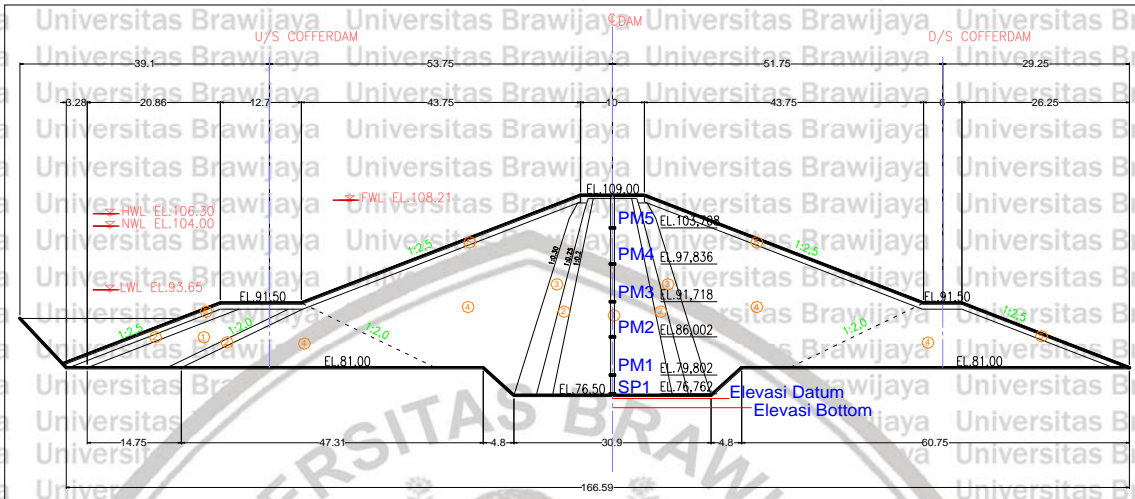
Instrumen *V-Notch* yang diperoleh adalah bacaan *V-Notch* dari tahun Januari 2018 – Desember 2020. Hasil bacaan instrumen ini menunjukkan berapa besar debit yang terjadi, peristiwa debit rembesan yang terjadi dari selama 2 tahun dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Bacaan Instrumen *V-Notch* pada Hilir Bendungan

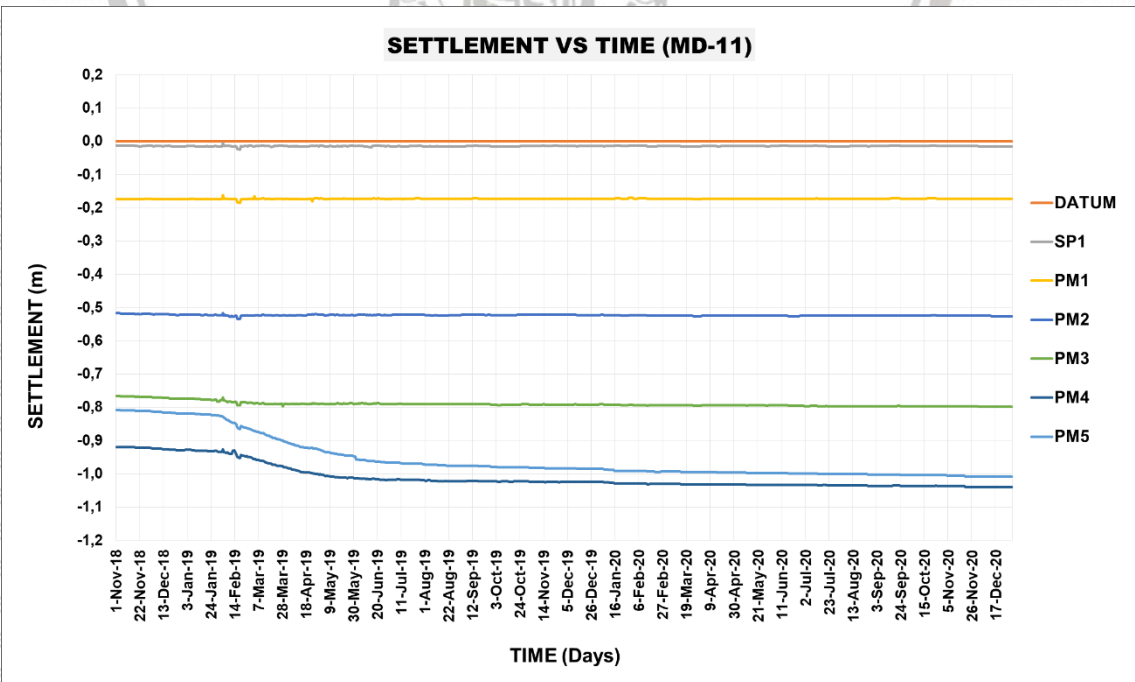
### 4.1.3. Data Instrumen *Multilayer – Settlement* (MS)

Instrumen *multilayer – settlement* yang dipasang pada timbunan inti bendungan, instrumen ini terletak pada posisi MD.11 (STA 0+320) dengan jumlah pantauan alat instrumen sebanyak 6 unit (SP1, PM1-PM5), penampang instrumen dapat dilihat pada Gambar 4.15. di bawah ini.



Gambar 4.15. Potongan Melintang Instrumentasi *Multilayer Settlement* MD.11 (STA 0+320)

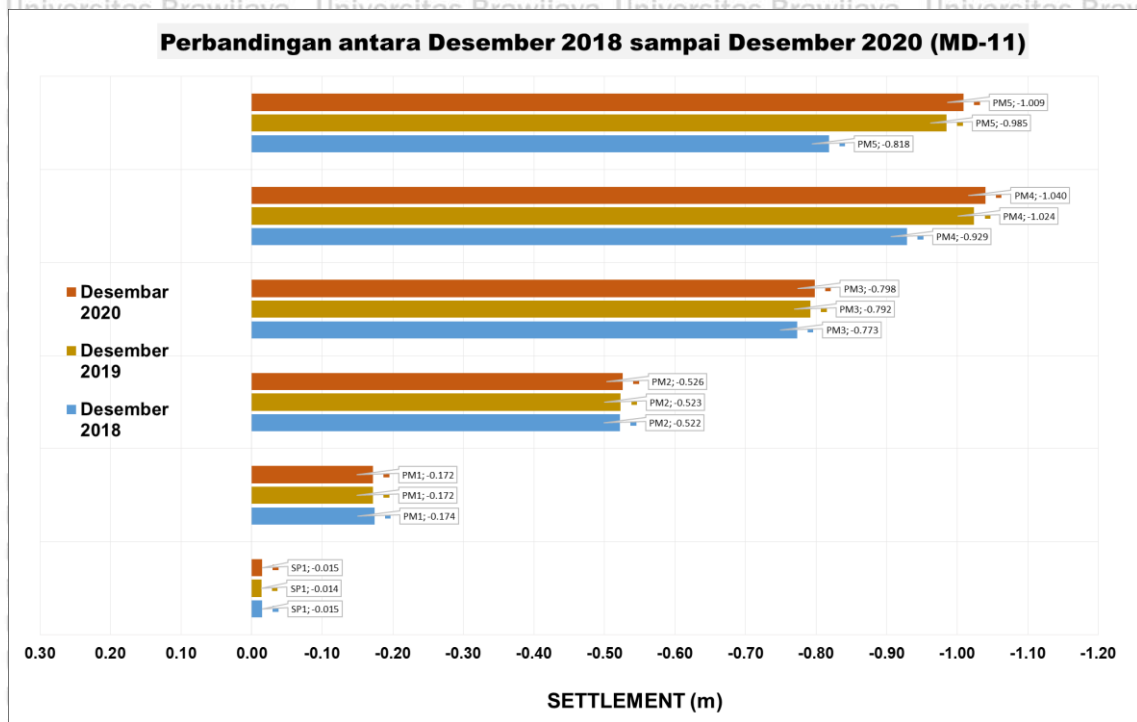
Hasil bacaan instrumen *multilayer – settlement* pada posisi MD.11 (STA 0+320) digambarkan dalam bentuk grafik penurunan untuk masing-masing alat instrumen, grafik penurunan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.16. di bawah ini.



Gambar 4.16. Bacaan *Multilayer Settlement* Pada Posisi MD.11 (STA 0+320)

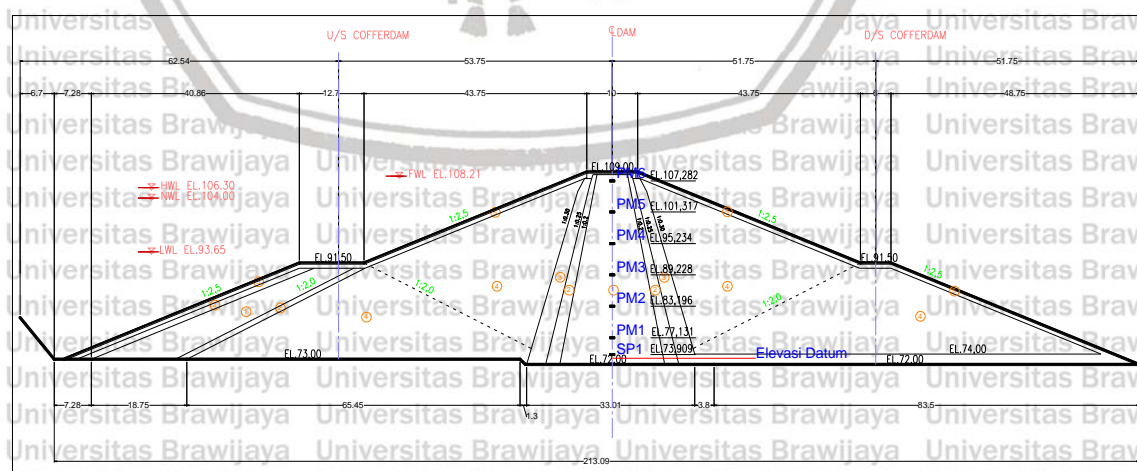


Hasil penurunan dari tahun 2018 sampai tahun 2020 yang terjadi pada instrumen *multilayer – settlement* MD.11 (STA 0+320) digambarkan dalam bentuk grafik perbandingan penurunan untuk tiap tahunnya, grafik perbandingan penurunan tiap tahunnya dapat dilihat pada Gambar 4.17. di bawah ini.



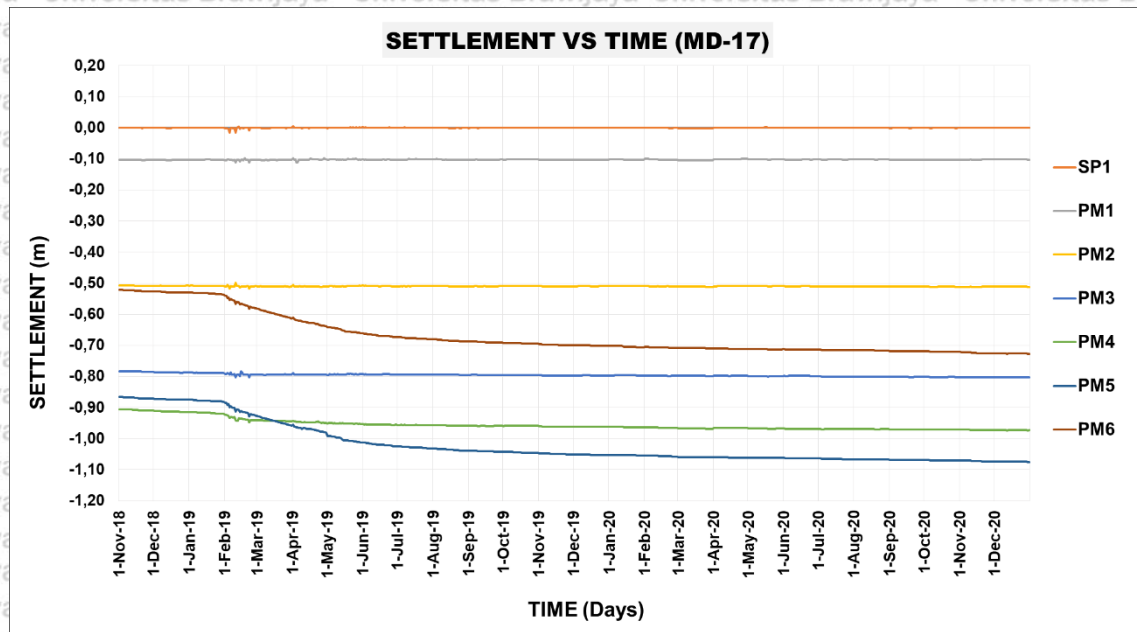
Gambar 4.17. Profil Perubahan Pergerakan Vertikal Tahun 2016-2020 (MD.11)

Instrumen *multilayer – settlement* yang terletak pada posisi MD.17 (STA 0+443,4) dengan jumlah pantauan alat instrumen sebanyak 7 unit (SP1, PM1-PM6), penampang instrumen dapat dilihat pada Gambar 4.18. di bawah ini.



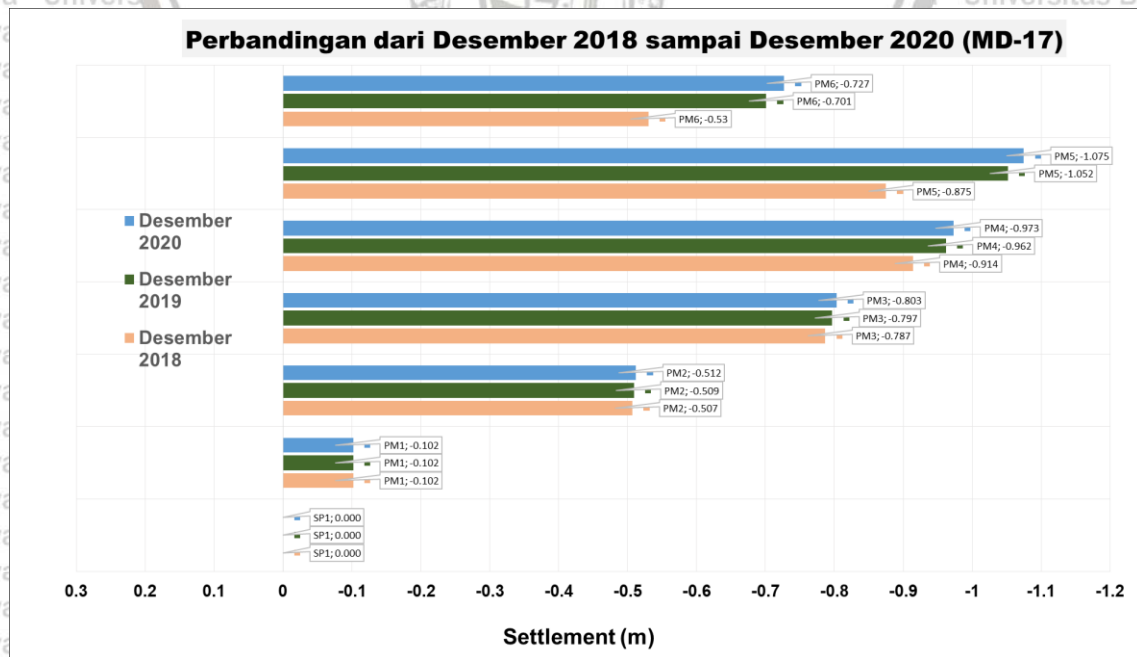
Gambar 4.18. Potongan Melintang Instrumentasi *Multilayer Settlement* MD.17 (STA 0+443,4)

Hasil bacaan instrumen *multilayer – settlement* pada posisi MD.17 (STA 0+443,4) digambarkan dalam bentuk grafik penurunan untuk masing-masing alat instrument, grafik penurunan tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.19. di bawah ini.



Gambar 4.19. Bacaan *Multilayer Settlement* Pada Posisi MD.17 (STA 0+443,4)

Hasil penurunan dari tahun 2018 sampai tahun 2020 yang terjadi pada instrumen *multilayer – settlement* MD.17 (STA 0+443,4) digambarkan dalam bentuk grafik perbandingan penurunan untuk tiap tahunnya, grafik perbandingan penurunan tiap tahunnya dapat dilihat pada Gambar 4.20. di bawah ini.



Gambar 4.20. Profil Perubahan Pergerakan Vertikal Tahun 2016-2020 (MD.17)



#### 4.2. Data Material Timbunan

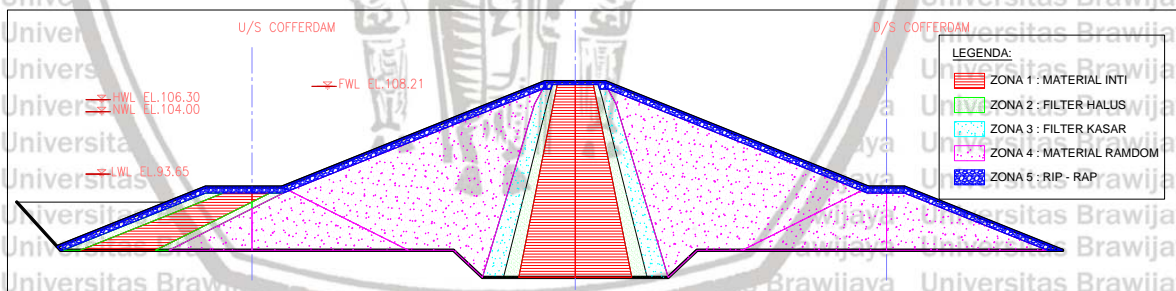
Material timbunan yang dipakai pada Bendungan Raknamo terdiri dari 5 zona timbunan yaitu; zona 1 (inti), zona 2 (filter halus), zona 3 (filter kasar), zona 4 (random), zona 5 (rip-rap), pembagian zona timbunan MD-10, MD-11 dan MD.16, MD-17 dapat dilihat pada Gambar 4.21 dan Gambar 4.22 dibawah ini.

Material timbunan untuk setiap zona timbunan ini diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium oleh PT. Indra Karya. Parameter untuk masing-masing zona timbunan dapat di lihat pada Tabel 4.1.

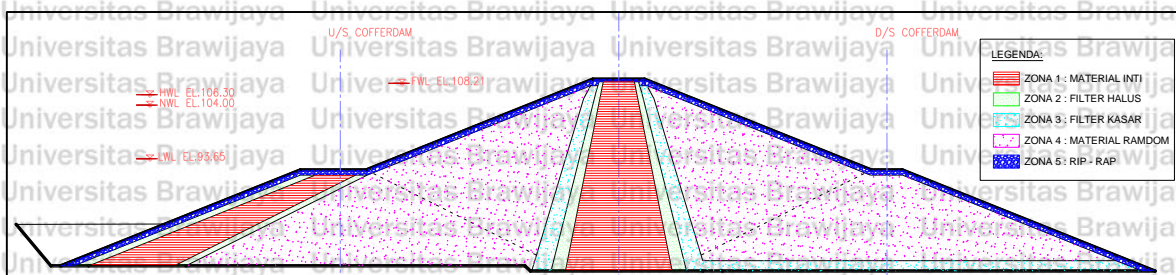
Tabel 4.1. Parameter Material Timbunan Bendungan Raknamo

Hasil Pengujian Laboratorium	Satuan	Material Inti	Filter Halus	Filter Kasar	Material Random	Rip - rap
		Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Spesific Gravity (GS)	-	2.67	2.73	2.77	2.75	2.76
Berat Tanah Jenuh Air ( $\gamma_{sat}$ )	t/m <sup>3</sup>	1.85	1.95	1.90	2.15	1.95
Berat Tanah Basah ( $\gamma_{wet}$ )	t/m <sup>3</sup>	1.54	1.65	1.55	1.99	1.65
Berat Tanah Kering ( $\gamma_{dry}$ )	t/m <sup>3</sup>	1.36	1.54	1.42	1.81	1.25
Kohesi (c)	t/m <sup>2</sup>	0.36	0.03	0.00	1.54	0.00
Sudut Geser ( $\phi$ )	°	17.47	30.00	27.00	35.00	36.00
Modulus Young (E)	kPa	1,000	17,000	45,000	125,000	135,000
Poisson's Ratio ( $\nu$ )		0.25	0.32	0.30	0.27	0.25
Permeability (K)	m/dt	1.19.E-07	8.00.E-06	1.83.E-04	5.28.E-05	8.00.E-01
Volume Water Content (WC)		0.2688	0.3271	0.3654	0.4112	0.4763
Coffisiend of volume compressibility (mv)	cm <sup>2</sup> /gr	2.27.E-05	2.04.E-04	1.84.E-04	1.25.E-04	1.25.E-04

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)



Gambar 4.21. Zona Timbunan Material Pada MD-10, MD-11



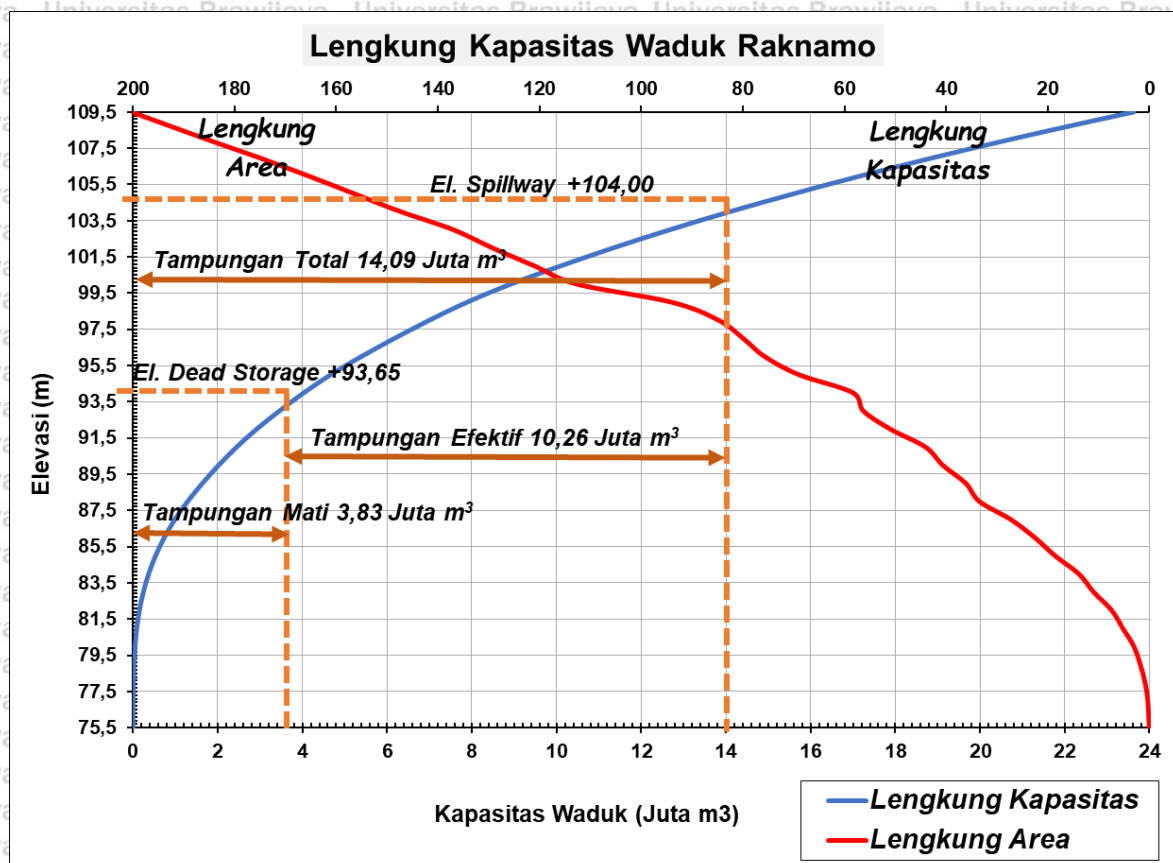
Gambar 4.22. Zona Timbunan Material Pada MD-16, MD-17

### 4.3. Data Simulasi Waduk

Dalam melakukan simulasi pola operasi waduk perlu diketahui beberapa data sebagai inputan antara lain; data lengkung kapasitas waduk, data teknis bendungan, debit *inflow*, dan debit *outflow*.

#### 4.3.1. Data Lengkung Kapasitas Waduk

Data lengkung kapasitas waduk yang ada ini diperoleh dari hasil pengukuran topografi yang dilakukan sebelum dibangunnya bendungan Raknamo. Data lengkung kapasitas bendungan Raknamo dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23. Lengkung Kasitas Waduk Raknamo

#### 4.3.2. Data Debit *Inflow*

Data debit *inflow* yang diambil dari Laporan Akhir Sertifikasi Bendungan Raknamo, dimana data debit ini dibutuhkan untuk keperluan simulasi waduk Raknamo. Data debit *inflow* yang didapat adalah data debit 15 hari selama 41 Tahun (1973-2013). Data debit *inflow* dapat dilihat pada tabel 4.2.



Tabel 4.2. Data Debit *Inflow* (15 Harian) Bendungan Raknamo

Data Debit Inflow (15 Harian) - Bendungan Raknamo (m <sup>3</sup> /dt)																									
No	Tahun	Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct		Nov		Dec	
		15	16	15	14	15	16	15	15	15	16	15	15	15	16	15	16	15	15	15	16	15	15	15	16
1	1973	3,56	3,80	0,10	0,09	0,29	0,31	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,25	
2	1974	1,12	1,20	1,50	1,40	1,39	1,49	1,05	1,05	0,31	0,33	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,21	0,21	0,32	0,34
3	1975	0,32	0,34	0,87	0,81	0,51	0,54	0,24	0,24	0,09	0,09	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09	0,09	0,56	0,56	0,77	0,82
4	1976	1,30	1,39	1,52	1,42	1,42	1,52	0,62	0,62	0,18	0,19	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,52	0,56
5	1977	0,78	0,84	1,12	1,04	1,00	1,06	0,32	0,32	0,11	0,12	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,19	0,20
6	1978	0,77	0,82	1,59	1,48	0,80	0,85	0,42	0,42	0,53	0,57	0,22	0,22	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,49	0,52
7	1979	0,93	0,99	0,93	0,87	0,72	0,77	0,18	0,18	0,27	0,29	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
8	1980	0,67	0,72	2,96	2,76	1,21	1,30	0,62	0,62	0,18	0,19	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,27	0,27	0,53	0,56
9	1981	1,52	1,62	1,37	1,28	0,64	0,68	0,25	0,25	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06	0,72	0,77
10	1982	1,51	1,61	1,74	1,62	0,97	1,03	0,38	0,38	0,12	0,13	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
11	1983	0,23	0,25	0,53	0,49	0,58	0,62	0,90	0,90	0,30	0,32	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,09	0,09	0,02	0,02
12	1984	0,22	0,24	0,62	0,58	0,76	0,81	0,20	0,20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,60	0,64
13	1985	0,39	0,41	0,53	0,50	0,28	0,30	0,14	0,14	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,12
14	1986	1,84	1,96	1,94	1,81	0,97	1,03	0,47	0,47	0,14	0,15	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
15	1987	0,89	0,95	1,12	1,05	0,52	0,55	0,14	0,14	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,18	0,18	0,98	1,04
16	1988	0,73	0,78	1,14	1,07	1,06	1,13	0,31	0,31	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,63	0,63	0,15	0,16
17	1989	0,39	0,42	0,83	0,77	1,94	2,07	0,78	0,78	0,24	0,26	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
18	1990	0,12	0,13	0,55	0,51	0,08	0,09	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,45	0,85	0,91
19	1991	0,29	0,31	0,50	0,47	0,53	0,57	0,61	0,61	0,16	0,17	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,34	0,34	0,04	0,04
20	1992	0,61	0,65	1,10	1,03	0,90	0,96	0,38	0,38	0,16	0,17	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,11	0,11	0,33	0,35
21	1993	1,18	1,26	1,13	1,05	0,60	0,64	0,20	0,20	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
22	1994	0,42	0,44	1,34	1,25	0,92	0,98	0,48	0,48	0,12	0,13	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,20	0,21
23	1995	1,15	1,23	1,20	1,12	1,88	2,01	1,29	1,29	0,45	0,48	0,14	0,14	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,32	0,34
24	1996	0,68	0,72	1,20	1,12	0,68	0,72	0,22	0,22	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,91	0,97
25	1997	0,78	0,83	1,82	1,70	1,08	1,16	0,33	0,33	0,06	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,43	0,46
26	1998	0,78	0,84	0,83	0,78	0,48	0,51	0,18	0,18	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,19	0,20
27	1999	1,22	1,31	2,09	1,95	1,69	1,81	0,89	0,89	0,28	0,30	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,09	0,09	0,13	0,14
28	2000	1,06	1,13	1,35	1,26	1,02	1,09	0,86	0,86	0,76	0,81	0,28	0,28	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,18	0,18	0,17	0,18
29	2001	0,66	0,70	0,59	0,55	0,26	0,27	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,37	0,37	0,84	0,90
30	2002	0,83	0,88	1,59	1,49	0,72	0,77	0,25	0,25	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03
31	2003	0,24	0,26	0,78	0,73	0,79	0,85	0,26	0,26	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1,58	1,69
32	2004	0,90	0,97	1,95	1,82	1,59	1,70	0,62	0,62	0,29	0,31	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
33	2005	0,20	0,21	0,28	0,26	0,44	0,47	0,18	0,18	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,27	0,29
34	2006	1,22	1,30	1,41	1,32	1,21	1,29	0,70	0,70	0,28	0,30	0,08	0,08	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,17	0,19
35	2007	0,41	0,44	0,62	0,58	0,40	0,42	0,19	0,19	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,52	0,56
36	2008	1,04	1,11	2,68	2,50	1,49	1,59	0,60	0,60	0,17	0,18	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,10	0,10	0,36	0,38
37	2009	0,72	0,77	1,27	1,19	0,48	0,51	0,10	0,10	0,05	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,09	0,09
38	2010	0,69	0,73	0,60	0,56	0,31	0,33	0,32	0,32	0,32	0,34	0,09	0,09	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,33	0,36
39	2011	1,16	1,24	1,42	1,32	0,81	0,86	1,09	1,09	0,42	0,45	0,10	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,56	0,59
40	2012	0,88	0,94	1,32	1,23	1,24	1,32	0,64	0,64	0,27	0,29	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,59	0,62
41	2013	1,58	1,68	2,02	1,89	1,38	1,47	0,61	0,61	0,34	0,36	0,35	0,35	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,36	0,39

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)

#### 4.3.3. Data Debit *Outflow*

Data debit *outflow* yang digunakan disini adalah kebutuhan air untuk irigasi dan juga kebutuhan air baku, serta ada faktor lain yang menyebabkan debit *outflow* ini terjadi yaitu evaporasi (penguapan). Kebutuhan air irigasi yang akan dialiri untuk mencukupi penggunaan air dilahan pertanian sebesar 841 ha dimana pola tata tanam adalah Padi-Polowijo-Polowijo dapat dilihat pada Tabel 4.3. Sedangkan untuk memenuhi kebutuhan air



baku yang dibutuhkan sebesar 100,00 l/dt ini dapat dilihat pada Tabel 4.4. Evaporasi yang terjadi pada waduk raknamo dapat dilihat Tabel 4.5.

Tabel 4.3. Kebutuhan Air Irigasi

Bulan	Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct		Nov		Dec	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Air Irigasi (l/dt/ha)	0,94	0,81	0,51	0,39	0,73	0,7	0,96	0,36	0,36	0,45	0,63	0,68	0,76	0,76	0	0	0,42	0,46	0,59	0,73	0,72	0,75	0,83	1,35

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)

Tabel 4.4. Kebutuhan Air Baku

No	Uraian	Persentasi	Penduduk			Satuan
			Raknamo	Manusak	Naibonat	
1	Kebutuhan Air:					
	a. Sambungan Rumah		63,08	63,08	94,62	l/hr/org
	b. Keran Umum		30,00	30,00	30,00	l/hr/org
2	Rasio Layanan					
	a. Sambungan Rumah		0,80	0,80	0,80	
	b. Keran Umum		0,20	0,20	0,20	
3	Kebutuhan Air Domestik		56,46	56,46	81,69	l/hr/org
4	Kebutuhan Air Non Domestik	5%	59,28	59,28	85,78	l/hr/org
5	Jumlah Penduduk		7.700	7.063	29.739	orang
6	Kebutuhan Air Rata-rata		456.492	418.727	2.550.920	l/hr
			5,28	4,85	29,52	l/dt
7	Kehilangan Air	20%	6,34	5,82	35,43	l/dt
8	Debit Masimum	115%	7,29	6,69	40,74	
9	Debit Puncak	125%	8,88	8,14	49,60	
<b>Kebutuhan Air Untuk Peternakan</b>						
10	Kebutuhan Air Rata-rata		3,39	3,37	4,65	l/dt
11	Kehilangan Air	20%	4,07	4,05	5,58	l/dt
Jumlah Kebutuhan Air						80,3 l/dt
Kebutuhan Air Kawasan Pemerintahan & Industri di Naibonat =						19,7 l/dt
Total Kebutuhan Air						100,00 l/dt

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)

Tabel 4.5. Data Evaporasi (ETo)

Bulan	Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct		Nov		Dec	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Hari	15	16	15	14	15	16	15	15	15	16	15	15	15	16	15	16	15	15	15	16	15	15	15	16
ETo (mm/hr)	2,67	2,67	3,25	3,25	3,87	3,87	5,07	5,07	3,7	3,7	4,17	4,17	4,45	4,45	4,45	4,45	4,72	4,72	4,83	4,83	4,57	4,57	3,74	3,74

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)



#### 4.4. Analisis Numeric

Analisis *numeric* yang dilakukan pada studi ini menggunakan aplikasi “Geostudio 2012”, dimana aplikasi ini dapat membantu dalam menganalisa tekanan air pori dan rembesan yang terjadi menggunakan *tools* “SEEP/W”. Sedangkan untuk menganalisa *settlement* yang terjadi pada timbunan inti bendungan dapat digunakan *tools* “SIGMA/W”.

Proses yang dilakukan untuk menganalisa tekanan air pori dan rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan harus terlebih dahulu dilakukan penginputan data. Data inputan untuk menjalankan analisis SEEP/W dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Data Inputan SEEP/W

Zona Timbunan	Jenis Material	Vol. WC	mv (cm <sup>2</sup> /gr)	mv kPa	K (m/dt)
1	Material Inti	0,2688	2,27,E-05	2,23,E-06	1,19,E-07
2	Filter Halus	0,3271	2,04,E-04	2,00,E-05	8,00,E-06
3	Filter Kasar	0,3654	1,84,E-04	1,80,E-05	1,83,E-04
4	Material Random	0,4112	1,25,E-04	1,23,E-05	5,28,E-05
5	Rip - rap	0,4763	1,25,E-04	1,23,E-05	8,00,E-01

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)

Pada analisis SEEP/W juga diperlukan inputan “*Boundary Conditions*” dimana perlu diketahui tinggi muka air yang terjadi pada waduk saat masa impounding berlangsung (awal tahun 2018 – akhir tahun 2020). Data elevasi muka air waduk ini sangat penting untuk dapat diketahui besar nilai tekanan air pori dan rembesan yang akan terjadi pada saat analisis SEEP/W ini dilakukan, data elevasi muka air waduk dapat dilihat pada Tabel 4.7.

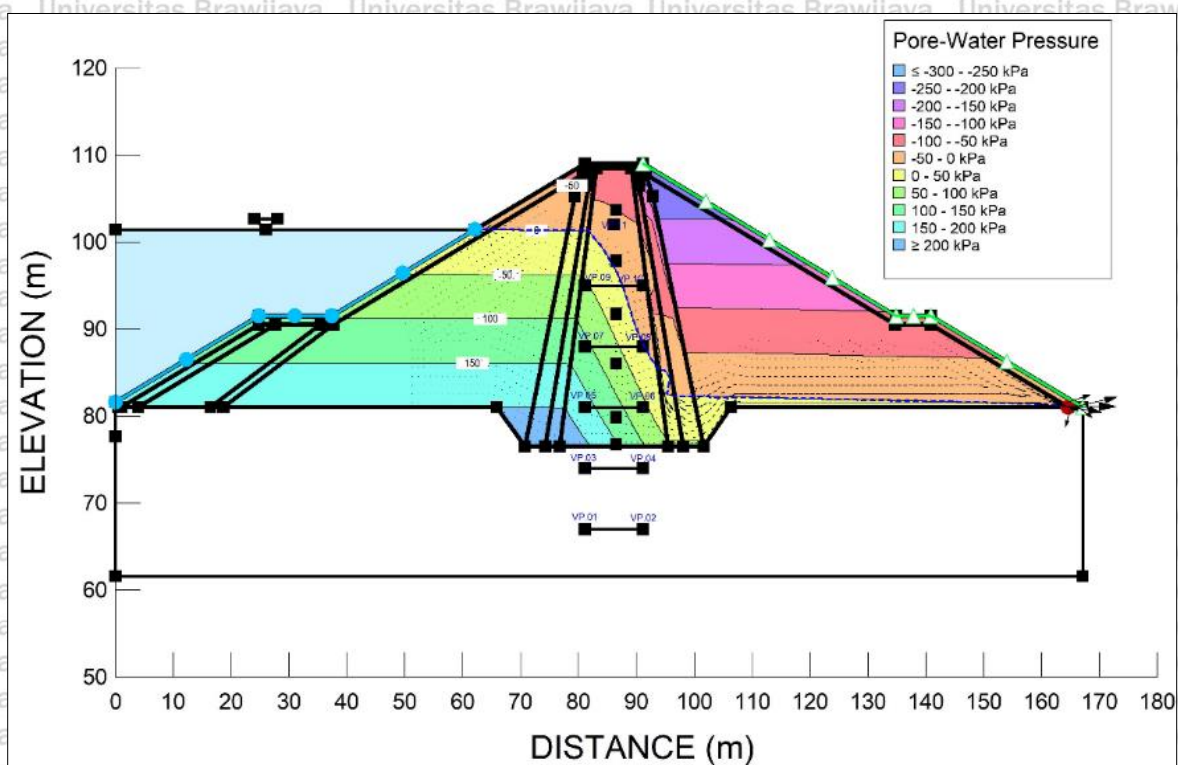
Tabel 4.7. Elevasi Muka Air Waduk Bendungan Raknamo

No	Code	Day	El. Mukas AIR	Selisih
1	A	31-Jan-18	87,500	
2	B	28-Feb-18	93,650	6,150
3	C	30-Apr-18	94,950	1,300
4	D	31-Jan-19	96,400	1,450
5	E	30-Apr-19	101,400	5,000
6	F	30-Sep-19	99,200	-2,200
7	G	31-Dec-19	98,500	-0,700
8	H	29-Feb-20	100,119	1,619
9	I	30-Apr-20	99,735	-0,384
10	J	30-Sep-20	98,834	-0,901
11	K	31-Dec-20	98,690	-0,144

Sumber: Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo (2014)

#### 4.4.1. Analisis *Numeric* Tekanan Air Pori MD.10 (STA 0+300)

Analisis *numeric* ini dilakukan berdasarkan perubahan ketinggian muka air waduk yang terjadi dari tahun 2018 sampai tahun 2020 (dapat dilihat pada tabel 4.7). Perubahan muka air waduk ini sangat berpengaruh terhadap nilai tekanan air pori yang terjadi pada bendungan. Berdasarkan hasil analisis *numeric* yang telah dilakukan dengan periode 2 tahun terakhir (2018-2020), maka nilai tekanan air pori yang paling tinggi untuk penampang MD.10 (STA 0+300) terjadi pada tanggal 30 April 2019 dapat dilihat pada gambar 4.24.



Gambar 4.24. *Pore Water Pressure* MD.10 (30 Apr 2019)

Pada gambar 4.24. dapat diketahui nilai tekanan air pori yang terjadi pada setiap instrumen *piezometer* (VP.05 – VP.11) saat ketinggian air berada di elevasi 101,40 m, nilai tekanan air pori dapat diketahui dari perbedaan warna yang ditunjukkan pada gambar 4.24. Nilai tekanan air pori di bawah garis freatik menunjukkan nilai positif yang dimana menunjukkan adanya tekanan air pori sedangkan untuk nilai tekanan air pori di atas garis freatik menunjukkan nilai negatif yang dimana menunjukkan tidak adanya tekanan air pori. Nilai Tekanan air pori untuk setiap perubahan muka air waduk dapat dilihat pada tabel 4.8 di bawah ini.



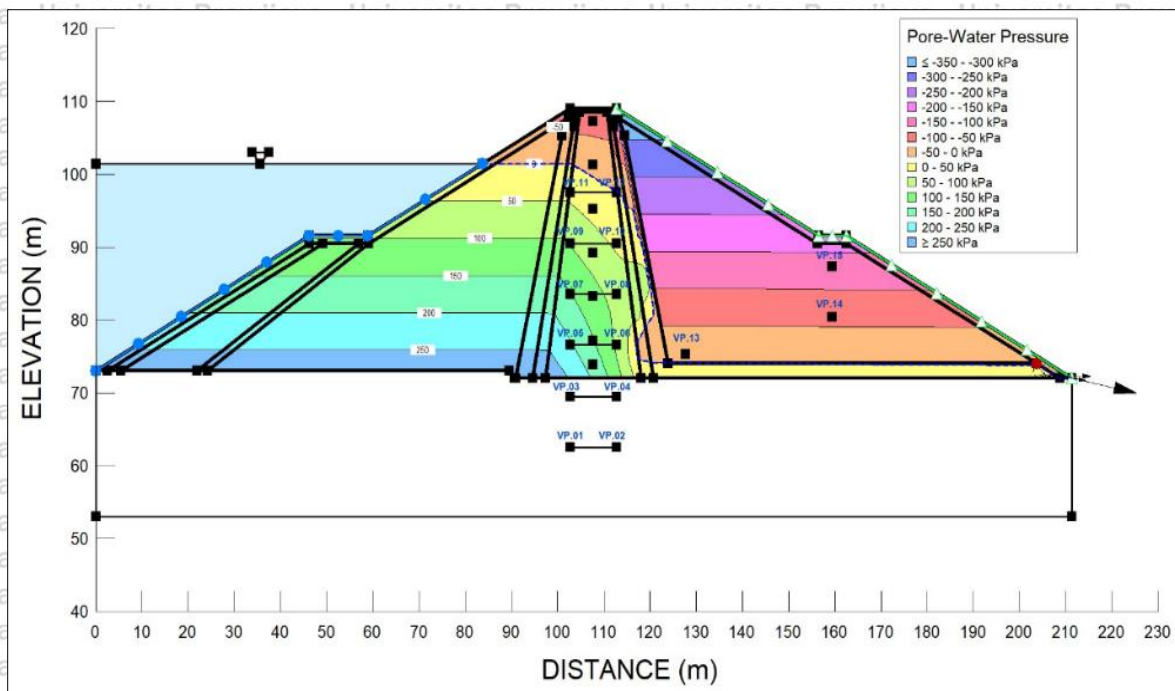
Tabel 4.8. Hasil Analisis Tekanan Air Pori Pada SEEP/W - MD.10 (STA 0+300)

Code	Elv. Muka Air (m)	Date (day)	Pore Water Pressure (PWP) - SEEP/W (kPa)						
			VP.05	VP.06	VP.07	VP.08	VP.09	VP.10	VP.11
A	87,500	31-Jan-18	43,43	16,88	-23,95	-44,12	-97,63	-106,01	-170,33
B	93,650	28-Feb-18	105,48	41,39	44,60	-1,91	-20,43	-49,73	-102,93
C	94,950	30-Apr-18	116,23	45,12	56,27	4,26	-5,12	-39,78	-75,22
D	96,400	31-Jan-19	128,14	49,08	69,18	9,68	9,74	-28,99	-75,22
E	101,400	30-Apr-19	166,83	60,62	109,95	3,03	55,91	-30,53	-33,63
F	99,200	30-Sep-19	150,98	55,43	94,26	21,28	36,99	-4,30	-44,75
G	98,500	31-Dec-19	145,94	55,86	88,49	23,42	30,29	-9,87	-52,38
H	100,119	29-Feb-20	159,43	61,84	102,62	30,25	45,54	-6,72	-37,62
I	99,735	30-Apr-20	156,15	58,59	99,79	30,58	42,41	3,37	-38,30
J	98,834	30-Sep-20	147,70	54,05	90,66	16,69	33,30	-9,29	-49,48
K	98,690	31-Dec-20	146,02	53,00	88,74	9,91	31,62	-14,29	-52,72

Sumber: Hasil Analisis SEEP/W (2021)

#### 4.4.2. Analisis Numeric Tekanan Air Pori MD.16 (STA 0+420)

Analisis *numeric* ini dilakukan berdasarkan perubahan ketinggian muka air waduk yang terjadi dari tahun 2018 sampai tahun 2020 (dapat dilihat pada tabel 4.7). Perubahan muka air waduk ini sangat berpengaruh terhadap nilai tekanan air pori yang terjadi pada bendungan. Berdasarkan hasil analisis *numeric* yang telah dilakukan dengan periode 2 tahun terakhir (2018-2020), maka nilai tekanan air pori yang terjadi pada penampang MD.16 (STA 0+420) terjadi pada tanggal 30 April 2019 dapat dilihat pada gambar 4.25.



Gambar 4.25. Pore Water Pressure MD.16 (30 Apr 2019)

Pada gambar 4.25. dapat diketahui nilai tekanan air pori yang terjadi pada setiap instrumen piezometer (VP.05 – VP.15) saat ketinggian air berada di elevasi 101,40 m, nilai tekanan air pori dapat diketahui dari perbedaan warna yang ditunjukkan pada gambar 4.25.

Nilai tekanan air pori di bawah garis freatik menunjukkan nilai positif yang dimana menunjukkan adanya tekanan air pori sedangkan untuk nilai tekanan air pori di atas garis freatik menunjukkan nilai negatif yang dimana menunjukkan tidak adanya tekanan air pori.

Nilai Tekanan air pori untuk setiap perubahan muka air waduk dapat dilihat pada tabel 4.9 di bawah ini.

Tabel 4.9. Hasil Analisis Tekanan Air Pori Pada SEEP/W - MD.16 (STA 0+420)

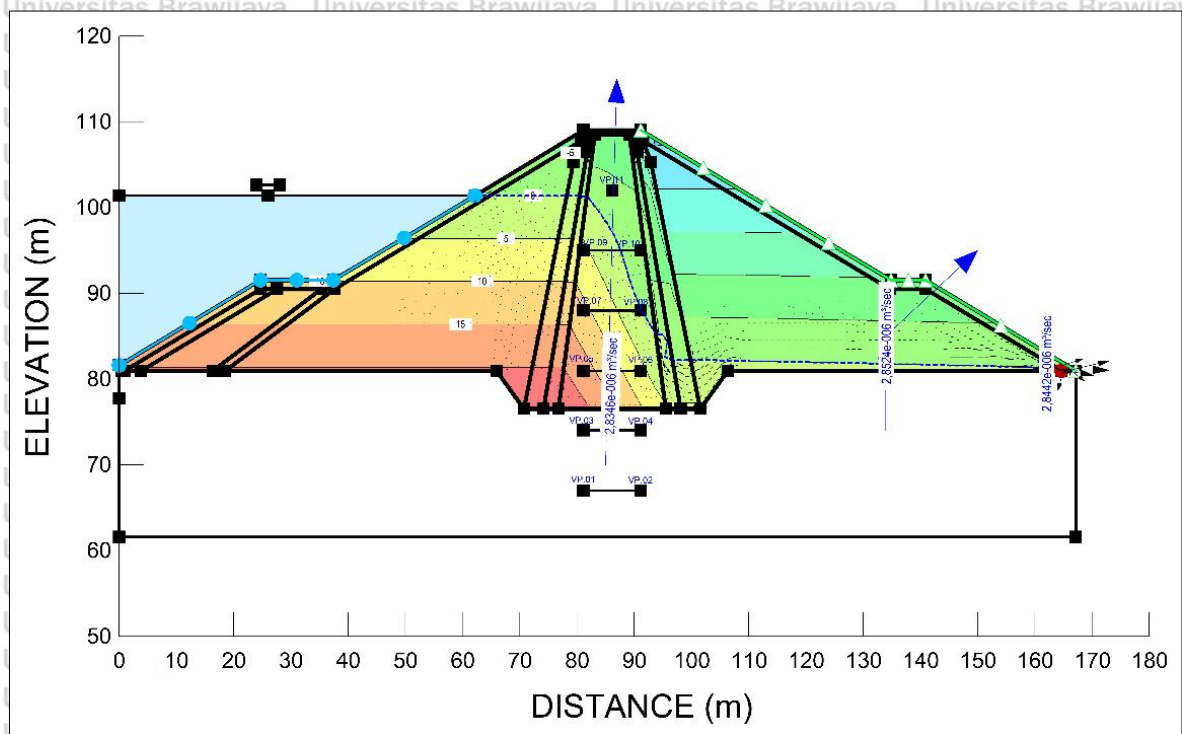
Code	Elv. Muka Air (m)	Date (day)	Pore Water Pressure (PWP) - SEEP/W (kPa)										
			VP.05	VP.06	VP.07	VP.08	VP.09	VP.10	VP.11	VP.12	VP.13	VP.14	VP.15
A	87,500	31-Jan-18	78,43	28,80	15,77	-21,61	-53,44	-76,41	-128,86	-136,35	-14,68	-64,15	-132,79
B	93,650	28-Feb-18	135,24	47,53	77,08	-0,82	20,35	-33,17	-53,57	-78,29	-12,98	-63,12	-131,77
C	94,950	30-Apr-18	150,38	61,42	93,47	37,12	35,82	-1,13	-32,46	-52,59	-13,32	-63,33	-131,97
D	96,400	31-Jan-19	157,31	59,69	99,62	4,95	44,71	-29,46	-19,30	-61,29	-12,10	-62,58	-131,22
E	101,400	30-Apr-19	205,88	92,97	151,99	85,53	96,84	40,82	36,98	2,04	-12,20	-62,64	-131,28
F	99,200	30-Sep-19	177,90	55,85	124,42	16,64	73,06	15,18	15,14	-21,04	-11,68	-62,33	-130,97
G	98,500	31-Dec-19	172,74	54,68	118,83	17,62	66,67	11,10	8,20	-27,69	-11,88	-62,45	-131,09
H	100,119	29-Feb-20	194,92	87,20	140,30	76,17	84,62	29,54	24,42	-8,41	-12,41	-62,77	-131,41
I	99,735	30-Apr-20	180,98	55,69	127,45	8,04	77,04	10,98	20,27	-19,45	-11,32	-62,11	-130,75
J	98,834	30-Sep-20	182,93	76,14	128,63	62,95	73,29	35,06	11,98	-12,95	-12,74	-62,97	-131,62
K	98,690	31-Dec-20	175,28	68,03	117,91	11,65	64,15	-40,97	9,25	-53,36	-11,13	-61,99	-130,63

Sumber: Hasil Analisis SEEP/W (2021)



#### 4.4.3. Analisis Numeric Debit Rembesan (*Flux*) MD.10 (STA 0+300)

Tekanan air pori yang terjadi pada bendungan berdasarkan hasil analisis *numeric* SEEP/W yang telah dilakukan dengan periode 2 tahun terakhir (2018-2020), kemudian dari hasil tekanan air pori yang terjadi akan dapat diketahui juga nilai rembesan (*flux*) yang terjadi pada lokasi MD.10 (STA 0+300) dapat dilihat pada gambar 4.26.



Gambar 4.26. Rembesan (*Flux*) MD.10 (30 Apr 2019)

Pada gambar 4.26. dapat diketahui nilai rembesan yang terjadi pada penampang MD.10 saat ketinggian air berada di elevasi 101,40 m, nilai rembesan dapat diketahui dari hasil analisis *flux* yang ditunjukkan pada gambar 4.26. Nilai rembesan pada penampang tersebut menggunakan hasil analisis *flux* yang berada pada kaki bagian hilir bendungan. Nilai rembesan yang terjadi selama periode 2 tahun dapat dilihat pada tabel 4.10 di bawah ini.

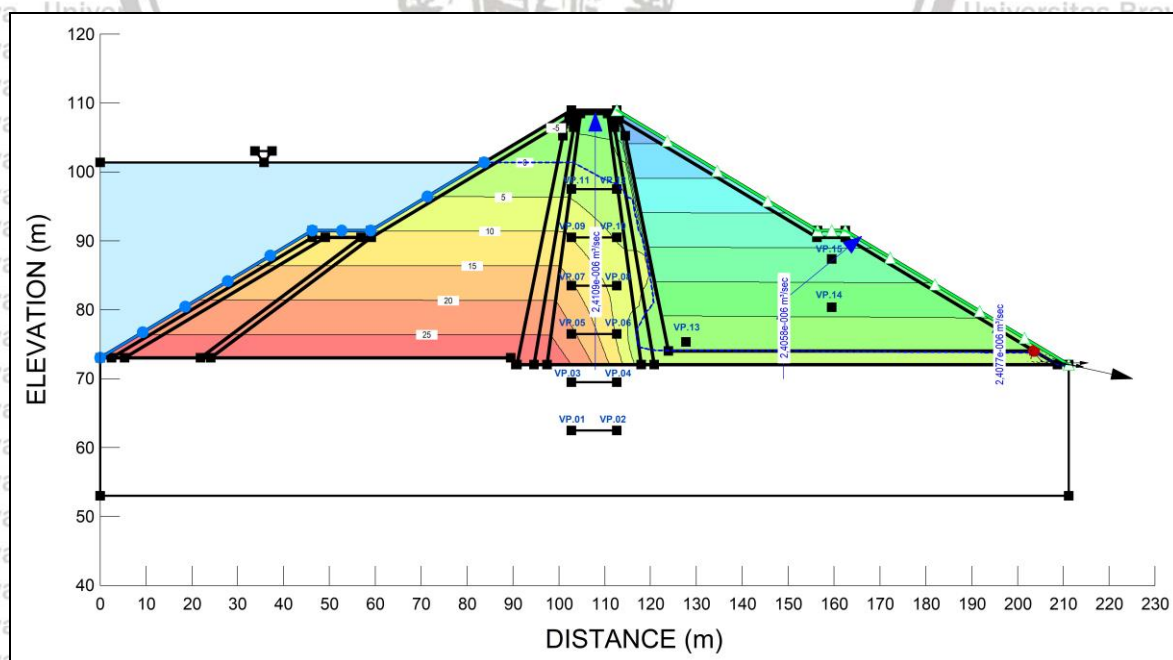
Tabel 4.10. Hasil Analisis Rembesan Pada SEEP/W - MD.10 (STA 0+300)

Tanggal	Code	Tinggi	Debit	Panjang	Debit
		Muka Air (m)	Numeric (m <sup>3</sup> /dtk/m)	Pondasi (m)	Numeric (m <sup>3</sup> /dtk)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=(4)*(5)
31-Jan-18	A	87,500	3,0758,E-07	540	0,00017
28-Feb-18	B	93,650	1,0747,E-06	540	0,00058
30-Apr-18	C	94,950	1,2562,E-06	540	0,00068
31-Jan-19	D	96,400	1,4794,E-06	540	0,00080
30-Apr-19	E	101,400	2,8442,E-06	540	0,00154
30-Sep-19	F	99,200	1,9024,E-06	540	0,00103
31-Dec-19	G	98,500	1,8643,E-06	540	0,00101
29-Feb-20	H	100,119	2,0632,E-06	540	0,00111
30-Apr-20	I	99,735	1,8921,E-06	540	0,00102
30-Sep-20	J	98,834	1,8893,E-06	540	0,00102
31-Dec-20	K	98,690	1,8902,E-06	540	0,00102

Sumber: Hasil Analisis SEEP/W (2021)

#### 4.4.4. Analisis Numeric Debit Rembesan (*Flux*) MD.16 (STA 0+420)

Tekanan air pori yang terjadi pada bendungan berdasarkan hasil analisis *numeric* SEEP/W yang telah dilakukan dengan periode 2 tahun terakhir (2018-2020), kemudian dari hasil tekanan air pori yang terjadi akan dapat diketahui juga nilai rembesan (*flux*) yang terjadi pada lokasi MD.16 (STA 0+420) dapat dilihat pada gambar 4.27.



Gambar 4.27. Rembesan (*Flux*) MD.16 (30 Apr 2019)



Pada gambar 4.27. dapat diketahui nilai rembesan yang terjadi pada penampang MD.16 saat ketinggian air berada di elevasi 101,40 m, nilai rembesan dapat diketahui dari hasil analisis *flux* yang ditunjukkan pada gambar 4.27. Nilai rembesan pada penampang tersebut menggunakan hasil analisis *flux* yang berada pada kaki bagian hilir bendungan. Nilai rembesan yang terjadi selama periode 2 tahun dapat dilihat pada tabel 4.11 di bawah ini.

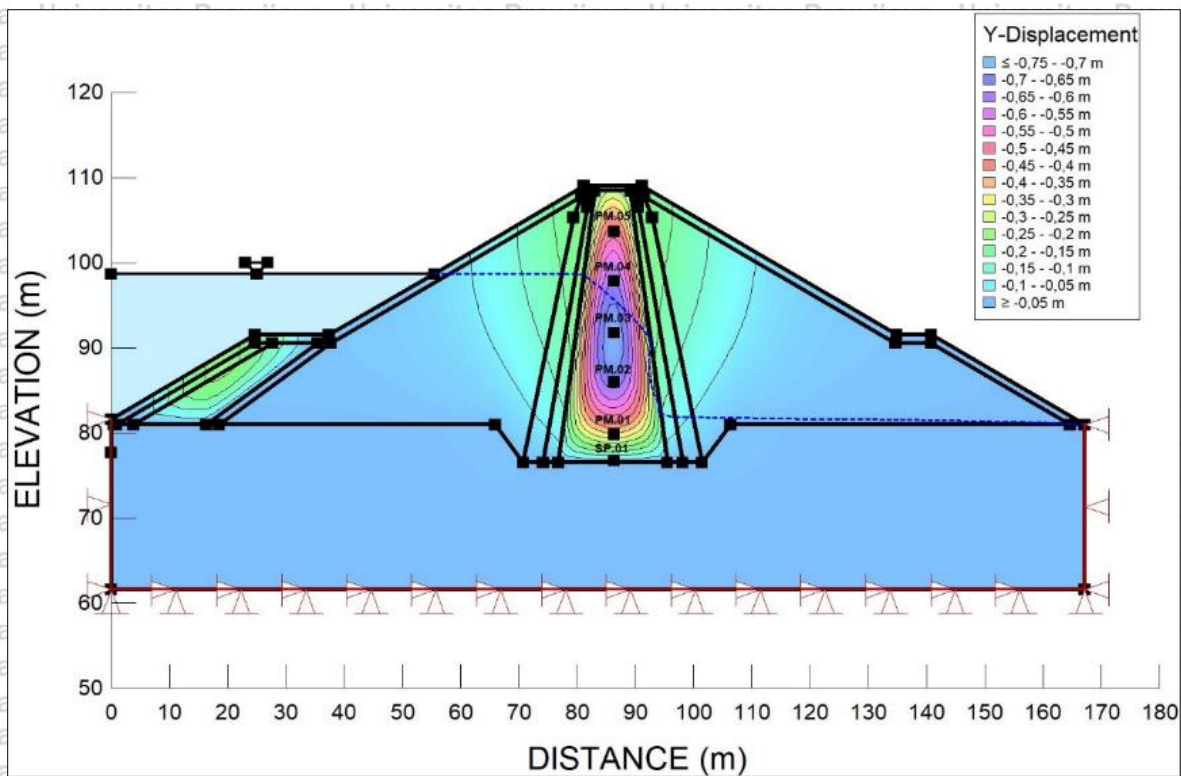
Tabel 4.11. Hasil Analisis Rembesan Pada SEEP/W - MD.16 (STA 0+420)

Tanggal	Code	Tinggi	Debit	Panjang	Debit
		Muka Air (m)	Numeric (m <sup>3</sup> /dtk/m)	Pondasi (m)	Numeric (m <sup>3</sup> /dtk)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=(4)*(5)
31-Jan-18	A	87,500	7,3256,E-07	540	0,00040
28-Feb-18	B	93,650	1,8831,E-06	540	0,00102
30-Apr-18	C	94,950	1,6628,E-06	540	0,00090
31-Jan-19	D	96,400	2,4878,E-06	540	0,00134
30-Apr-19	E	101,400	2,4077,E-06	540	0,00130
30-Sep-19	F	99,200	2,7896,E-06	540	0,00151
31-Dec-19	G	98,500	2,0830,E-06	540	0,00112
29-Feb-20	H	100,119	3,2635,E-06	540	0,00176
30-Apr-20	I	99,735	2,9143,E-06	540	0,00157
30-Sep-20	J	98,834	2,0715,E-06	540	0,00112
31-Dec-20	K	98,690	3,1369,E-06	540	0,00169

Sumber: Hasil Analisis SEEP/W (2021)

#### 4.4.5. Analisis Numeric Settlement MD.11 (STA 0+320)

Analisis *numeric settlement* ini dilakukan berdasarkan tekanan air pori yang terjadi selama periode 2 tahun terakhir (2018-2020) pada tubuh bendungan. *Settlement* yang terjadi pada timbunan inti tubuh bendungan ini sangat bergantung pada tekanan air pori yang terjadi. *Settlement* yang terjadi pada lokasi MD.11 (STA 0+320) dapat dilihat pada gambar 4.28.



Gambar 4.28. *Settlement* MD.11 (31 Des 2020)

Pada gambar 4.28. dapat diketahui nilai *settlement* yang terjadi pada setiap instrumen *multilayer settlement* (SP.01, PM.01 – PM.05) saat ketinggian air berada di elevasi 98,69 m, nilai *settlement* dapat diketahui dari perbedaan warna yang ditunjukkan pada gambar 4.28.

*Settlement* yang terjadi pada penampang MD.11 dapat diketahui dari nilai Y-Displacement yang terjadi pada setiap instrumen. Nilai *settlement* untuk setiap perubahan muka air waduk dapat dilihat pada tabel 4.12 di bawah ini.



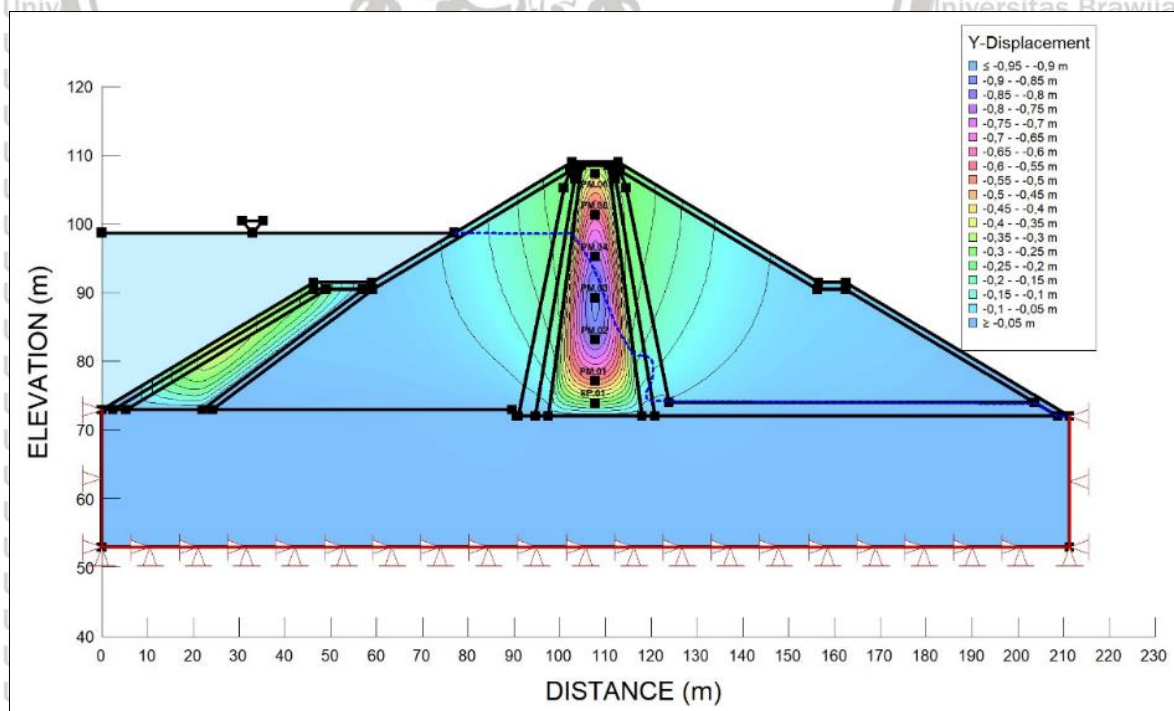
Tabel 4.12. Hasil Analisis Rembesan Pada SIGMA/W - MD.11 (STA 0+320)

Code	Elv. Muka Air (m)	Date (day)	Settlement - SIGMA/W (m)					
			SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05
A	87,500	31-Jan-18	-0,0277	-0,2943	-0,5975	-0,6541	-0,5714	-0,4124
B	93,650	28-Feb-18	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
C	94,950	30-Apr-18	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
D	96,400	31-Jan-19	-0,0277	-0,2946	-0,5984	-0,6557	-0,5738	-0,4162
E	101,400	30-Apr-19	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
F	99,200	30-Sep-19	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
G	98,500	31-Dec-19	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
H	100,119	29-Feb-20	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
I	99,735	30-Apr-20	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
J	98,834	30-Sep-20	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165
K	98,690	31-Dec-20	-0,0280	-0,2949	-0,5987	-0,6560	-0,5742	-0,4165

Sumber: Hasil Analisis SIGMA/W (2021)

#### 4.4.6. Analisis Numeric Settlement MD.17 (STA 0+443,4)

Analisis *numeric settlement* ini dilakukan berdasarkan tekanan air pori yang terjadi selama periode 2 tahun terakhir (2018-2020) pada tubuh bendungan. *Settlement* yang terjadi pada tubuh bendungan ini sangat bergantung pada tekanan air pori yang terjadi. *Settlement* yang terjadi pada lokasi MD.17 (STA 0+443,4) dapat dilihat pada gambar 4.29.

Gambar 4.29. *Settlement* MD.17 (31 Des 2020)

Pada gambar 4.29, dapat diketahui nilai *settlement* yang terjadi pada setiap instrumen *multilayer settlement* (SP.01, PM.01 – PM.06) saat ketinggian air berada di elevasi 98,69 m, nilai *settlement* dapat diketahui dari perbedaan warna yang ditunjukkan pada gambar 4.29. *Settlement* yang terjadi pada penampang MD.17 dapat diketahui dari nilai Y-Displacement yang terjadi pada setiap instrumen. Nilai *settlement* untuk setiap perubahan muka air waduk dapat dilihat pada tabel 4.13 di bawah ini.

Tabel 4.13. Hasil Analisis Rembesan Pada SIGMA/W - MD.17 (STA 0+443,4)

Code	Elv. Muka Air (m)	Date (day)	Settlement - SIGMA/W (m)						
			SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	PM.06
A	87,500	31-Jan-18	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
B	93,650	28-Feb-18	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
C	94,950	30-Apr-18	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3245
D	96,400	31-Jan-19	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3245
E	101,400	30-Apr-19	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
F	99,200	30-Sep-19	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
G	98,500	31-Dec-19	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
H	100,119	29-Feb-20	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
I	99,735	30-Apr-20	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
J	98,834	30-Sep-20	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246
K	98,690	31-Dec-20	-0,2051	-0,4762	-0,7536	-0,8050	-0,7248	-0,5614	-0,3246

Sumber: Hasil Analisis SIGMA/W (2021)

#### 4.5. Validasi Data Instrumen Bendungan Raknamo

Data instrumen *vibrating weir piezometer*, *multilayer settlement*, dan *V-Notch* yang ada dilakukan validasi atau perbandingan data antara data hasil bacaan instrumen di lapangan dengan hasil analisis *numeric* pada Posisi MD.10 dan MD.16 untuk instrumen *piezometer* serta MD.11 dan MD.17 untuk instrumen *multilayer settlement*.

##### 4.5.1. Validasi Data Actual dan Hasil Numeric (*Vibrating Weir Piezometer*) MD.10

Data hasil pembacaan instrumen di lapangan (*data actual*) dibandingkan dengan hasil hasil analisis *numeric* (SEEP/W). Validasi ini dilakukan berdasarkan beberapa tanggal dalam rentang waktu yaitu Januari 2018 – Desember 2020, untuk melihat lebih jelas bagaimana hasil analisis SEEP/W dan *data actual piezometer* di lokasi MD.10 (STA 0+300) maka dapat dilihat pada Tabel 4.14.

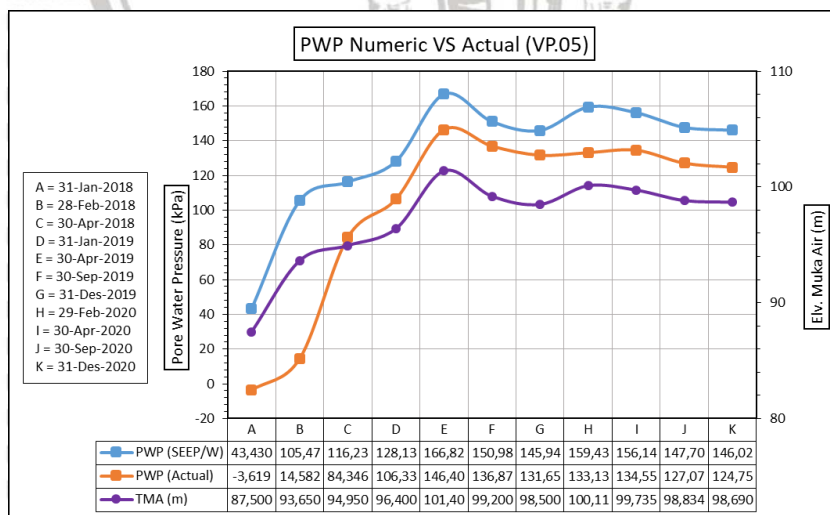


Tabel 4.14. Hasil Analisis SEEP/W dan Data Actual Piezometer - MD.10 (STA 0+300)

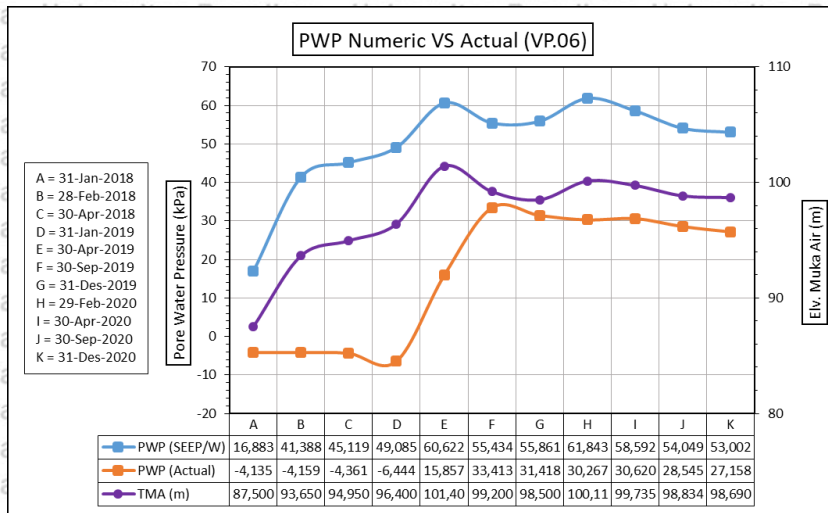
Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
TMA (m)	87.500	93.650	94.950	96.400	101.400	99.200	98.500	100.119	99.735	98.834	98.690	
Date (day)	31-Jan-18	28-Feb-18	30-Apr-18	31-Jan-19	30-Apr-19	30-Sep-19	31-Dec-19	29-Feb-20	30-Apr-20	30-Sep-20	31-Dec-20	
Total Head (SEEP/W) (m)	VP.05	85.428	91.755	92.852	94.066	98.011	96.396	95.882	97.257	96.922	96.061	95.890
	VP.06	82.721	85.220	85.601	86.005	87.181	86.653	86.696	87.306	86.974	86.511	86.405
	VP.07	85.558	92.547	93.737	95.054	99.211	97.611	97.023	98.464	98.175	97.244	97.048
	VP.08	83.501	87.805	88.434	88.987	88.309	90.170	90.388	91.084	91.118	89.702	89.011
	VP.09	85.045	92.916	94.477	95.993	100.701	98.772	98.089	99.643	99.324	98.395	98.224
	VP.10	84.191	89.929	90.944	92.043	91.887	94.562	93.994	94.315	95.344	94.052	93.543
	VP.11	84.632	91.504	92.824	94.330	98.571	97.437	96.659	98.164	98.095	96.955	96.624
	VP.05	80.630	82.490	89.620	91.867	95.963	94.988	94.455	94.606	94.751	93.987	93.750
	VP.06	80.577	80.575	80.554	80.341	82.621	84.415	84.211	84.093	84.129	83.917	83.776
	VP.07	87.589	87.596	91.249	92.923	96.905	96.249	95.731	95.792	95.969	95.370	95.118
	VP.08	87.589	87.581	87.557	87.327	88.707	90.432	90.201	90.072	90.099	89.821	89.625
VP.09	94.687	94.687	95.099	97.332	101.292	99.994	99.352	99.543	99.629	98.691	98.497	
VP.10	94.656	94.648	94.637	94.458	94.417	94.540	94.321	94.241	94.341	94.177	94.113	
VP.11	101.907	101.904	101.889	101.681	101.632	101.586	101.465	101.409	101.433	101.355	101.295	
PWP (SEEP/W) (kPa)	VP.05	43.430	105.477	116.234	128.137	166.828	150.984	145.945	159.433	156.148	147.705	146.022
	VP.06	16.883	41.388	45.119	49.085	60.622	55.434	55.861	61.843	58.592	54.049	53.002
	VP.07	-23.951	44.595	56.265	69.178	109.951	94.256	88.490	102.617	99.788	90.655	88.737
	VP.08	-44.120	-1.913	4.258	9.679	3.032	21.282	23.416	30.250	30.579	16.690	9.910
	VP.09	-97.626	-20.433	-5.125	9.743	55.912	36.988	30.292	45.535	42.410	33.300	31.618
	VP.10	-106.005	-49.732	-39.780	-28.995	-30.528	-4.298	-9.867	-6.718	3.374	-9.293	-14.290
	VP.11	-170.332	-102.930	-89.986	-75.217	-33.628	-44.748	-52.379	-37.624	-38.297	-49.479	-52.723
	VP.05	-3.619	14.582	84.346	106.332	146.407	136.870	131.651	133.135	134.552	127.074	124.758
	VP.06	-4.135	-4.159	-4.361	-6.444	15.857	33.413	31.418	30.267	30.620	28.545	27.158
	VP.07	-4.021	-3.950	31.791	48.168	87.137	80.718	75.646	76.242	77.977	72.116	69.649
	VP.08	-4.025	-4.103	-4.333	-6.582	6.921	23.793	21.534	20.277	20.536	17.814	15.900
VP.09	-3.063	-3.063	0.971	22.822	61.567	48.861	45.381	44.453	45.292	36.114	34.220	
VP.10	-3.368	-3.442	-3.552	-5.304	-5.708	-4.498	-6.642	-7.424	-6.449	-8.049	-8.683	
VP.11	-0.909	-0.942	-1.087	-3.125	-3.599	-4.054	-5.231	-5.780	-5.550	-6.309	-6.894	

Sumber: Hasil Analisis SEEP/W (2021)

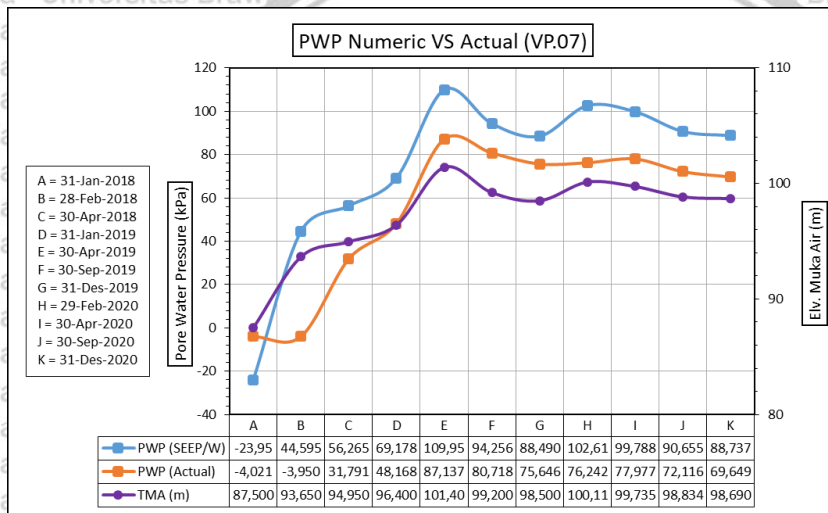
Sedangkan untuk mengetahui pengaruh muka air waduk terhadap *pore water pressure* yang terjadi pada tubuh bendungan di lokasi MD.10 (STA 0+300) pada setiap alat instrumen *piezometer* (VP.05 – VP.11), maka dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.30 – gambar 4.36 dibawah ini.



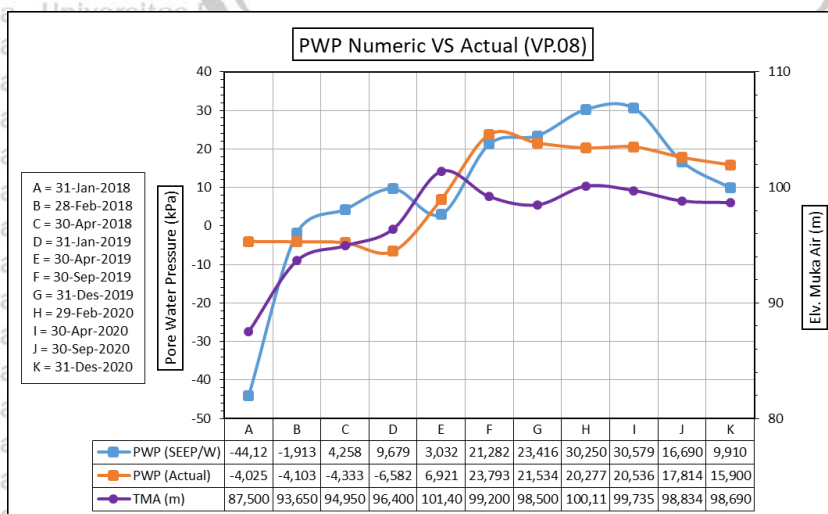
Gambar 4.30. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.05) – MD.10



Gambar 4.31. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.06) – MD.10

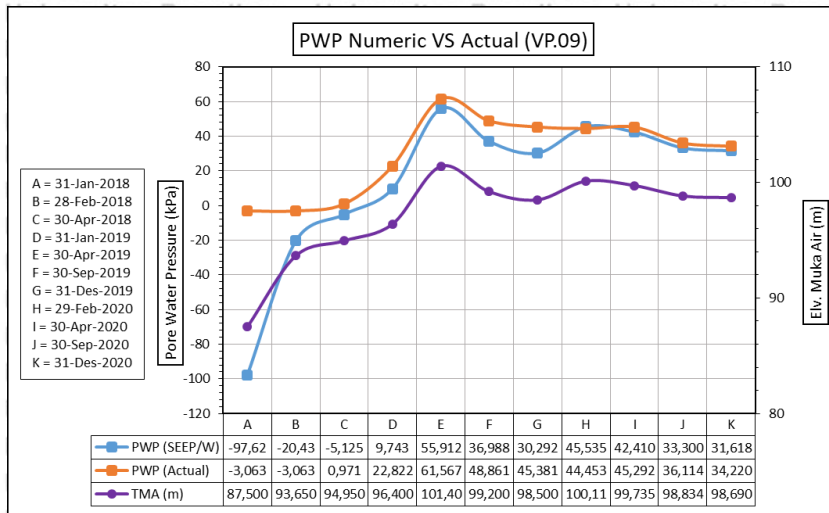


Gambar 4.32. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.07) – MD.10

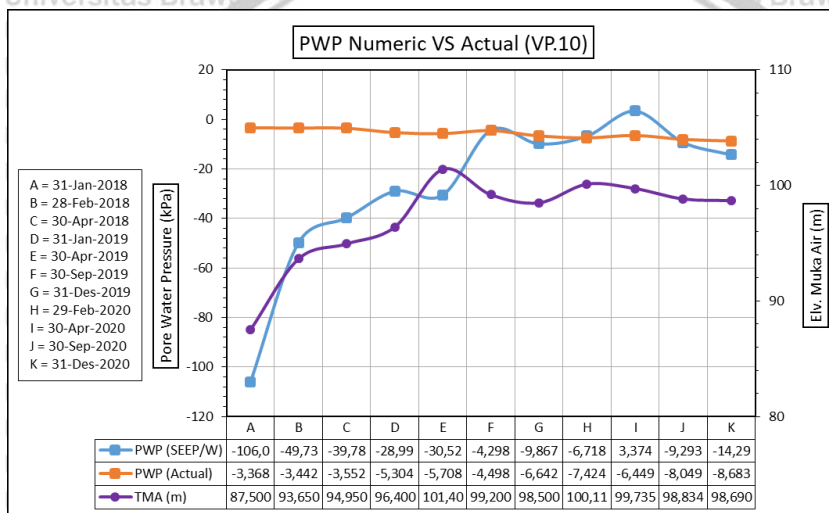


Gambar 4.33. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.08) – MD.10

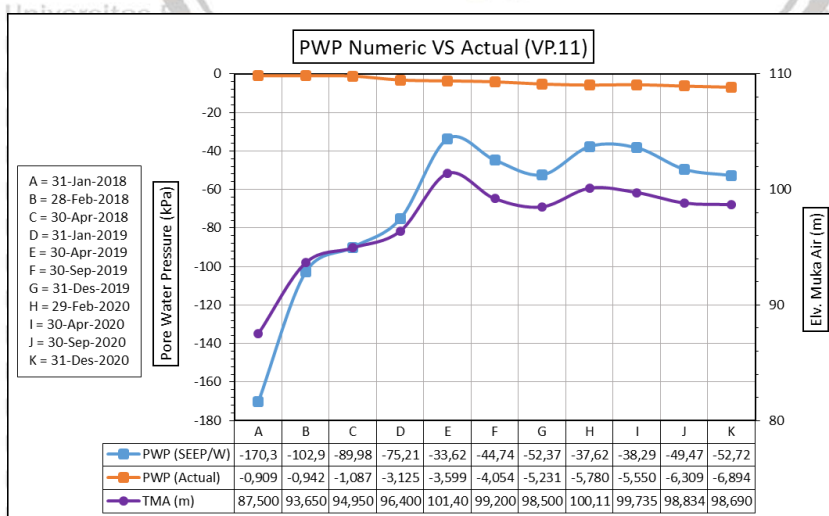




Gambar 4.34. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.09) – MD.10

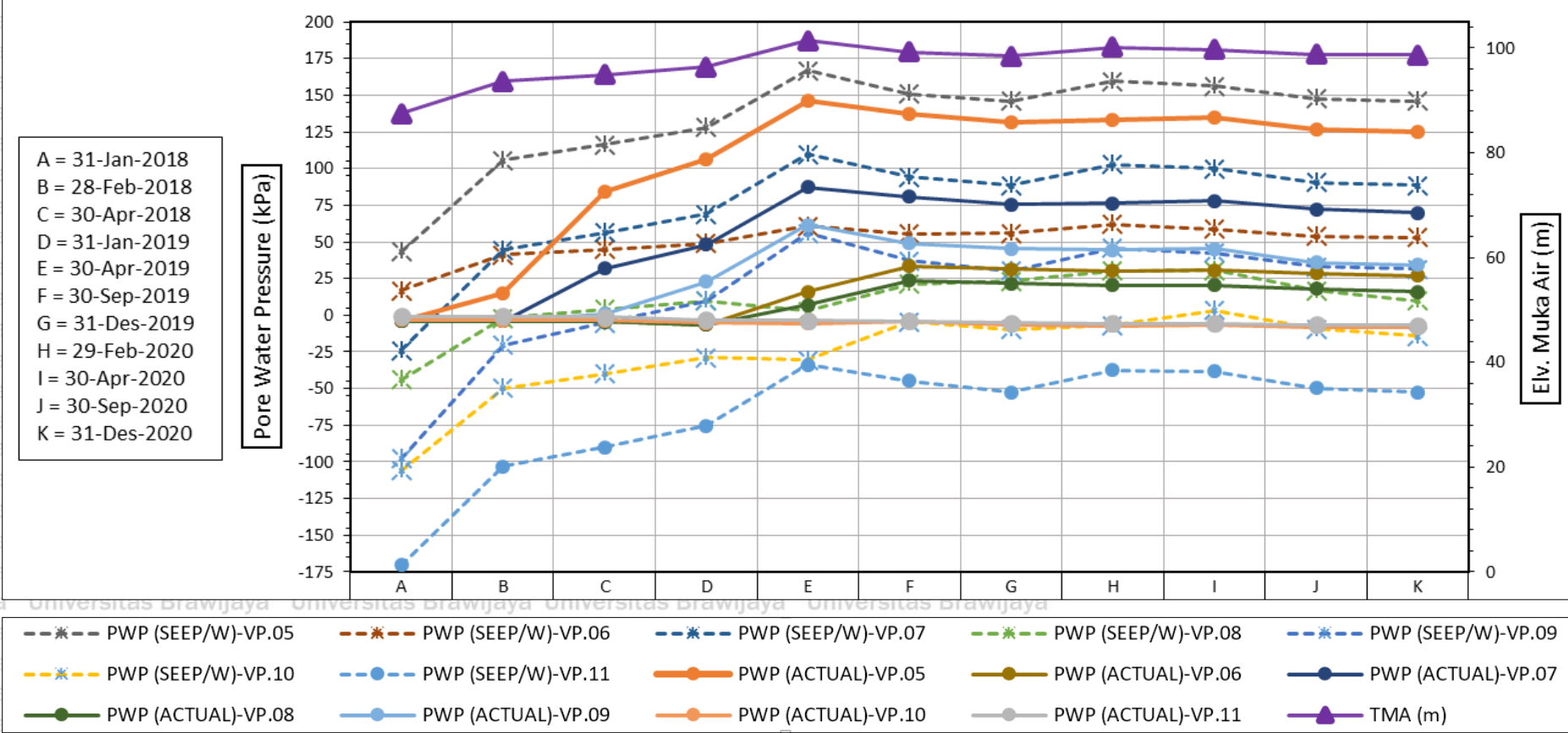


Gambar 4.35. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.10) – MD.10



Gambar 4.36. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.11) – MD.10

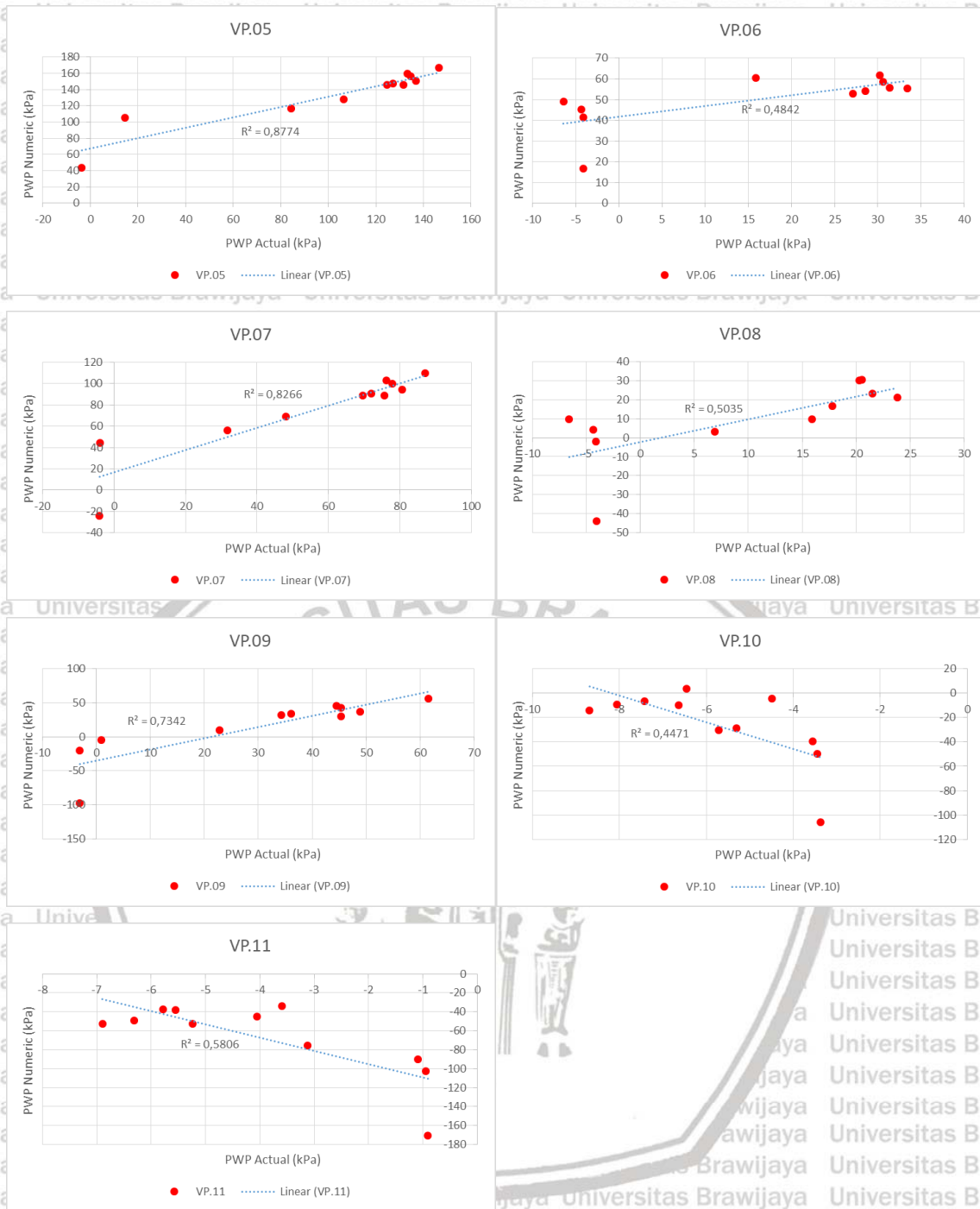
**PWP Numeric VS Actual (MD-10, STA 0+300)**



Gambar 4.37. Grafik *Pore Water Pressure (PWP) Numeric* dengan *Actual* Penampang MD-10, STA 0+300







Gambar 4.38. Korelasi Antara Nilai *Pore Water Pressure Actual* dan *Numeric* (MD.10 – STA 0+300)

Sedangkan untuk mengetahui bagaimana tingkat hubungan kedua variable tersebut maka dapat dilihat pada tabel 4.16.



Tabel 4.16. Tingkat Hubungan Antara Nilai *Pore Water Pressure Actual* dan *Numeric* (MD.10 – STA 0+300)

Piezometer	Korelasi ( $R^2$ )	Tingkat Hubungan
VP.05	0,8774	Sangat Kuat
VP.06	0,4842	Sedang
VP.07	0,8266	Sangat Kuat
VP.08	0,5035	Sedang
VP.09	0,7342	Kuat
VP.10	0,4471	Sedang
VP.11	0,5806	Sedang

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Hasil simulasi *numeric* pada penampang MD.10 STA 0+300 untuk instrumen VP.05 sampai VP.11 menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang sama dengan fluktuasi muka air di waduk. Hasil pembacaan *actual* di lapangan pada penampang MD.10 STA 0+300 untuk instrumen VP.05 sampai VP.09 menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang sama dengan fluktuasi muka air di waduk, sedangkan untuk instrumen VP.10 dan VP.11 menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang sangat berbeda dengan fluktuasi muka air di waduk. Menurut Imran Arshad et al. (2017) perbedaan ini terjadi karena disebabkan oleh kesalahan dalam pengamatan dan pembacaan instrumen di lapangan. Sedangkan menurut Undayana et al. (2016) perbedaan ini bisa terjadi karena adanya jeda waktu dimana air mengalir dari hulu ke hilir bendungan, yang dapat berpengaruh terhadap ketepatan pengukuran instrumen.

Deviasi dari nilai *pore water pressure* (PWP) *actual* dan *numeric* pada instrumen VP.05 sampai VP.09 cukup besar tetapi memiliki tren yang sama, hal ini sesuai penelitian Pandian et al. (2016) dimana nilai groundwater head *actual* dan *numeric* menunjukkan hasil deviasi yang besar tetapi memiliki tren yang sama.

#### 4.5.2. Validasi Data *Actual* dan Hasil *Numeric* (*Vibrating Weir Piezometer*) MD.16

Data hasil pembacaan instrumen di lapangan (data *actual*) dibandingkan dengan hasil hasil analisis *numeric* (SEEP/W). Validasi ini dilakukan berdasarkan beberapa tanggal dalam rentang waktu yaitu Januari 2018 – Desember 2020, untuk melihat lebih jelas bagaimana hasil analisis SEEP/W dan data *actual piezometer* di lokasi MD.16 (STA 0+420) maka dapat dilihat pada Tabel 4.17.



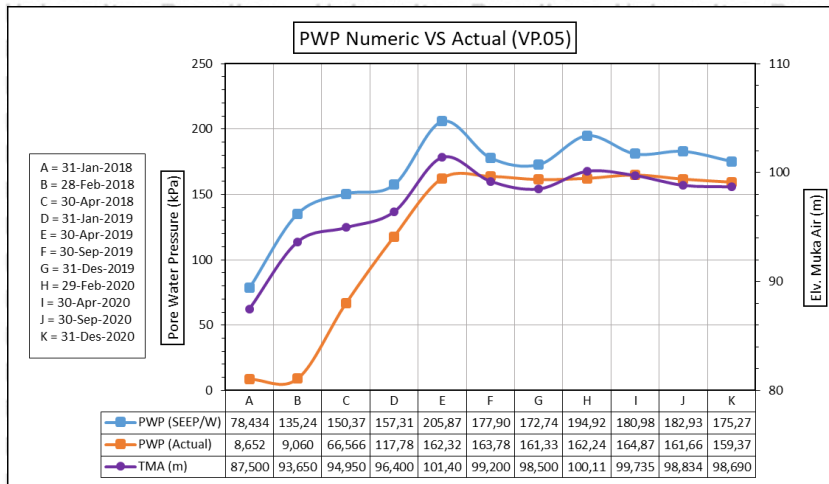
Tabel 4.17. Hasil Analisis SEEP/W dan Data Actual Piezometer - MD.16 (STA 0+420)

	Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K			
	TMA (m)	87.500	93.650	94.950	96.400	101.400	99.200	98.500	100.119	99.735	98.834	98.690			
	Date (day)	31-Jan-18	28-Feb-18	30-Apr-18	31-Jan-19	30-Apr-19	30-Sep-19	31-Dec-19	29-Feb-20	30-Apr-20	30-Sep-20	31-Dec-20			
Total Head (SEEP/W)	(m)	VP.05	84.498	90.291	91.833	92.541	97.493	94.640	94.114	96.376	94.954	95.153	94.373		
		VP.06	79.437	81.346	82.763	82.586	85.980	82.195	82.076	85.391	82.179	84.264	83.437		
		VP.07	85.108	91.359	93.031	93.658	98.998	96.187	95.617	97.806	96.496	96.617	95.523		
		VP.08	81.297	83.416	87.285	84.005	92.221	85.197	85.296	91.267	84.320	89.919	84.688		
		VP.09	85.050	92.575	94.152	95.059	100.375	97.950	97.298	99.128	98.356	97.973	97.041		
		VP.10	82.709	87.118	90.384	87.496	94.663	92.048	91.632	93.512	91.620	94.075	86.322		
		VP.11	84.361	92.037	94.190	95.532	101.271	99.044	98.336	99.990	99.567	98.722	98.443		
		VP.12	83.597	89.517	92.138	91.251	97.708	95.355	94.676	96.643	95.517	96.179	92.059		
		VP.13	73.853	74.026	73.992	74.117	74.106	74.160	74.138	74.085	74.196	74.051	74.215		
		VP.14	73.809	73.914	73.893	73.969	73.963	73.995	73.982	73.949	74.017	73.929	74.029		
		VP.15	73.809	73.914	73.893	73.969	73.963	73.996	73.983	73.950	74.018	73.929	74.030		
		Total Head (Actual)	(m)	VP.05	77.384	77.426	83.303	88.537	93.089	93.239	92.988	93.082	93.350	93.022	92.788
				VP.06	75.054	75.038	74.896	72.618	72.251	71.781	83.038	93.211	98.626	101.539	101.382
				VP.07	83.246	90.496	93.945	96.261	100.426	99.156	98.508	98.750	98.931	97.991	97.744
				VP.08	83.281	83.278	83.272	83.103	84.130	85.694	85.471	85.318	85.311	85.126	84.983
VP.09	90.052			90.040	93.659	94.873	99.164	98.266	97.683	97.890	97.981	97.182	96.940		
VP.10	90.073			90.063	90.038	89.825	89.789	91.398	91.513	91.274	91.318	91.161	91.026		
VP.11	97.151			97.144	97.129	96.946	100.787	99.723	99.075	99.217	99.405	98.552	98.245		
VP.12	97.319			97.366	97.180	97.208	97.141	97.248	97.213	97.236	97.287	97.175	97.068		
VP.13	74.938			74.929	74.913	74.711	74.654	74.605	74.495	74.477	74.458	74.377	74.317		
VP.14	79.962			79.956	79.946	79.781	79.738	79.696	79.617	79.536	79.545	79.470	79.402		
VP.15	89.650			89.772	89.762	89.907	89.985	90.589	89.545	89.525	89.580	90.150	89.333		
PWP (SEEP/W)	(kPa)			VP.05	78.434	135.244	150.375	157.312	205.875	177.901	172.745	194.920	180.980	182.931	175.276
				VP.06	28.802	47.527	61.418	59.687	92.970	55.852	54.684	87.195	55.690	76.138	68.027
				VP.07	15.766	77.078	93.471	99.620	151.990	124.422	118.835	140.304	127.449	128.635	117.913
				VP.08	-21.606	-0.820	37.121	4.949	85.528	16.643	17.615	76.174	8.041	62.951	11.650
		VP.09	-53.445	20.353	35.818	44.713	96.839	73.063	66.670	84.615	77.041	73.290	64.145		
		VP.10	-76.408	-33.171	-1.133	-29.462	40.825	15.182	11.102	29.539	10.985	35.061	-40.975		
		VP.11	-128.859	-53.574	-32.462	-19.296	36.980	15.139	8.202	24.421	20.271	11.983	9.247		
		VP.12	-136.350	-78.289	-52.590	-61.287	2.036	-21.039	-27.694	-8.406	-19.448	-12.951	-53.357		
		VP.13	-14.679	-12.983	-13.321	-12.095	-12.197	-11.675	-11.884	-12.408	-11.320	-12.739	-11.128		
		VP.14	-64.148	-63.122	-63.328	-62.583	-62.641	-62.326	-62.454	-62.771	-62.110	-62.973	-61.994		
		VP.15	-132.795	-131.765	-131.971	-131.224	-131.282	-130.966	-131.094	-131.412	-130.749	-131.615	-130.633		
		PWP (Actual)	(kPa)	VP.05	8.652	9.060	66.566	117.783	162.323	163.783	161.332	162.249	164.873	161.660	159.378
				VP.06	-1.446	-1.462	-1.604	-3.882	-4.249	-4.719	6.538	16.711	22.126	25.039	24.882
				VP.07	-2.486	68.458	102.202	124.866	165.620	153.189	146.848	149.219	150.986	141.788	139.375
				VP.08	-2.141	-2.172	-2.228	-3.882	6.164	21.464	19.286	17.786	17.719	15.915	14.508
VP.09	-4.384			-4.500	30.909	42.789	84.770	75.990	70.286	72.311	73.199	65.383	63.018		
VP.10	-4.178			-4.273	-4.519	-6.607	-6.957	8.790	9.916	7.578	8.005	6.472	5.151		
VP.11	-3.413			-3.484	-3.630	-5.423	32.160	21.747	15.412	16.800	18.637	10.292	7.287		
VP.12	-1.768			-1.315	-3.128	-2.855	-3.516	-2.462	-2.805	-2.582	-2.086	-3.184	-4.224		
VP.13	-4.029			-4.118	-4.280	-6.253	-6.811	-7.286	-8.369	-8.542	-8.728	-9.524	-10.111		
VP.14	-3.797			-3.852	-3.950	-5.566	-5.988	-6.399	-7.177	-7.967	-7.879	-8.609	-9.274		
VP.15	22.500			23.696	23.605	25.017	25.782	31.689	21.482	21.280	21.821	27.396	19.400		

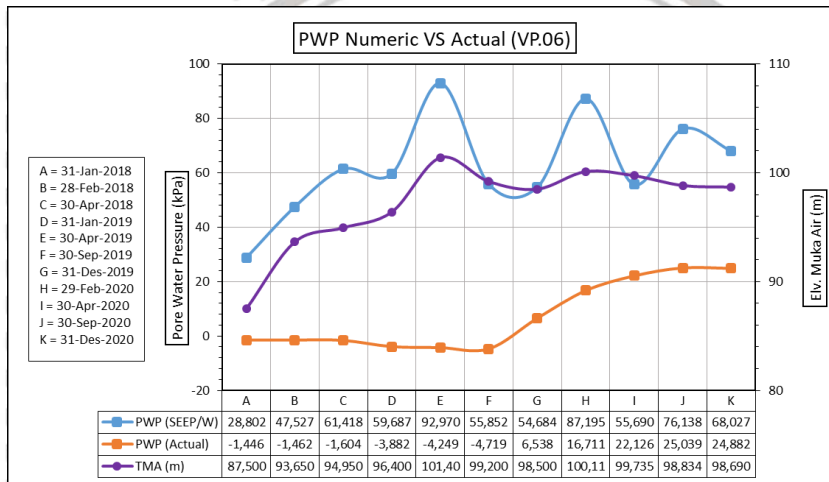
Sumber: Hasil Analisis SEEP/W (2021)

Sedangkan untuk mengetahui pengaruh muka air waduk terhadap *pore water pressure* yang terjadi pada tubuh bendungan di lokasi MD.16 (STA 0+420) pada setiap alat instrumen *piezometer* (VP.05 – VP.15), maka dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.39 – gambar 4.49 dibawah ini.

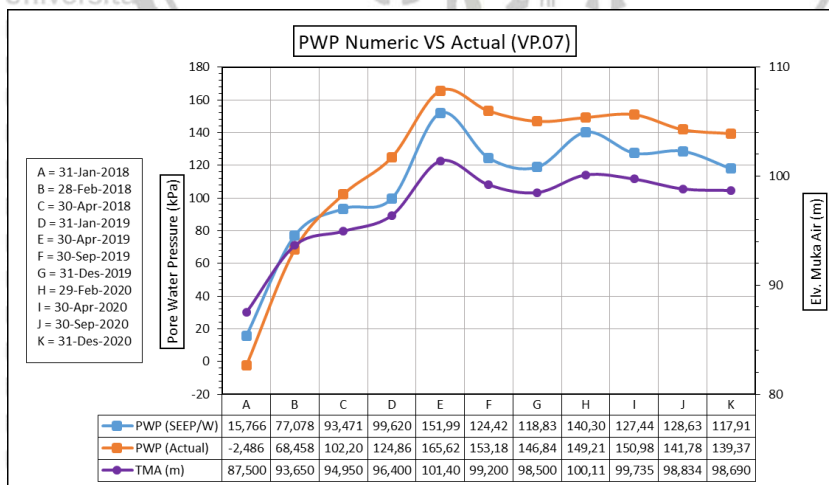




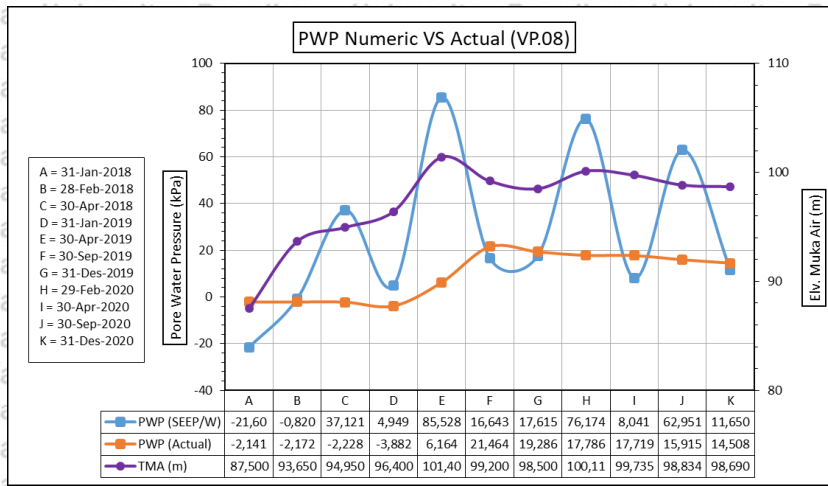
Gambar 4.39. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.05) – MD.16



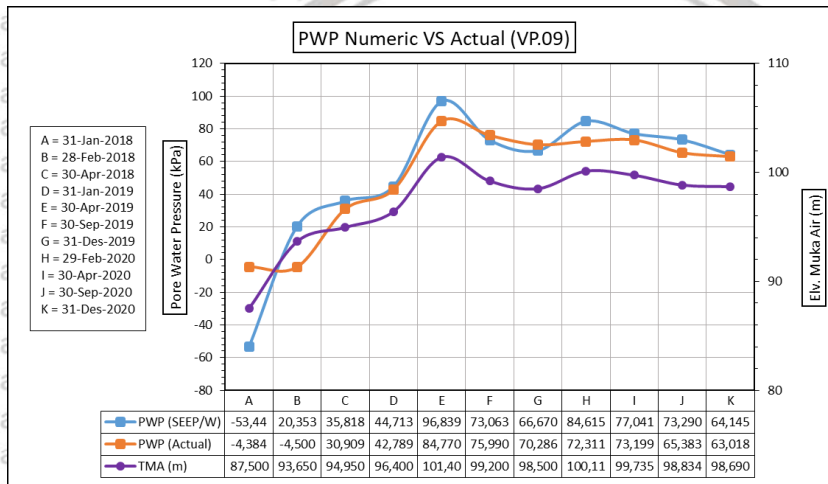
Gambar 4.40. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.06) – MD.16



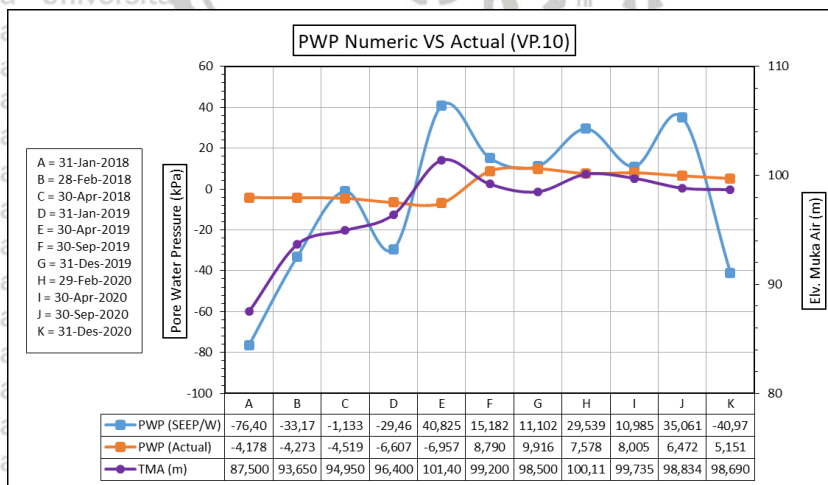
Gambar 4.41. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.07) – MD.16



Gambar 4.42. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.08) – MD.16

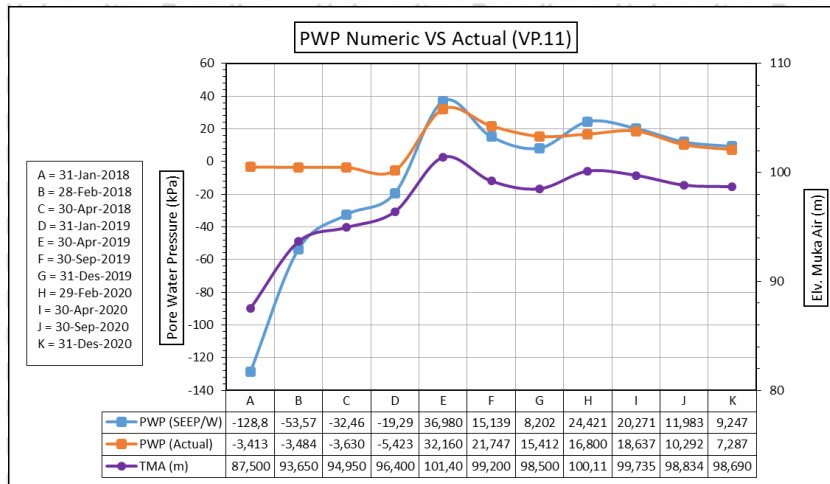


Gambar 4.43. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.09) – MD.16

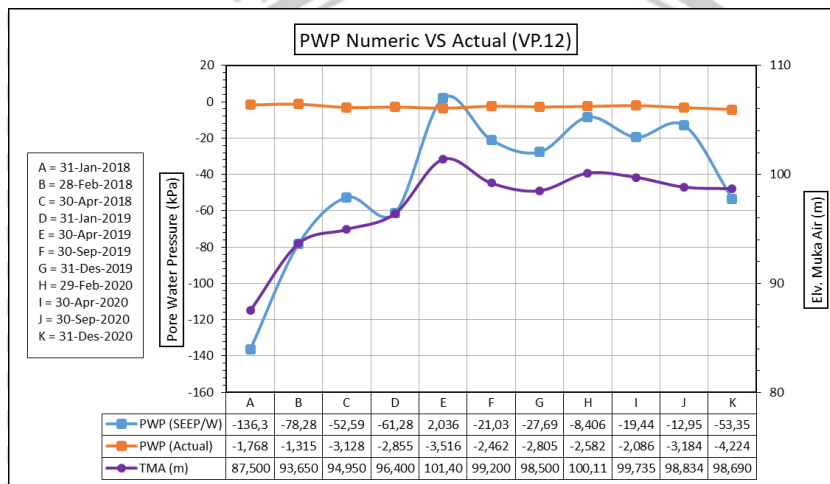


Gambar 4.44. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.10) – MD.16

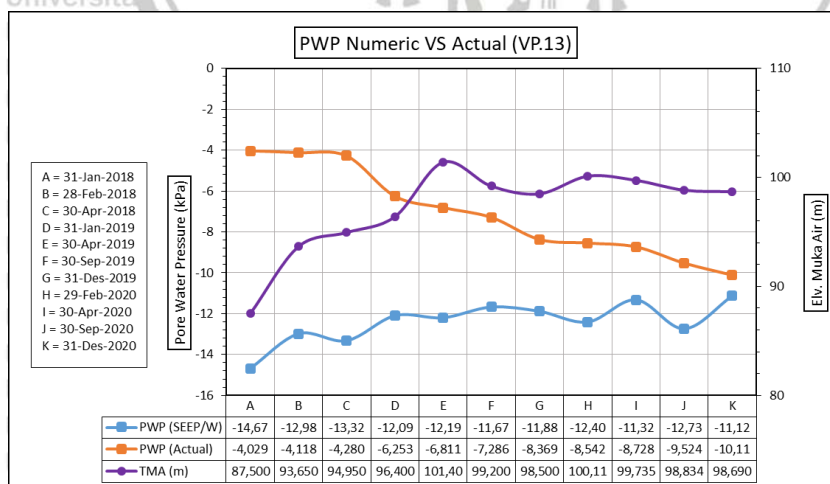




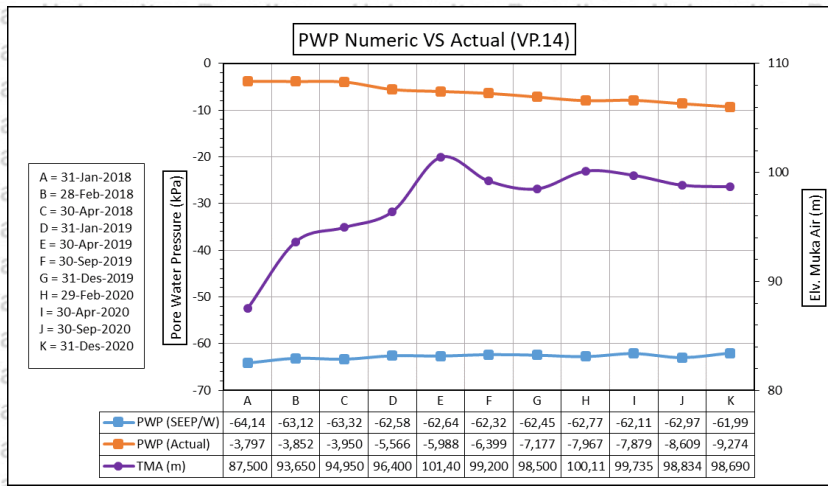
Gambar 4.45. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.11) – MD.16



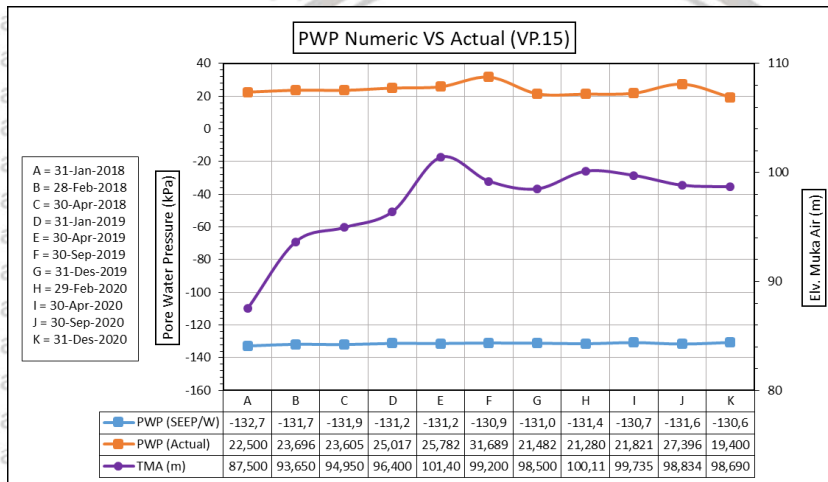
Gambar 4.46. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.12) – MD.16



Gambar 4.47. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Pressure* (VP.13) – MD.16



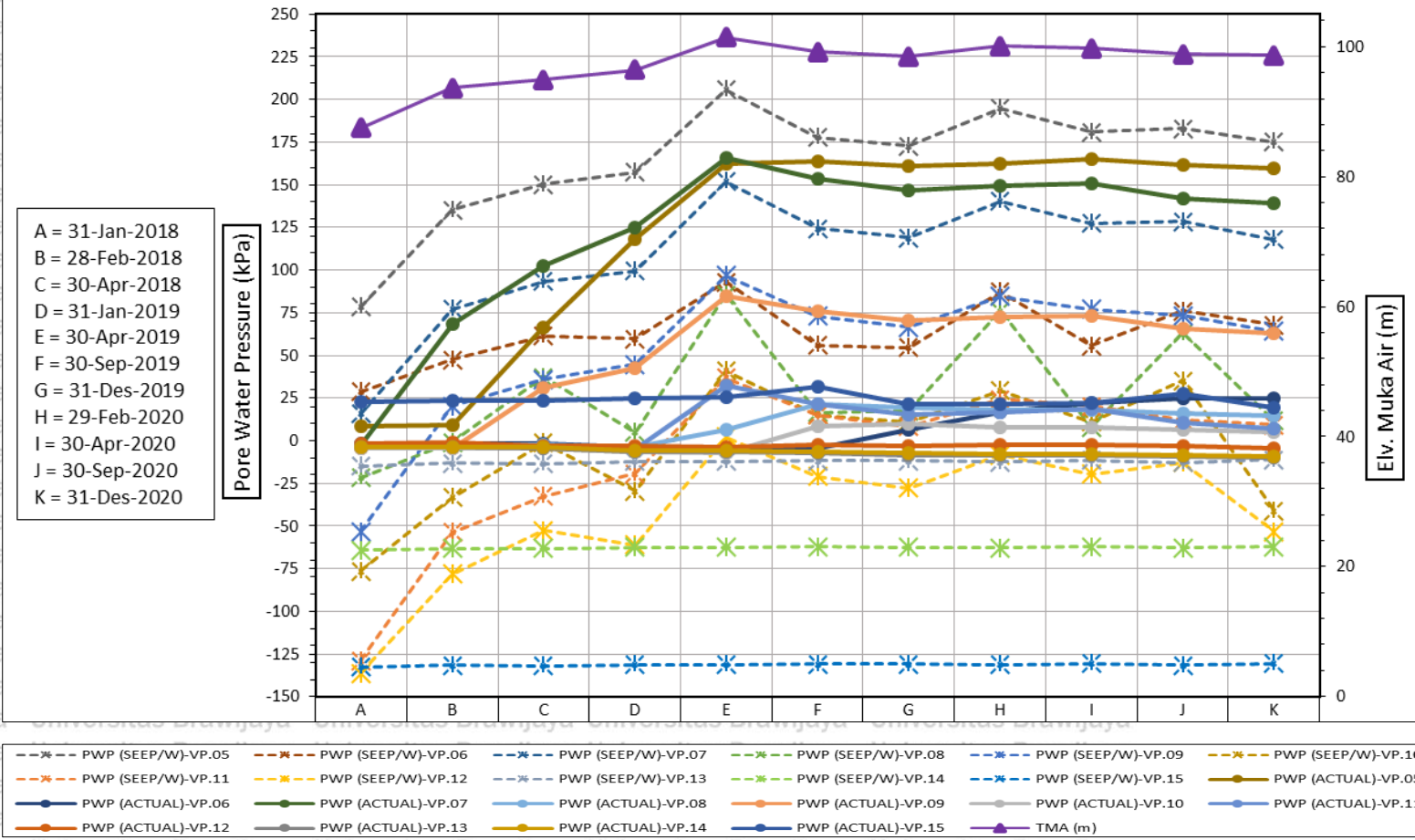
Gambar 4.48. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.14) – MD.16



Gambar 4.49. Perubahan Elevasi Muka Terhadap *Pore Water Presure* (VP.15) – MD.16



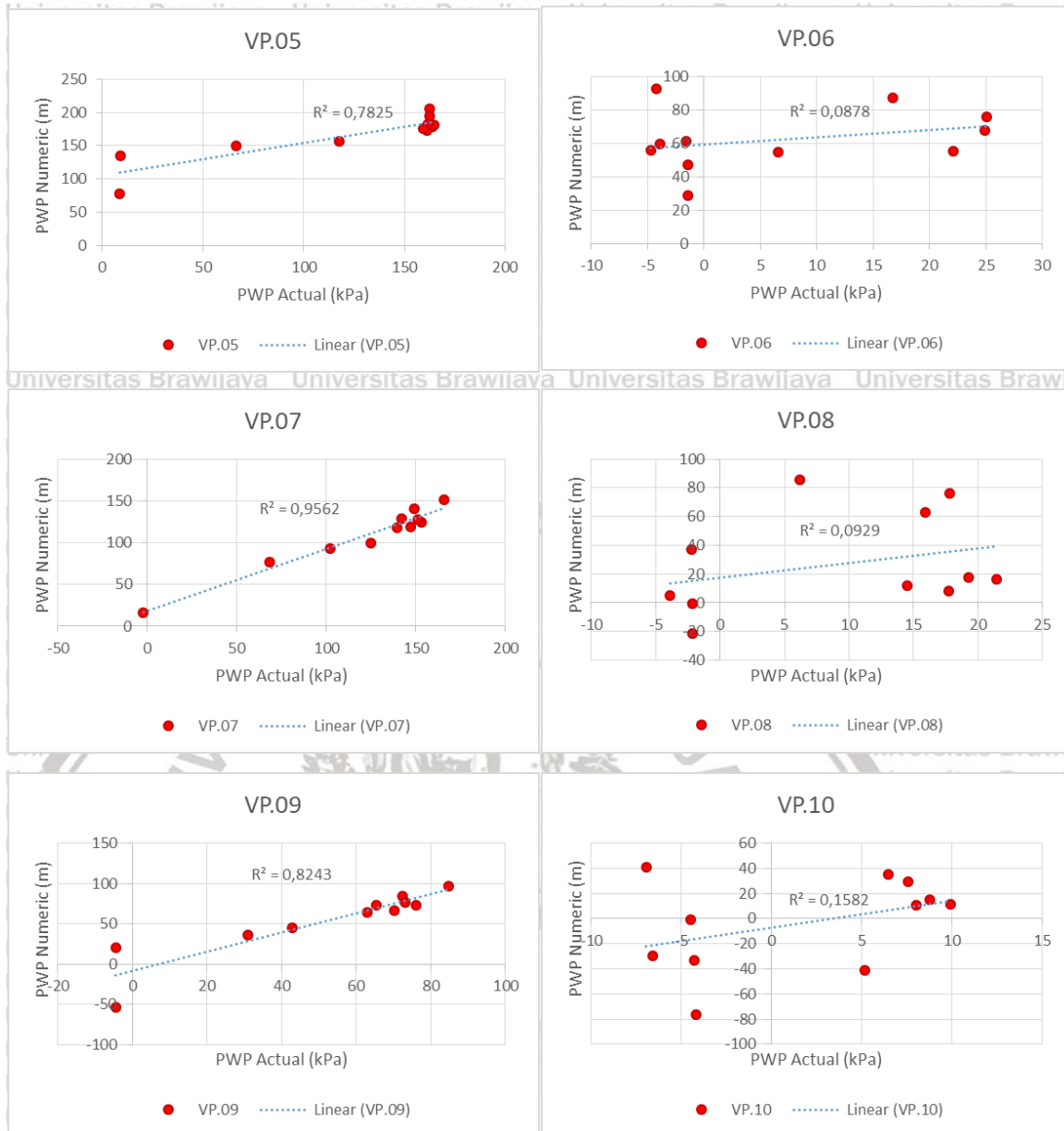
**PWP Numeric VS Actual (MD-16, STA 0+420)**



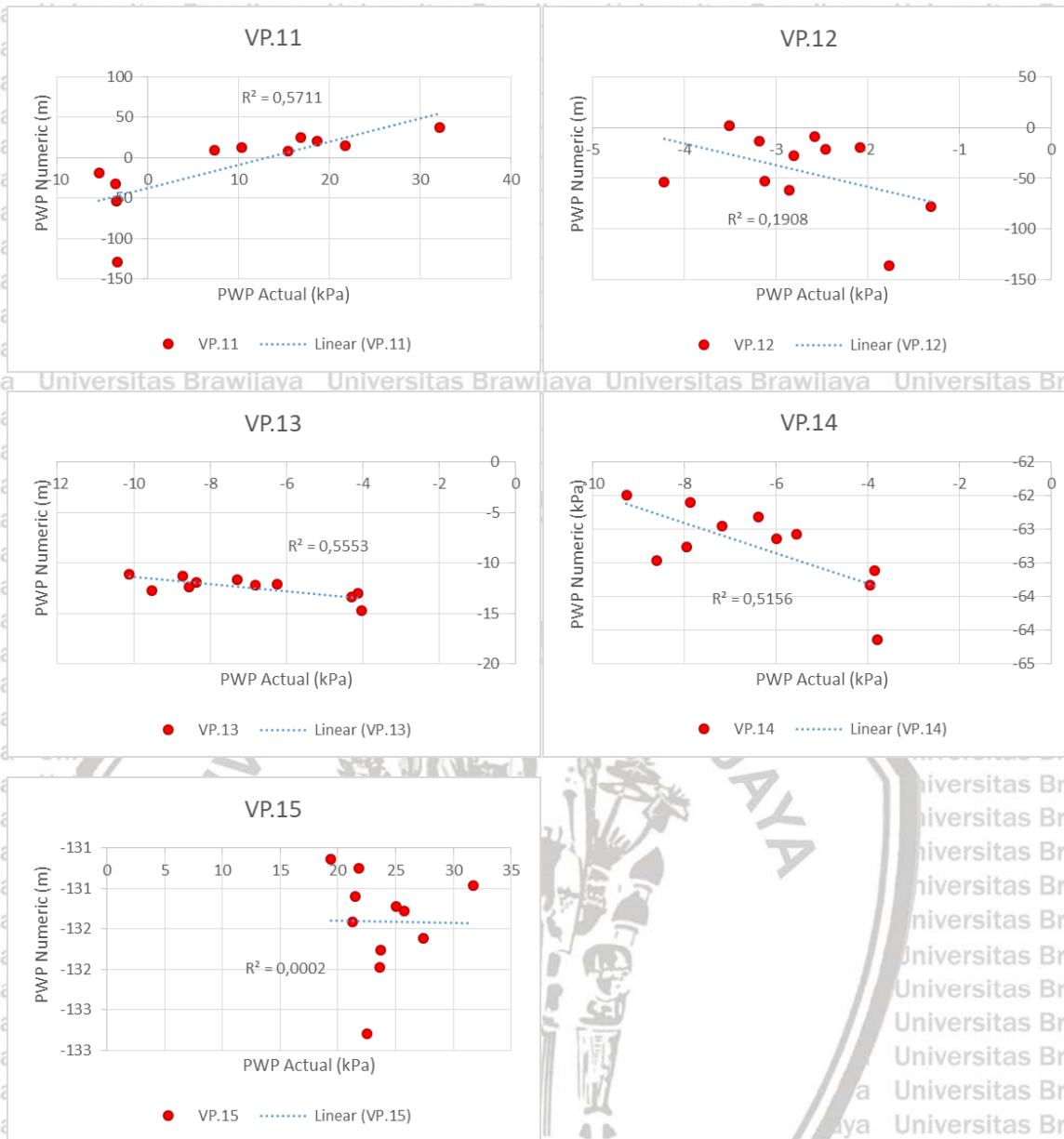
Gambar 4.50. Grafik Pore Water Pressure (PWP) Numeric dengan Actual Penampang MD-16, STA 0+420







Gambar 4.51. Korelasi Antara Nilai *Pore Water Pressure Actual* dan *Numeric* VP.05 – VP.10 (MD.16 – STA 0+420)



Gambar 4.52. Korelasi Antara Nilai *Pore Water Pressure Actual* dan *Numeric* VP.11 – VP.15 (MD.16 – STA 0+420)



Sedangkan untuk mengetahui bagaimana tingkat hubungan kedua variabel tersebut maka dapat dilihat pada tabel 4.19.

Tabel 4.19. Tingkat Hubungan Antara Nilai *Pore Water Pressure Actual* dan *Numeric* (MD.10 – STA 0+300)

Piezometer	Korelasi ( $R^2$ )	Tingkat Hubungan
VP.05	0,7825	Kuat
VP.06	0,0878	Sangat Rendah
VP.07	0,9562	Sangat Kuat
VP.08	0,0929	Sangat Rendah
VP.09	0,8243	Sangat Kuat
VP.10	0,1582	Sangat Rendah
VP.11	0,5711	Sedang
VP.12	0,1908	Sangat Rendah
VP.13	0,5553	Sedang
VP.14	0,5156	Sedang
VP.15	0,0002	Sangat Rendah

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Hasil simulasi *numeric* pada penampang MD.16 STA 0+420 untuk instrumen (VP.05, VP.07, VP.09, VP.11) menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang sama dengan fluktuasi muka air di waduk, sedangkan (VP.06, VP.08, VP.10, VP.12, VP.13, VP.14, VP.15) menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang berbeda dengan fluktuasi muka air di waduk. Hal ini disebabkan karena ketika nilai PWP instrumen minus maka pengaruh fluktuasi muka air sangat sedikit.

Hasil pembacaan *actual* di lapangan pada penampang MD.16 STA 0+420 untuk instrumen (VP.05, VP.07, VP.09, VP.11) menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang sama dengan fluktuasi muka air di waduk, sedangkan untuk instrumen (VP.06, VP.08, VP.10, VP.12, VP.13, VP.14, VP.15) menunjukkan tren *pore water pressure* (PWP) yang sangat berbeda dengan fluktuasi muka air di waduk. Menurut Mohamed N. Salem et al. (2019) yang melakukan pengujian model test di laboratorium Universitas Zagazig di Mesir menyatakan bahwa ketika terjadi perubahan atau perbedaan nilai permeability ( $k$ ) pada timbunan inti maka nilai nilai PWP dan juga rembesan yang terjadi akan berbeda dengan hasil *numeric*.

Deviasi dari nilai *pore water pressure* (PWP) *actual* dan *numeric* pada instrumen (VP.05, VP.07, VP.09, VP.11) cukup besar tetapi memiliki tren yang sama, hal ini sesuai penelitian Pandian et al. (2016) dimana nilai groundwater head *actual* dan *numeric* menunjukkan hasil deviasi yang besar tetapi memiliki tren yang sama.

#### 4.5.3. Validasi Data Actual (V-Notch) dan Hasil Numeric (SEEP/W) MD.10

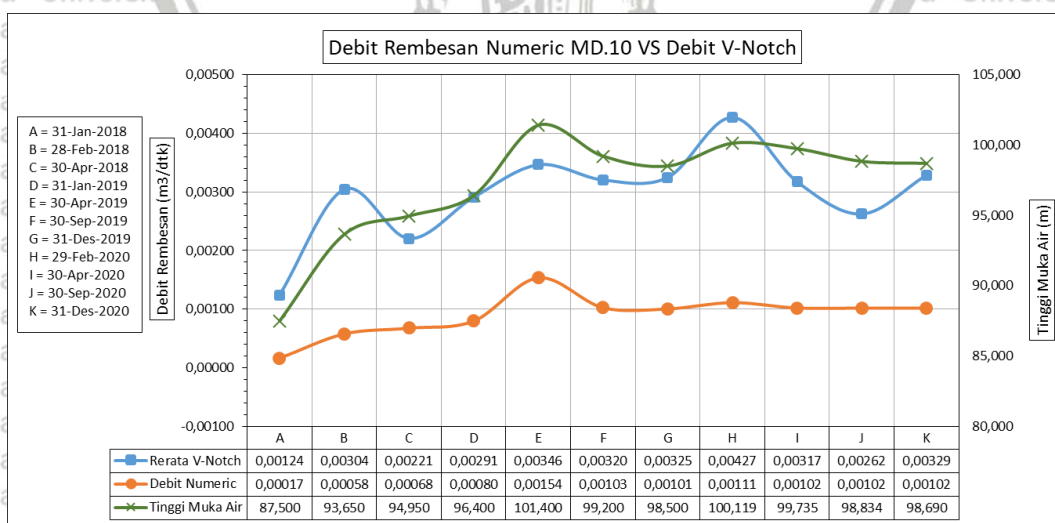
Data hasil pembacaan instrumen di lapangan (data *actual*) dibandingkan dengan hasil hasil analisis *numeric* debit rembesan (SEEP/W). Validasi ini dilakukan berdasarkan beberapa tanggal dalam rentang waktu yaitu Januari 2018 – Desember 2020, untuk melihat lebih jelas bagaimana hasil analisis debit rembesan SEEP/W dan data *actual* V-Notch di lokasi MD.10 (STA 0+300) maka dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20. Hasil Analisis Debit Numeric dan Debit Actual V-Notch - MD.10 (STA 0+300)

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air (m)	Debit Numeric ( $m^3/dtk/m$ )	Panjang Pondasi (m)	V-Nocth A ( $m^3/dtk$ )	V-Nocth B ( $m^3/dtk$ )	Rerata V-Notch ( $m^3/dtk$ )	Debit Numeric ( $m^3/dtk$ )	Deviasi ( $m^3/dtk$ )	Kesalahan Relatif %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)={(0,5)*(6+7)}	(9)=(4)*(5)	(10)=(8)-(9)	(11)=(10/8)*100
31-Jan-18	A	87,500	3,0758,E-07	540	0,002	0,0008	0,00124	0,00017	0,00108	86,6
28-Feb-18	B	93,650	1,0747,E-06	540	0,004	0,0018	0,00304	0,00058	0,00246	80,9
30-Apr-18	C	94,950	1,2562,E-06	540	0,004	0,0004	0,00221	0,00068	0,00153	69,2
31-Jan-19	D	96,400	1,4794,E-06	540	0,005	0,0006	0,00291	0,00080	0,00211	72,5
30-Apr-19	E	101,400	2,8442,E-06	540	0,006	0,0008	0,00346	0,00154	0,00193	55,6
30-Sep-19	F	99,200	1,9024,E-06	540	0,006	0,0008	0,00320	0,00103	0,00218	67,9
31-Dec-19	G	98,500	1,8643,E-06	540	0,005	0,0010	0,00325	0,00101	0,00224	69,0
29-Feb-20	H	100,119	2,0632,E-06	540	0,007	0,0016	0,00427	0,00111	0,00315	73,9
30-Apr-20	I	99,735	1,8921,E-06	540	0,005	0,0015	0,00317	0,00102	0,00215	67,8
30-Sep-20	J	98,834	1,8893,E-06	540	0,004	0,0008	0,00262	0,00102	0,00160	61,1
31-Dec-20	K	98,690	1,8902,E-06	540	0,006	0,0010	0,00329	0,00102	0,00227	68,9

Sumber: Hasil Analisis (2021)

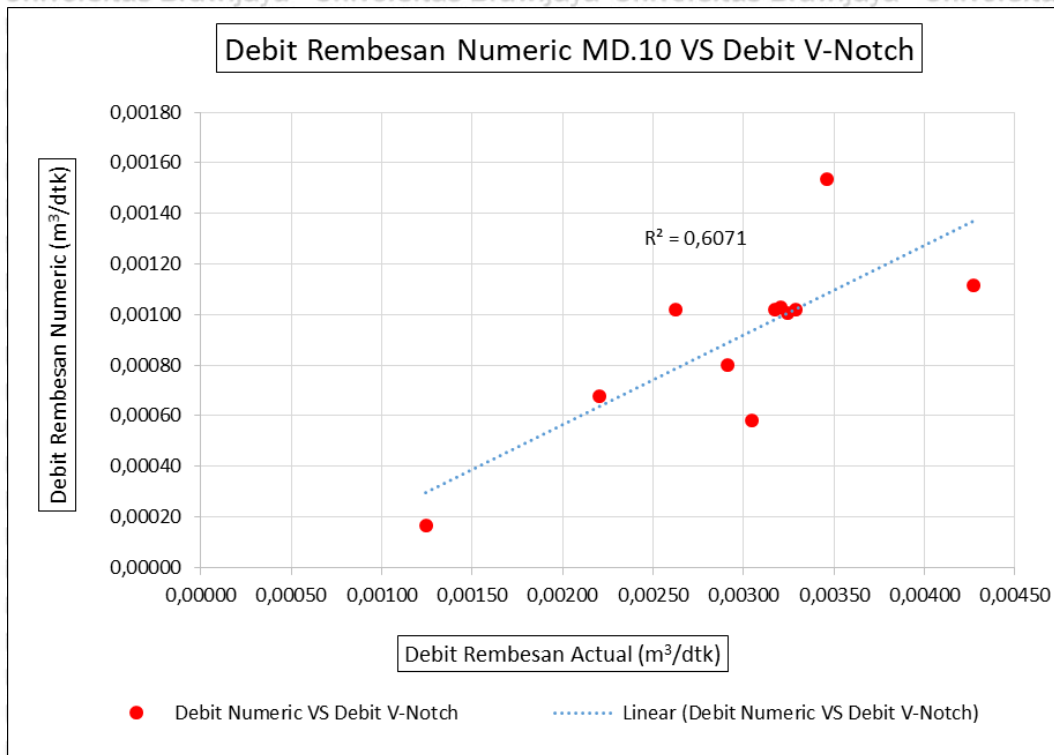
Sedangkan untuk mengetahui pengaruh perubahan muka air waduk terhadap debit rembesan menggunakan analisis *numeric* yang terjadi pada tubuh bendungan di lokasi MD.10 (STA 0+300) pada alat instrumen V-Notch, maka dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.53.



Gambar 4.53. Perubahan Tinggi Muka Air Terhadap Debit Rembesan Actual dan Numeric (MD.10, STA 0+300)



Berdasarkan Tabel 4.20. dapat ditentukan korelasi atau hubungan antara nilai debit rembesan *actual* dan *numeric* (MD.10 – STA.0+300), dapat dilihat pada gambar 4.54.



Gambar 4.54. Korelasi Antara Nilai Debit Rembesan *Actual* dan *Numeric* (MD.10, STA 0+300)

Berdasarkan nilai korelasi ( $R^2$ ) debit rembesan antara hasil *actual* dan *numeric* sebesar 0,6071, ini memiliki hubungan korelasi yang kuat.

#### 4.5.4. Validasi Data *Actual* (V-Notch) dan Hasil *Numeric* (SEEP/W) MD.16

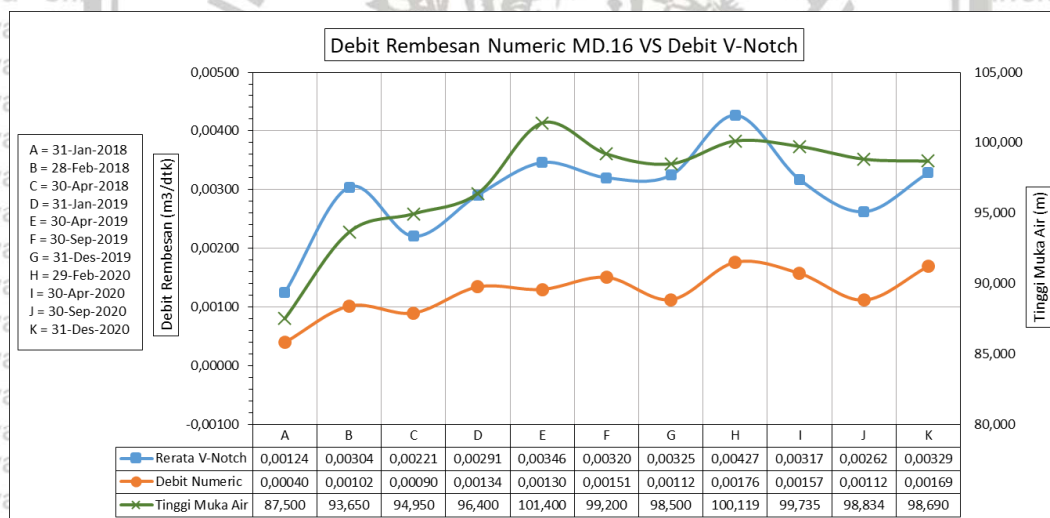
Data hasil pembacaan instrumen di lapangan (data *actual*) dibandingkan dengan hasil hasil analisis *numeric* debit rembesan (SEEP/W). Validasi ini dilakukan berdasarkan beberapa tanggal dalam rentang waktu yaitu Januari 2018 – Desember 2020, untuk melihat lebih jelas bagaimana hasil analisis debit rembesan SEEP/W dan data *actual* V-Notch di lokasi MD.16 (STA 0+420) maka dapat dilihat pada Tabel 4.21.

Tabel 4.21. Hasil Analisis Debit Numeric dan Debit Actual V-Notch - MD.16 (STA 0+420)

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air (m)	Debit Numeric ( $m^3/dtk/m$ )	Panjang Pondasi (m)	V-Nocth A ( $m^3/dtk$ )	V-Nocth B ( $m^3/dtk$ )	Rerata V-Notch ( $m^3/dtk$ )	Debit Numeric ( $m^3/dtk$ )	Deviasi ( $m^3/dtk$ )	Kesalahan Relatif %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)={((0,5)*(6+7))}	(9)=(4)*(5)	(10)=(8)-(9)	(11)=(10/8)*100
31-Jan-18	A	87,500	7,3256,E-07	540	0,002	0,0008	0,00124	0,00040	0,00085	68,2
28-Feb-18	B	93,650	1,8831,E-06	540	0,004	0,0018	0,00304	0,00102	0,00203	66,6
30-Apr-18	C	94,950	1,6628,E-06	540	0,004	0,0004	0,00221	0,00090	0,00131	59,3
31-Jan-19	D	96,400	2,4878,E-06	540	0,005	0,0006	0,00291	0,00134	0,00156	53,8
30-Apr-19	E	101,400	2,4077,E-06	540	0,006	0,0008	0,00346	0,00130	0,00216	62,4
30-Sep-19	F	99,200	2,7896,E-06	540	0,006	0,0008	0,00320	0,00151	0,00170	53,0
31-Dec-19	G	98,500	2,0830,E-06	540	0,005	0,0010	0,00325	0,00112	0,00212	65,3
29-Feb-20	H	100,119	3,2635,E-06	540	0,007	0,0016	0,00427	0,00176	0,00251	58,7
30-Apr-20	I	99,735	2,9143,E-06	540	0,005	0,0015	0,00317	0,00157	0,00160	50,4
30-Sep-20	J	98,834	2,0715,E-06	540	0,004	0,0008	0,00262	0,00112	0,00150	57,4
31-Dec-20	K	98,690	3,1369,E-06	540	0,006	0,0010	0,00329	0,00169	0,00159	48,4

Sumber: Hasil Analisis (2021)

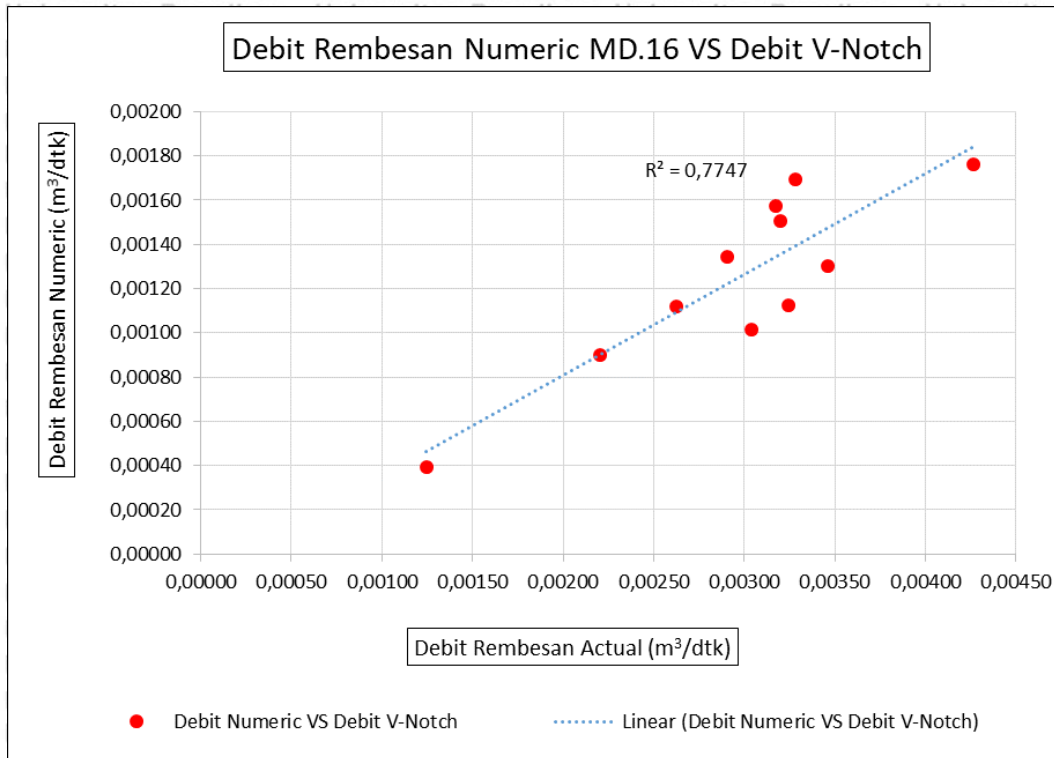
Sedangkan untuk mengetahui pengaruh perubahan muka air waduk terhadap debit rembesan menggunakan analisis *numeric* yang terjadi pada tubuh bendungan di lokasi MD.16 (STA 0+420) pada alat instrumen V-Notch, maka dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.55.



Gambar 4.55. Perubahan Tinggi Muka Air Terhadap Debit Rembesan *Actual* dan *Numeric* (MD.16, STA 0+420)

Berdasarkan Tabel 4.21. dapat ditentukan korelasi atau hubungan antara nilai debit rembesan *actual* dan *numeric* (MD.16 – STA 0+420), dapat dilihat pada gambar 4.56.





Gambar 4.56. Korelasi Antara Nilai Debit Rembesan *Actual* dan *Numeric* (MD.16, STA 0+420)

Berdasarkan nilai korelasi ( $R^2$ ) debit rembesan antara hasil *actual* dan *numeric* sebesar 0,7747, ini memiliki hubungan korelasi yang kuat.

#### 4.5.5. Validasi Data *Actual* dan Hasil *Numeric* (*Multilayer Settlement*) MD.11

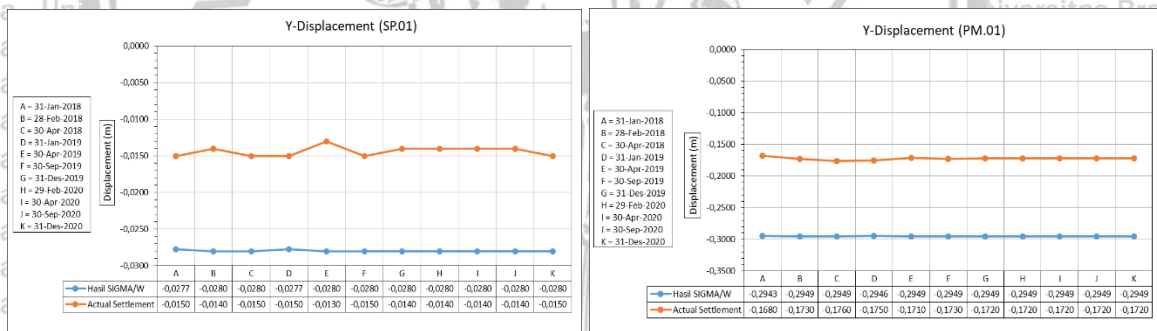
Data hasil pembacaan instrumen di lapangan (data *actual*) dibandingkan dengan hasil hasil analisis *numeric* (SIGMA/W). Validasi ini dilakukan berdasarkan beberapa tanggal dalam rentang waktu yaitu Januari 2018 – Desember 2020, untuk melihat lebih jelas bagaimana hasil analisis SIGMA/W dan data *actual multilayer settlement* di lokasi MD.11 (STA 0+320) maka dapat dilihat pada Tabel 4.22.

Tabel 4.22. Hasil Analisis SIGMA/W dan Data Actual Multilayer Settlement - MD.11 (STA 0+320)

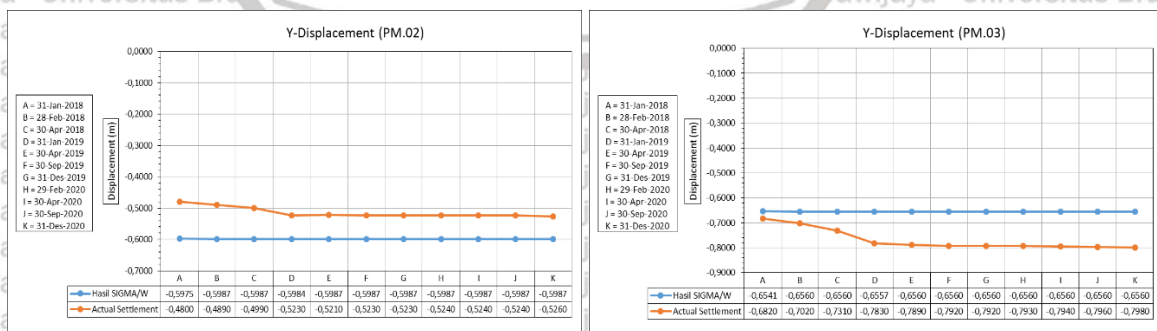
Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Settlement
TMA (m)	87,500	93,650	94,950	96,400	101,400	99,200	98,500	100,119	99,735	98,834	98,690	2018 - 2020
Date (day)	31-Jan-18	28-Feb-18	30-Apr-18	31-Jan-19	30-Apr-19	30-Sep-19	31-Dec-19	29-Feb-20	30-Apr-20	30-Sep-20	31-Dec-20	Deviasi (m)
Hasil SIGMA/W (m)	SP.01	-0,0277	-0,0280	-0,0280	-0,0277	-0,0280	-0,0280	-0,0280	-0,0280	-0,0280	-0,0280	0,0003
	PM.01	-0,2943	-0,2949	-0,2949	-0,2946	-0,2949	-0,2949	-0,2949	-0,2949	-0,2949	-0,2949	0,0006
	PM.02	-0,5975	-0,5987	-0,5987	-0,5984	-0,5987	-0,5987	-0,5987	-0,5987	-0,5987	-0,5987	0,0012
	PM.03	-0,6541	-0,6560	-0,6560	-0,6557	-0,6560	-0,6560	-0,6560	-0,6560	-0,6560	-0,6560	0,0019
	PM.04	-0,5714	-0,5742	-0,5742	-0,5738	-0,5742	-0,5742	-0,5742	-0,5742	-0,5742	-0,5742	0,0028
PM.05	-0,4124	-0,4165	-0,4165	-0,4162	-0,4165	-0,4165	-0,4165	-0,4165	-0,4165	-0,4165	0,0041	
Actual Settlement (m)	SP.01	-0,0150	-0,0140	-0,0150	-0,0150	-0,0130	-0,0150	-0,0140	-0,0140	-0,0140	-0,0150	0,0000
	PM.01	-0,1680	-0,1730	-0,1760	-0,1750	-0,1710	-0,1730	-0,1720	-0,1720	-0,1720	-0,1720	0,0040
	PM.02	-0,4800	-0,4890	-0,4990	-0,5230	-0,5210	-0,5230	-0,5230	-0,5240	-0,5240	-0,5240	0,0460
	PM.03	-0,6820	-0,7020	-0,7310	-0,7830	-0,7890	-0,7920	-0,7920	-0,7930	-0,7940	-0,7960	0,1160
	PM.04	-0,8130	-0,8450	-0,8800	-0,9330	-1,0010	-1,0230	-1,0240	-1,0300	-1,0320	-1,0360	0,2270
PM.05	-0,6920	-0,7290	-0,7670	-0,8250	-0,9280	-0,9790	-0,9850	-0,9930	-0,9960	-1,0030	-1,0090	0,3170
PWP Hasil SEEP/W (kPa)	SP.01	70,83	113,49	120,62	128,41	152,18	142,88	140,62	150,05	147,11	140,50	138,98
	PM.01	41,51	85,17	92,41	100,29	123,55	114,91	112,81	122,38	119,43	112,41	110,72
	PM.02	-16,45	34,37	42,66	51,47	70,85	68,50	66,46	76,31	74,66	65,11	62,09
	PM.03	-70,43	-10,13	0,02	10,92	29,13	33,49	29,06	38,14	40,26	29,30	25,53
	PM.04	-129,75	-63,55	-51,21	-37,49	-6,79	-9,94	-16,45	-4,75	-3,50	-14,39	-17,67
PM.05	-187,14	-119,89	-106,98	-92,24	-49,72	-61,57	-69,31	-54,28	-55,05	-66,36	-69,66	

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Sedangkan untuk mengetahui pengaruh tekanan air pori terhadap settlement yang terjadi pada tubuh bendungan di lokasi MD.11 (STA 0+320) pada setiap alat instrumen piezometer (SP.01 – PM.05), maka dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.57 – gambar 4.59 dibawah ini.



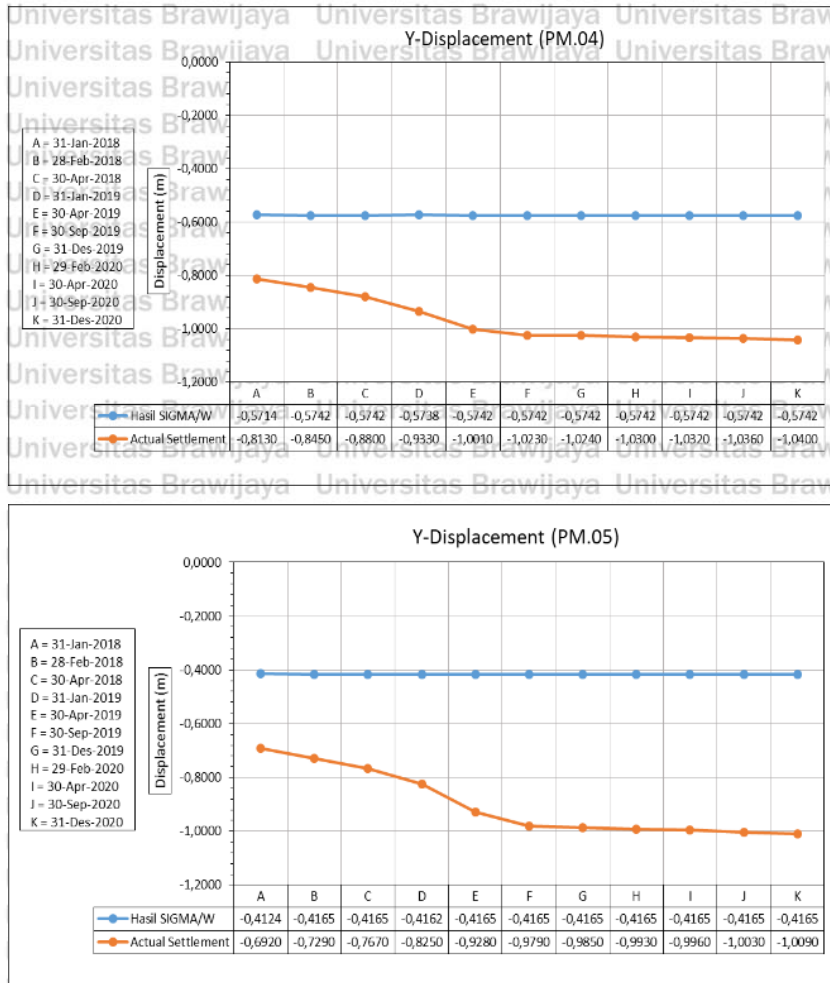
Gambar 4.57. Pengaruh PWP Terhadap Settlement (SP.01, PM.01) – MD.11



Gambar 4.58. Pengaruh PWP Terhadap Settlement (PM.02, PM.03) – MD.11







Gambar 4.59. Pengaruh PWP Terhadap *Settlement* (PM.04, PM.05) – MD.11

Deviasi yang terjadi antara bacaan *actual multilayer settlement* dan hasil *numeric SIGMA/W* yang terletak pada MD.11 (STA 0+320) selama periode 2 tahun (2018-2020), dapat dilihat nilai deviasi *settlement* yang lebih detail pada tabel 4.23.

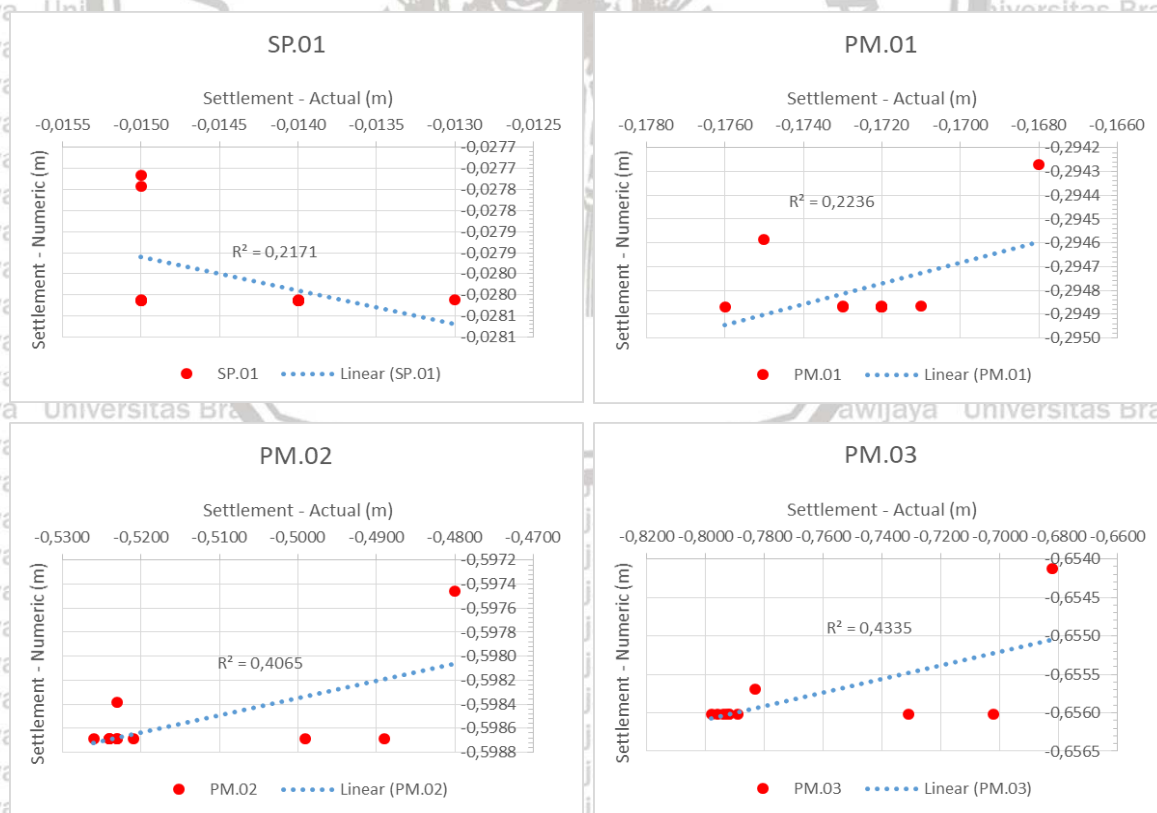
Tabel 4.23. Deviasi Bacaan *Multilayer Settlement Actual* dan Hasil *Numeric SIGMA/W* – MD.11 (STA 0+320)

Code	Elv. Muka Air (m)	Date (day)	Deviasi Settlement (m)					
			SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05
A	87,500	31-Jan-18	-0,0127	-0,1263	-0,1175	0,0279	0,2416	0,2796
B	93,650	28-Feb-18	-0,0140	-0,1219	-0,1097	0,0460	0,2708	0,3125
C	94,950	30-Apr-18	-0,0130	-0,1189	-0,0997	0,0750	0,3058	0,3505
D	96,400	31-Jan-19	-0,0127	-0,1196	-0,0754	0,1273	0,3592	0,4088
E	101,400	30-Apr-19	-0,0150	-0,1239	-0,0777	0,1330	0,4268	0,5115
F	99,200	30-Sep-19	-0,0130	-0,1219	-0,0757	0,1360	0,4488	0,5625
G	98,500	31-Dec-19	-0,0140	-0,1229	-0,0757	0,1360	0,4498	0,5685
H	100,119	29-Feb-20	-0,0140	-0,1229	-0,0747	0,1370	0,4558	0,5765
I	99,735	30-Apr-20	-0,0140	-0,1229	-0,0747	0,1380	0,4578	0,5795
J	98,834	30-Sep-20	-0,0140	-0,1229	-0,0747	0,1400	0,4618	0,5865
K	98,690	31-Dec-20	-0,0130	-0,1229	-0,0727	0,1420	0,4658	0,5925

**Catatan:**  
 Jika Deviasi (+) : Bacaan Actual < Numerik  
 Jika Deviasi (-) : Bacaan Actual > Numerik  
 Max Deviasi 0,5925  
 Min Deviasi -0,0127

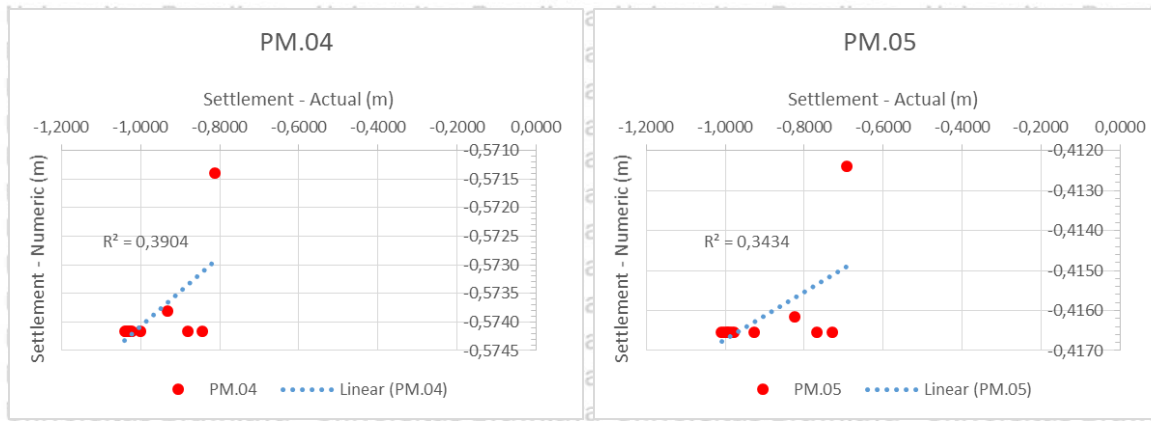
Sumber: Hasil Analisis (2021)

Berdasarkan Tabel 4.22. dapat ditentukan korelasi atau hubungan antara nilai *settlement actual* dan *numeric* (MD.11 – STA 0+320), dapat dilihat pada gambar 4.60 dan gambar 4.61 di bawah ini.



Gambar 4.60. Korelasi Antara Nilai *Settlement Actual* dan *Numeric* VP.01 – VP.03 (MD.11 – STA 0+320)





Gambar 4.61. Korelasi Antara Nilai *Settlement Actual* dan *Numeric* VP.04 – VP.05 (MD.11 – STA 0+320)

Sedangkan untuk mengetahui bagaimana tingkat hubungan kedua variabel tersebut maka dapat dilihat pada tabel 4.24.

Tabel 4.24. Tingkat Hubungan Antara Nilai *Settlement Actual* dan *Numeric* (MD.11 – STA 0+320)

Piezometer	Korelasi ( $R^2$ )	Tingkat Hubungan
SP.01	0,2171	Rendah
PM.01	0,2236	Rendah
PM.02	0,4065	Sedang
PM.03	0,4335	Sedang
PM.04	0,3904	Rendah
PM.05	0,3434	Rendah

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Hasil pemodelan dengan analisis *numeric* SIGMA/W menunjukkan deviasi atau terjadi perbedaan dengan hasil *actual* pembacaan instrumen *multilayer settlement*. Menurut Undayani Cita Sari, et al (2019) saat melakukan penelitian tentang *settlement* pada Bendungan Sermo di Indonesia, hal ini disebabkan oleh sifat yang tidak dapat dihindari dari rekayasa bendungan tanggul, seperti sifat tanah yang mungkin terpengaruh oleh cuaca atau metode konstruksi kontraktor. Akibatnya pada saat penimbunan pertama, besarnya penurunan pada timbunan tanah bergantung pada kualitas material dan tingkat pemadatannya. Dengan meningkatnya penggunaan urugan tanah bermutu rendah, penurunan yang signifikan menjadi lebih umum, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan di badan bendungan dan kerusakan pada struktur kaku di puncak bendungan.

Menurut M. H. Aminfar et al. (2016) yang melakukan penelitian pada Bendungan Mahadap di Iran menyatakan bahwa Parameter yang berperan efektif dalam terjadinya penurunan pada bendungan Mahabad adalah: (a) jenis material yang digunakan dan kekakuannya yang rendah, (b) bentuk geometris bendungan yang tidak sesuai, (c) pemadatan yang rendah pada inti bendungan sehingga mengakibatkan konsolidasi terjadi.

#### 4.5.6. Validasi Data Actual dan Hasil Numeric (*Multilayer Settlement*) MD.17

Data hasil pembacaan instrumen di lapangan (*data actual*) dibandingkan dengan hasil hasil analisis *numeric* (SIGMA/W). Validasi ini dilakukan berdasarkan beberapa tanggal dalam rentang waktu yaitu Januari 2018 – Desember 2020, untuk melihat lebih jelas bagaimana hasil analisis SIGMA/W dan data *actual multilayer settlement* di lokasi MD.17 (STA 0+443,4) maka dapat dilihat pada Tabel 4.25.

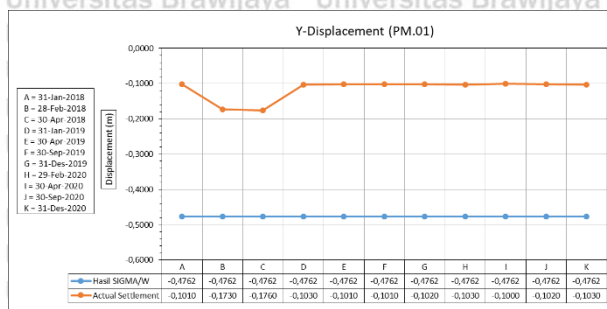
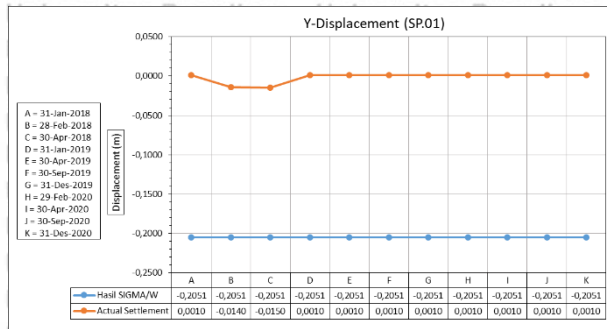
Tabel 4.25. Hasil Analisis SIGMA/W dan Data Actual *Multilayer Settlement* - MD.17 (STA 0+443,4)

Code	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Settlement	
TMA (m)	87,500	93,650	94,950	96,400	101,400	99,200	98,500	100,119	99,735	98,834	98,690	2018 - 2020	
Date (day)	31-Jan-18	28-Feb-18	30-Apr-18	31-Jan-19	30-Apr-19	30-Sep-19	31-Dec-19	29-Feb-20	30-Apr-20	30-Sep-20	31-Dec-20	Deviasi (m)	
Hasil SIGMA/W (m)	SP.01	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	-0,2051	0,0000	
	PM.01	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	-0,4762	0,0000	
	PM.02	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	-0,7536	0,0000	
	PM.03	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	-0,8050	0,0000	
	PM.04	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	-0,7248	0,0000	
	PM.05	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	-0,5614	0,0000	
Actual Settlement (m)	SP.01	0,0010	-0,0140	-0,0150	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000	
	PM.01	-0,1010	-0,1730	-0,1760	-0,1030	-0,1010	-0,1010	-0,1020	-0,1030	-0,1000	-0,1020	0,0020	
	PM.02	-0,4840	-0,4890	-0,4990	-0,5080	-0,5100	-0,5080	-0,5090	-0,5100	-0,5080	-0,5110	-0,5120	0,0280
	PM.03	-0,6940	-0,7020	-0,7310	-0,7890	-0,7940	-0,7950	-0,7970	-0,7970	-0,7980	-0,8010	-0,8020	0,1080
	PM.04	-0,7780	-0,8450	-0,8800	-0,9200	-0,9500	-0,9590	-0,9620	-0,9660	-0,9660	-0,9700	-0,9710	0,1930
	PM.05	-0,7230	-0,7290	-0,7670	-0,8810	-0,9810	-1,0420	-1,0520	-1,0580	-1,0610	-1,0690	-1,0710	0,3480
PWP Hasil SEEP/W (kPa)	SP.01	79,21	117,49	132,66	134,10	176,42	144,09	140,95	167,97	145,27	156,81	147,01	
	PM.01	50,33	89,12	106,61	105,59	152,47	116,67	113,61	143,55	117,33	132,01	118,41	
	PM.02	-0,70	42,37	65,92	57,05	116,93	76,70	73,56	106,64	75,47	96,01	68,48	
	PM.03	-53,27	0,56	24,49	15,16	77,54	46,58	41,97	66,39	45,98	59,62	23,99	
	PM.04	-110,43	-45,67	-23,13	-24,95	33,89	9,89	3,60	22,55	12,03	15,45	-12,81	
	PM.05	-169,94	-102,65	-79,60	-77,31	-14,64	-38,97	-46,79	-27,25	-34,83	-37,21	-57,90	
PM.06	-228,43	-161,04	-137,94	-135,38	-70,85	-96,28	-104,47	-84,26	-91,67	-94,95	-114,94		

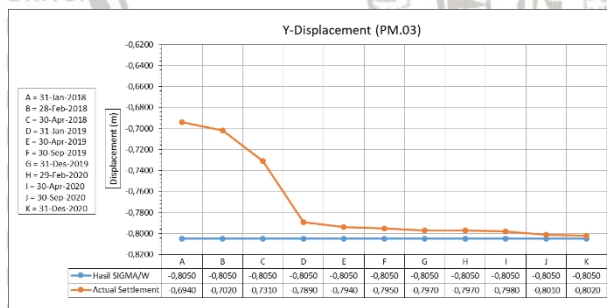
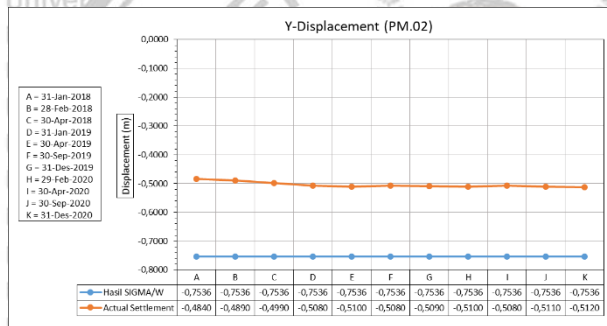
Sumber: Hasil Analisis (2021)

Sedangkan untuk mengetahui pengaruh tekanan air pori terhadap *settlement* yang terjadi pada tubuh bendungan di lokasi MD.17 (STA 0+443,4) pada setiap alat instrumen *piezometer* (SP.01 – PM.06), maka dapat dilihat secara jelas pada gambar 4.62 – gambar 4.64 dibawah ini.





Gambar 4.62. Pengaruh PWP Terhadap Settlement (SP.01, PM.01) – MD.17



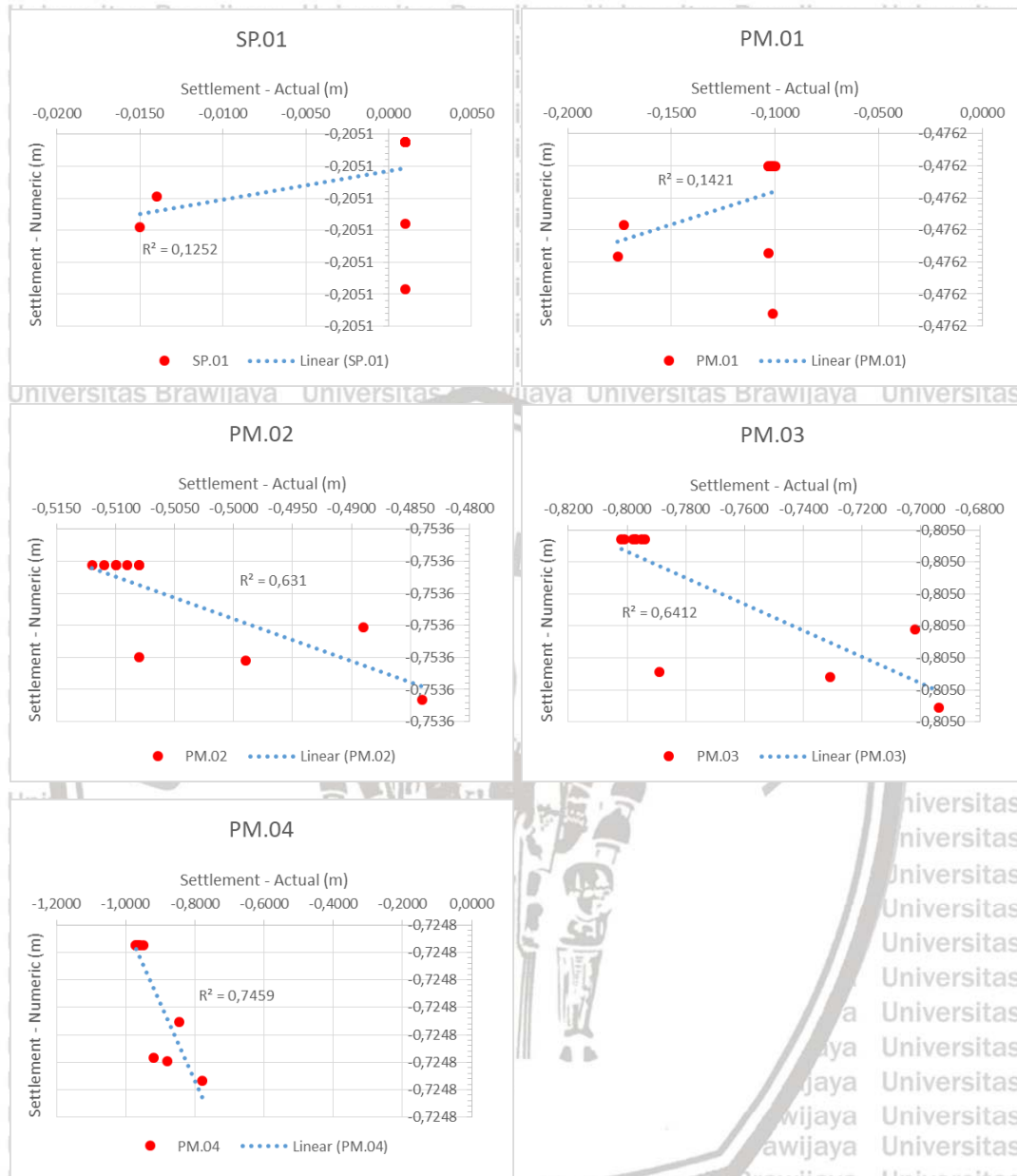
Gambar 4.63. Pengaruh PWP Terhadap Settlement (PM.02, PM.03) – MD.17



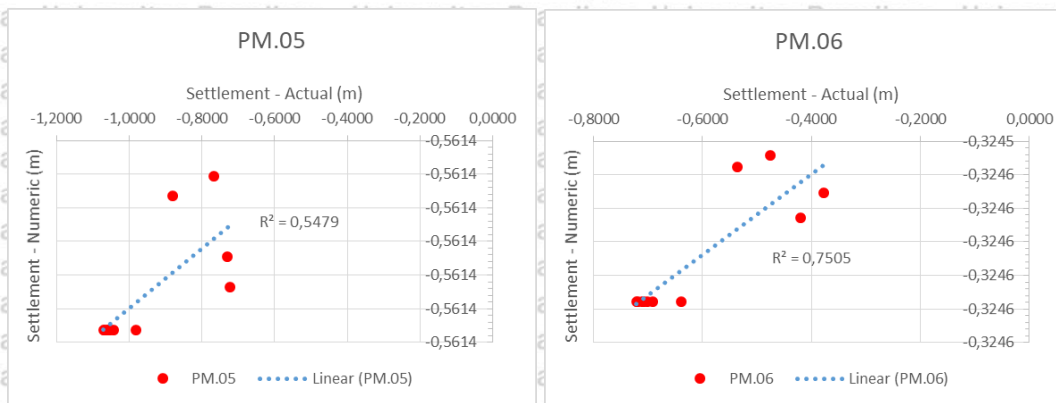




Berdasarkan Tabel 4.25, dapat ditentukan korelasi atau hubungan antara nilai *settlement actual* dan *numeric* (MD.17 – STA 0+443,4), dapat dilihat pada gambar 4.65 – gambar 4.66.



Gambar 4.65. Korelasi Antara Nilai *Settlement Actual* dan *Numeric*, SP.01 – PM.04 (MD.17 – STA 0+443,4)



Gambar 4.66. Korelasi Antara Nilai *Settlement Actual* dan *Numeric*, PM.05 – PM.06

(MD.17 – STA 0+443,4)

Sedangkan untuk mengetahui bagaimana tingkat hubungan kedua variabel tersebut maka dapat dilihat pada tabel 4.27.

Tabel 4.27. Tingkat Hubungan Antara Nilai *Settlement Actual* dan *Numeric*

(MD.17 – STA 0+443,4)

Piezometer	Korelasi ( $R^2$ )	Tingkat Hubungan
SP.01	0,1252	Sangat Rendah
PM.01	0,1421	Sangat Rendah
PM.02	0,6310	Kuat
PM.03	0,6412	Kuat
PM.04	0,7459	Kuat
PM.05	0,5479	Sedang
PM.06	0,7505	Kuat

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Hasil pemodelan dengan analisis *numeric SIGMA/W* menunjukkan deviasi atau terjadi perbedaan dengan hasil *actual* pembacaan instrumen *multilayer settlement*. Menurut Mohammad Rashidi et al. (2017) saat melakukan penelitian tentang *settlement* pada Bendungan Gavosham di Iran, hal ini disebabkan oleh tanah di sekitar instrumen dipadatkan dengan kepadatan yang lebih rendah dibandingkan dengan bagian lain dari inti bendungan dengan tujuan untuk mencegah kerusakan pada instrumen. Akibatnya, kekakuan tanah di sekitar instrumen lebih rendah dibandingkan dengan di bagian lain pada inti bendungan.



#### 4.6. Batas Maksimum Faktor Keamanan Terhadap Debit Rembesan dan *Settlement*

Batas maksimum terhadap faktor keamanan akan ditinjau dari rembesan dan *settlement* yang terjadi berdasarkan hasil analisis *numeric* (analisis SEEP/W dan analisis SIGMA/W) serta hasil pengamatan dilapangan atau hasil *actual* (pengamatan instrumen *V-Notch* dan pengamatan *multilayer settlement*). Nilai hasil analisis *numeric* dan hasil *actual* pengamatan di lapangan tidak boleh melebihi batas maksimum yang diijinkan untuk debit rembesan serta penurunan yang terjadi pada bendungan Raknamo.

##### 4.6.1. Batas Maksimum Faktor Keamanan Terhadap Debit Rembesan

Batasan maksimum debit rembesan pada hasil analisis *numeric* dan pengamatan *actual* dilapangan yang diijinkan terjadi pada bendungan Raknamo ada 3 batasan minimum debit rembesan:

###### 1. Batas maksimum rembesan menurut “Look, 2007”

Kuantitas rembesan *actual* dapat dihitung dengan *V-Notch Weir*, sedangkan untuk kuantitas rembesan *numeric* dapat dihitung dengan analisis SEEP/W. Kuantitas rembesan yang ditoleransi berkaitan dengan jumlah kuantitas rembesan yang diijinkan untuk keamanan bendungan raknamo. Menurut Look, 2007 batas rembesan dikaitkan dengan tinggi bendungan, panjang bendungan utama dan *permeability* dari timbunan inti bendungan. Kuantitas rembesan yang diijinkan pada umumnya dapat dilihat pada Tabel 2.4 pada Bab II maka dari tinggi bendungan Raknamo yaitu 37,0 m, bisa diperoleh batas rembesan maksimum adalah  $0,259 \text{ m}^3/\text{mnt}/\text{m}$ .

Berdasarkan batas rembesan maksimum yang diperoleh maka dapat dilihat pada Tabel 4.28 dan Tabel 4.29, bahwa debit rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan Raknamo akibat perubahan elevasi muka air dari tahun 2018 – tahun 2020, untuk setiap penampang bendungan (MD.10 dan MD.16) serta pada instrumen *V-Notch*. Faktor keamanan terhadap rembesan yang terjadi pada penampang MD.10 dan pembacaan *V-Notch* masih dalam kondisi aman, dapat dilihat pada Tabel 4.28.



Tabel 4.28. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan *Numeric* (MD.10 – STA 0+300) dan *Actual* (Pengamatan *V-Notch*), Look, 2007.

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air (m)	Debit Numeric ( $m^3/dtk/m$ )	Panjang Pondasi (m)	Rerata V-Nocth ( $m^3/dtk$ )	Rerata V-Nocth ( $m^3/dtk/m$ )	Debit Numeric ( $m^3/mnt/m$ )	Rerata V-Nocth ( $m^3/mnt/m$ )	Nilai Ambang ( $m^3/mnt/m$ )	Komentar Debit Numeric	Komentar Debit V-Nocth
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) =(6)/(5)	(8)=(4)*(60)	(9)=(7)*(60)	(10)	(11)	(11)
31-Jan-18	A	87,500	3,0758,E-07	540	0,00124	0,000002	0,00002	0,00014	0,259	Aman	Aman
28-Feb-18	B	93,650	1,0747,E-06	540	0,00304	0,000006	0,00006	0,00034	0,259	Aman	Aman
30-Apr-18	C	94,950	1,2562,E-06	540	0,00221	0,000004	0,00008	0,00025	0,259	Aman	Aman
31-Jan-19	D	96,400	1,4794,E-06	540	0,00291	0,000005	0,00009	0,00032	0,259	Aman	Aman
30-Apr-19	E	101,400	2,8442,E-06	540	0,00346	0,000006	0,00017	0,00038	0,259	Aman	Aman
30-Sep-19	F	99,200	1,9024,E-06	540	0,00320	0,000006	0,00011	0,00036	0,259	Aman	Aman
31-Dec-19	G	98,500	1,8643,E-06	540	0,00325	0,000006	0,00011	0,00036	0,259	Aman	Aman
29-Feb-20	H	100,119	2,0632,E-06	540	0,00427	0,000008	0,00012	0,00047	0,259	Aman	Aman
30-Apr-20	I	99,735	1,8921,E-06	540	0,00317	0,000006	0,00011	0,00035	0,259	Aman	Aman
30-Sep-20	J	98,834	1,8893,E-06	540	0,00262	0,000005	0,00011	0,00029	0,259	Aman	Aman
31-Dec-20	K	98,690	1,8902,E-06	540	0,00329	0,000006	0,00011	0,00037	0,259	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Sedangkan faktor keamanan terhadap rembesan yang terjadi pada penampang MD.16 dan pembacaan *V-Notch* masih dalam kondisi aman, dapat dilihat pada Tabel 4.29.

Tabel 4.29. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan *Numeric* (MD.16 – STA 0+420) dan *Actual* (Pengamatan *V-Notch*), Look, 2007.

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air (m)	Debit Numeric ( $m^3/dtk/m$ )	Panjang Pondasi (m)	Rerata V-Nocth ( $m^3/dtk$ )	Rerata V-Nocth ( $m^3/dtk/m$ )	Debit Numeric ( $m^3/mnt/m$ )	Rerata V-Nocth ( $m^3/mnt/m$ )	Nilai Ambang ( $m^3/mnt/m$ )	Komentar Debit Numeric	Komentar Debit V-Nocth
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) =(6)/(5)	(8)=(4)*(60)	(9)=(7)*(60)	(10)	(11)	(11)
31-Jan-18	A	87,500	7,3256,E-07	540	0,00124	0,000002	0,00004	0,00014	0,259	Aman	Aman
28-Feb-18	B	93,650	1,8831,E-06	540	0,00304	0,000006	0,00011	0,00034	0,259	Aman	Aman
30-Apr-18	C	94,950	1,6628,E-06	540	0,00221	0,000004	0,00010	0,00025	0,259	Aman	Aman
31-Jan-19	D	96,400	2,4878,E-06	540	0,00291	0,000005	0,00015	0,00032	0,259	Aman	Aman
30-Apr-19	E	101,400	2,4077,E-06	540	0,00346	0,000006	0,00014	0,00038	0,259	Aman	Aman
30-Sep-19	F	99,200	2,7896,E-06	540	0,00320	0,000006	0,00017	0,00036	0,259	Aman	Aman
31-Dec-19	G	98,500	2,0830,E-06	540	0,00325	0,000006	0,00012	0,00036	0,259	Aman	Aman
29-Feb-20	H	100,119	3,2635,E-06	540	0,00427	0,000008	0,00020	0,00047	0,259	Aman	Aman
30-Apr-20	I	99,735	2,9143,E-06	540	0,00317	0,000006	0,00017	0,00035	0,259	Aman	Aman
30-Sep-20	J	98,834	2,0715,E-06	540	0,00262	0,000005	0,00012	0,00029	0,259	Aman	Aman
31-Dec-20	K	98,690	3,1369,E-06	540	0,00329	0,000006	0,00019	0,00037	0,259	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

## 2. Batas maksimum rembesan menurut “Soedibyo, 2003”

Kuantitas rembesan yang diijinkan pada bendungan sangat berkaitan dengan keamanan bendungan. Menurut Soedibyo, 2003 batasan rembesan pada bendungan urugan yang diijinkan yaitu 2% - 5% rata-rata debit *inflow* yang masuk ke dalam waduk. Berdasarkan Laporan Akhir - Sertifikasi Desain Bendungan Raknamo, 2014 memiliki rata-rata debit *inflow* sebesar  $0,6994 m^3/dtk$ . Kuantitas rembesan yang diijinkan yang dipakai adalah 2% dari debit *inflow* yaitu sebesar  $0,014 m^3/dtk$ .



Berdasarkan batas maksimum debit rembesan yang diperoleh maka dapat dilihat pada Tabel 4.30 dan Tabel 4.31, bahwa debit rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan Raknamo akibat perubahan elevasi muka air dari tahun 2018 – tahun 2020, untuk setiap penampang bendungan (MD.10 dan MD.16) serta pada instrumen *V-Notch*. Faktor keamanan terhadap rembesan yang terjadi pada penampang MD.10 dan pembacaan *V-Notch* masih dalam kondisi aman, dapat dilihat pada Tabel 4.30.

Tabel 4.30. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan *Numeric* (MD.10 – STA 0+300) dan *Actual* (Pengamatan *V-Notch*), Soebidyo, 2003.

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air	Debit Numeric	Rerata V-Nocth	Debit Rerata Inflow	Nilai Ambang Debit Rembesan	Komentar Debit Numeric	Komentar Debit V-Notch
		(m)	(m <sup>3</sup> /dtk)	(m <sup>3</sup> /dtk)	(m <sup>3</sup> /dtk)	(m <sup>3</sup> /dtk)	(8)	(9)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(2%)*(6)	(8)	(9)
31-Jan-18	A	87,500	0,00017	0,00124	0,6994	0,014	Aman	Aman
28-Feb-18	B	93,650	0,00058	0,00304	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Apr-18	C	94,950	0,00068	0,00221	0,6994	0,014	Aman	Aman
31-Jan-19	D	96,400	0,00080	0,00291	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Apr-19	E	101,400	0,00154	0,00346	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Sep-19	F	99,200	0,00103	0,00320	0,6994	0,014	Aman	Aman
31-Dec-19	G	98,500	0,00101	0,00325	0,6994	0,014	Aman	Aman
29-Feb-20	H	100,119	0,00111	0,00427	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Apr-20	I	99,735	0,00102	0,00317	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Sep-20	J	98,834	0,00102	0,00262	0,6994	0,014	Aman	Aman
31-Dec-20	K	98,690	0,00102	0,00329	0,6994	0,014	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Sedangkan faktor keamanan terhadap rembesan yang terjadi pada penampang MD.16 dan pembacaan *V-Notch* masih dalam kondisi aman, dapat dilihat pada Tabel 4.31.

Tabel 4.31. Faktor Keamanan Terhadap Rembesan *Numeric* (MD.16 – STA 0+420) dan *Actual* (Pengamatan *V-Notch*), Soebidyo, 2003.

Tanggal	Code	Tinggi	Debit	Rerata	Debit Rerata	Nilai Ambang	Komentar Debit Numeric	Komentar Debit V-Notch
		Muka Air (m)	Numeric (m <sup>3</sup> /dtk)	V-Nocth (m <sup>3</sup> /dtk)	Inflow (m <sup>3</sup> /dtk)	Debit Rembesan (m <sup>3</sup> /dtk)		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)=(2%)*(6)	(8)	(9)
31-Jan-18	A	87,500	0,00040	0,00124	0,6994	0,014	Aman	Aman
28-Feb-18	B	93,650	0,00102	0,00304	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Apr-18	C	94,950	0,00090	0,00221	0,6994	0,014	Aman	Aman
31-Jan-19	D	96,400	0,00134	0,00291	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Apr-19	E	101,400	0,00130	0,00346	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Sep-19	F	99,200	0,00151	0,00320	0,6994	0,014	Aman	Aman
31-Dec-19	G	98,500	0,00112	0,00325	0,6994	0,014	Aman	Aman
29-Feb-20	H	100,119	0,00176	0,00427	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Apr-20	I	99,735	0,00157	0,00317	0,6994	0,014	Aman	Aman
30-Sep-20	J	98,834	0,00112	0,00262	0,6994	0,014	Aman	Aman
31-Dec-20	K	98,690	0,00169	0,00329	0,6994	0,014	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Selain aman terhadap rembesan, tubuh bendungan juga harus aman terhadap bahaya piping. Dengan adanya piping dalam tubuh bendungan maka tubuh bendungan tidak aman.

Hal yang menyebabkan terjadinya piping apabila kecepatan kritis ( $V_c$ ) pada tubuh bendungan lebih kecil daripada kecepatan aliran ( $V_s$ ). Agar dapat memastikan tubuh bendungan aman terhadap bahaya piping maka perlu di hitung nilai kecepatan kritis ( $V_c$ ) dari persamaan 2-20. Seperti perhitungan dibawah ini:

Diketahui:

- Diameter butiran ( $d$ ) = 0,05 m
- *Spesifik Gravity* ( $G_s$ ) = 2,673
- Berat efektif tanah ( $W_{ef}$ ) =  $1,09 \times 10^{-4}$  ton
- Percepatan gravitasi ( $g$ ) = 9,78 m/dtk<sup>2</sup>
- Berat jenis air ( $\gamma_w$ ) = 0,997 t/m<sup>3</sup>
- Luas butiran ( $F$ ) =  $(3,14 / 4) \times (0,05^2) = 1,96 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>

$$V_c = \sqrt{\frac{W_{ef} \cdot g}{F \cdot \gamma_w}}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{(1,09 \times 10^{-4}) \times (9,78)}{(1,96 \times 10^{-3}) \times (0,997)}}$$

$$V_c = 7,40 \times 10^{-1} \text{ m/dtk}$$



Untuk dapat mengetahui nilai kecepatan aliran ( $V_s$ ), maka dihitung berdasarkan hasil analisis *numeric* pada titik MD.10 dan titik MD.16, kecepatan aliran ( $V_s$ ) yang dihitung pada inti timbunan bendungan Raknamo. Berdasarkan hasil analisis SEEP/W maka akan diperoleh garis freatik, dimana untuk dapat menentukan elevasi muka air *core* hulu ( $h_1$ ), elevasi muka air *core* hilir ( $h_2$ ) dan panjang freatik pada *core* ( $L$ ), pada penampang MD.10 – STA 0+300 dan MD.16 – STA 0+420. Perhitungan kecepatan aliran ( $V_s$ ) pada inti bendungan Raknamo untuk mengetahui bendungan tersebut aman terhadap piping maka dapat dilihat pada Tabel 4.32 dan Tabel 4.33

Tabel 4.32. Faktor Keamanan Terhadap Piping Pada Hasil Analisis *Numeric* (MD.10 – STA 0+300)

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air (m)	Koef. Permeabilitas (k) (m/dt)	Elevasi Air Core Hulu ( $h_1$ ) (m)	Elevasi Air Core Hilir ( $h_2$ ) (m)	Panjang Freatik Pada Core (L) (m)	Gradien Keluaran (I)	Aliran Filtrasi (Vs) (m/dt)	Aliran Filtrasi Kritis (Vc) (m/dt)	SF Terhadap Piping
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)={{(5)-(6)}/(7)}	(9)=(4)*(8)	(10)	(11)
31-Jan-18	A	87,500	1,19,E-07	85,4970	81,3485	16,700	0,248	2,96,E-08	7,40,E-01	Aman
28-Feb-18	B	93,650	1,19,E-07	93,5319	81,6937	18,623	0,636	7,56,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Apr-18	C	94,950	1,19,E-07	94,8795	81,8395	19,183	0,680	8,09,E-08	7,40,E-01	Aman
31-Jan-19	D	96,400	1,19,E-07	96,3215	81,9969	19,850	0,722	8,59,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Apr-19	E	101,400	1,19,E-07	101,3180	85,2316	20,124	0,799	9,51,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Sep-19	F	99,200	1,19,E-07	99,1391	82,1436	21,484	0,791	9,41,E-08	7,40,E-01	Aman
31-Dec-19	G	98,500	1,19,E-07	98,4260	82,1950	20,972	0,774	9,21,E-08	7,40,E-01	Aman
29-Feb-20	H	100,119	1,19,E-07	100,0570	82,2245	22,039	0,809	9,63,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Apr-20	I	99,735	1,19,E-07	99,6830	82,1085	21,886	0,803	9,56,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Sep-20	J	98,834	1,19,E-07	98,7715	82,1670	21,223	0,782	9,31,E-08	7,40,E-01	Aman
31-Dec-20	K	98,690	1,19,E-07	98,6270	82,1845	21,113	0,779	9,27,E-08	7,40,E-01	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Tabel 4.33. Faktor Keamanan Terhadap Piping Pada Hasil Analisis *Numeric* (MD.16 – STA 0+420)

Tanggal	Code	Tinggi Muka Air (m)	Koef. Permeabilitas (k) (m/dt)	Elevasi Air Core Hulu ( $h_1$ ) (m)	Elevasi Air Core Hilir ( $h_2$ ) (m)	Panjang Freatik Pada Core (L) (m)	Gradien Keluaran (I)	Aliran Filtrasi (Vs) (m/dt)	Aliran Filtrasi Kritis (Vc) (m/dt)	SF Terhadap Piping
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)={{(5)-(6)}/(7)}	(9)=(4)*(8)	(10)	(11)
31-Jan-18	A	87,500	1,19,E-07	86,2845	74,0760	21,201	0,576	6,85,E-08	7,40,E-01	Aman
28-Feb-18	B	93,650	1,19,E-07	93,5620	74,9240	24,374	0,765	9,10,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Apr-18	C	94,950	1,19,E-07	94,8790	74,4585	25,660	0,796	9,47,E-08	7,40,E-01	Aman
31-Jan-19	D	96,400	1,19,E-07	96,0000	74,0000	28,514	0,772	9,18,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Apr-19	E	101,400	1,19,E-07	101,3333	74,6667	30,289	0,880	1,05,E-07	7,40,E-01	Aman
30-Sep-19	F	99,200	1,19,E-07	99,3333	74,6667	28,255	0,873	1,04,E-07	7,40,E-01	Aman
31-Dec-19	G	98,500	1,19,E-07	98,4445	74,5460	28,115	0,850	1,01,E-07	7,40,E-01	Aman
29-Feb-20	H	100,119	1,19,E-07	100,0000	74,0000	30,957	0,840	9,99,E-08	7,40,E-01	Aman
30-Apr-20	I	99,735	1,19,E-07	99,3333	74,6667	28,612	0,862	1,03,E-07	7,40,E-01	Aman
30-Sep-20	J	98,834	1,19,E-07	98,6667	74,6667	28,379	0,846	1,01,E-07	7,40,E-01	Aman
31-Dec-20	K	98,690	1,19,E-07	98,6667	74,0000	29,963	0,823	9,80,E-08	7,40,E-01	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Akibat perubahan tinggi elevasi muka air waduk dari awal tahun 2018 sampai akhir tahun 2020 yang ditunjukkan pada tabel 4.32 dan tabel 4.33 maka nilai kecepatan aliran ( $V_s$ )



lebih kecil dari nilai kecepatan kritis ( $V_c$ ), hal ini dapat dinyatakan bahwa timbunan pada inti bendungan Raknamo masih aman terhadap bahaya piping.

#### 4.6.2. Batas Maksimum Faktor Keamanan Terhadap *Settlement*

Lapisan tanah pada timbunan inti (*core*) bendungan raknamo yang mengalami regangan atau penurunan (*settlement*) ini disebabkan oleh dua akibat, yaitu susunan tanah mengalami perubahan dan rongga pori di dalam tanah timbunan inti tersebut berkurang. Menurut Novak, 2007 batasan penurunan (*settlement*) pada inti bendungan urugan yang diijinkan yaitu berdasarkan persamaan 2-23 dimana;  $Settlement\ Index\ (SI) \leq 0,02 = 0,85\ m$ .

Ketika SI lebih kecil dari faktor keamanan yang ditentukan maka penurunan (*settlement*) yang terjadi masih dikategorikan aman. Untuk dapat mengetahui penurunan (*settlement*) pada penampang MD.11 dan MD.17 dari hasil analisis *numeric* (SIGMA/W) dan *actual* lapangan (*multilayer settlement*) dalam kondisi aman, maka dapat dilihat pada tabel 4.34 sampai tabel 4.37 dibawah ini.

Contoh perhitungan dilakukan pada *multilayer settlement* dengan kode instrumen (SP.01) pada penampang MD.11 (STA 0+320) pada tanggal pengamatan 31 Januari 2018.

Diketahui:

- Tinggi Bendungan (H) = 37 m
- Penurunan Puncak ( $\Delta s$ ) = -0,028 m = 28 mm
- Akhir Konstruksi Timbunan Inti = 1 Mei 2017
- Pengamatan Pertama Instrumen MD.11 (SP.01) = 2 September 2016
- Pengamatan Pertama Instrumen MD.11 (PM.01) = 2 September 2016
- Pengamatan Pertama Instrumen MD.11 (PM.02) = 4 September 2016
- Pengamatan Pertama Instrumen MD.11 (PM.03) = 25 September 2016
- Pengamatan Pertama Instrumen MD.11 (PM.04) = 28 Oktober 2016
- Pengamatan Pertama Instrumen MD.11 (PM.05) = 17 Desember 2016
- Pengamatan kedua Instrumen MD.11 (SP.01) = 31 Januari 2018

Berdasarkan data yang diketahui maka dapat dihitung nilai dari:

- $t_1 = (1\ Mei\ 2017 - 2\ September\ 2016) / 365\ hari$

- $t_1 = 0,7\ Tahun$

- $t_2 = (1\ Mei\ 2017 - 31\ Januari\ 2018) / 365\ hari$

- $t_2 = 0,8\ Tahun$

- $SI = \frac{\Delta s}{1000H t_2/t_1} \leq 0,02$



$$SI = \frac{28}{(1000 \times 37) \{(0,8/0,7)\}} \leq 0,02$$

$$SI = 0,0007 \leq 0,02 \text{ (Inti bendungan Raknamo aman terhadap Settlement)}$$

Perhitungan untuk dapat mengetahui inti bendungan raknamo tidak melebihi batas aman penurunan yaitu 0,85 m, dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.34. Faktor Keamanan Terhadap *Settlement Numeric* (MD.11 – STA 0+320), Novak, 2007

Code	Date (day)	Numeric - SIGMA/W (m)						SF Terhadap Settlement - SIGMA/W					
		SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05
A	31-Jan-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
B	28-Feb-18	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
C	30-Apr-18	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
D	31-Jan-19	0,000	0,000	-0,001	-0,002	-0,002	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
E	30-Apr-19	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
F	30-Sep-19	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
G	31-Dec-19	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
H	29-Feb-20	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
I	30-Apr-20	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
J	30-Sep-20	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
K	31-Dec-20	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,003	-0,004	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Tabel 4.35. Faktor Keamanan Terhadap *Settlement Actual* (MD.11 – STA 0+320), Novak, 2007

Code	Date (day)	Actual - Multilayer Settlement (m)						SF Terhadap Settlement - SIGMA/W					
		SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05
A	31-Jan-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
B	28-Feb-18	0,001	-0,005	-0,009	-0,020	-0,032	-0,037	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
C	30-Apr-18	0,000	-0,008	-0,019	-0,049	-0,067	-0,075	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
D	31-Jan-19	0,000	-0,007	-0,043	-0,101	-0,120	-0,133	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
E	30-Apr-19	0,002	-0,003	-0,041	-0,107	-0,188	-0,236	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
F	30-Sep-19	0,000	-0,005	-0,043	-0,110	-0,210	-0,287	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
G	31-Dec-19	0,001	-0,004	-0,043	-0,110	-0,211	-0,293	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
H	29-Feb-20	0,001	-0,004	-0,044	-0,111	-0,217	-0,301	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
I	30-Apr-20	0,001	-0,004	-0,044	-0,112	-0,219	-0,304	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
J	30-Sep-20	0,001	-0,004	-0,044	-0,114	-0,223	-0,311	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
K	31-Dec-20	0,000	-0,004	-0,046	-0,116	-0,227	-0,317	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)



Tabel 4.36. Faktor Keamanan Terhadap *Settlement Numeric* (MD.17 – STA 0+443,4), Novak, 2007

Code	Date (day)	Numeric - SIGMA/W (m)							SF Terhadap <i>Settlement</i> - SIGMA/W						
		SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	PM.06	SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	PM.06
A	31-Jan-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
B	28-Feb-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
C	30-Apr-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
D	31-Jan-19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
E	30-Apr-19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
F	30-Sep-19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
G	31-Dec-19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
H	29-Feb-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
I	30-Apr-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
J	30-Sep-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
K	31-Dec-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Tabel 4.37. Faktor Keamanan Terhadap *Settlement Actual* (MD.17 – STA 0+443,4), Novak, 2007

Code	Date (day)	Actual - Multilayer Settlement (m)							SF Terhadap <i>Settlement</i> - SIGMA/W						
		SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	PM.06	SP.01	PM.01	PM.02	PM.03	PM.04	PM.05	PM.06
A	31-Jan-18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
B	28-Feb-18	0,013	0,072	0,005	0,008	0,067	0,006	0,043	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
C	30-Apr-18	0,014	0,075	0,015	0,037	0,102	0,044	0,099	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
D	31-Jan-19	0,000	0,002	0,024	0,095	0,142	0,158	0,159	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
E	30-Apr-19	0,000	0,000	0,026	0,100	0,172	0,258	0,262	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
F	30-Sep-19	0,000	0,000	0,024	0,101	0,181	0,319	0,314	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
G	31-Dec-19	0,000	0,001	0,025	0,103	0,184	0,329	0,324	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
H	29-Feb-20	0,000	0,002	0,026	0,103	0,188	0,335	0,331	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
I	30-Apr-20	0,000	0,001	0,024	0,104	0,188	0,338	0,334	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
J	30-Sep-20	0,000	0,001	0,027	0,107	0,192	0,346	0,342	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman
K	31-Dec-20	0,000	0,002	0,028	0,108	0,193	0,348	0,344	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

#### 4.7. Simulasi Operasi Waduk Raknamo

Operasi waduk akan di simulasikan berdasarkan data debit sungai yang ada, data debit sungai akan dianalisis berdasarkan 4 musim debit (Sosrodarsono Suyono, 2003. Hidrologi

Untuk Pengairan: 204) :

- Debit air musim kering: debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 355 hari dalam setahun. Keandalan  $(355/365) \times 100\% = 97,3 \%$
- Debit air rendah: debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 275 hari dalam setahun. Keandalan  $(275/365) \times 100\% = 75,3 \%$
- Debit air normal: debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 185 hari dalam setahun. Keandalan  $(185/365) \times 100\% = 50,7 \%$
- Debit air cukup (affluent): debit yang dilampaui oleh debit-debit sebanyak 95 hari dalam setahun. Keandalan  $(95/365) \times 100\% = 26 \%$



Debit *inflow* dari tahun 1973 – tahun 2013 dapat dilihat pada tabel 4.36.

Tabel 4.38. Analisis Keandalan Debit Berdasarkan 4 Musim Debit

No	Total Debit		Total Debit Terurut		Probabilitas	Keterangan
	Tahun	m <sup>3</sup> /dt	Tahun	m <sup>3</sup> /dt	%	
1	1973	8,748	2005	2,929		
2	1974	12,032	1985	2,974	97,3	Debit Air Musim Kering
3	1975	6,956	1990	4,208		
4	1976	11,565	2007	4,446		
5	1977	7,349	1984	5,011		
6	1978	9,893	1991	5,018		
7	1979	6,405	1998	5,200		
8	1980	13,000	2010	5,462		
9	1981	9,592	2009	5,612		
10	1982	9,938	1983	5,638		
11	1983	5,638	2001	5,841	75,3	Debit Air Rendah
12	1984	5,011	1979	6,405		
13	1985	2,974	1993	6,413		
14	1986	10,886	1975	6,956		
15	1987	7,799	1994	7,010		
16	1988	8,309	2002	7,113		
17	1989	8,787	1992	7,293		
18	1990	4,208	1977	7,349		
19	1991	5,018	2003	7,595		
20	1992	7,293	1996	7,722		
21	1993	6,413	1987	7,799	50,7	Debit Air Normal
22	1994	7,010	1988	8,309		
23	1995	13,289	1973	8,748		
24	1996	7,722	1989	8,787		
25	1997	9,295	1997	9,295		
26	1998	5,200	1981	9,592		
27	1999	13,129	1978	9,893		
28	2000	11,710	1982	9,938		
29	2001	5,841	2012	10,277		
30	2002	7,113	2006	10,381		
31	2003	7,595	1986	10,886	26,0	Debit Air Cukup
32	2004	11,114	2004	11,114		
33	2005	2,929	2011	11,380		
34	2006	10,381	1976	11,565		
35	2007	4,446	2000	11,710		
36	2008	13,055	1974	12,032		
37	2009	5,612	1980	13,000		
38	2010	5,462	2008	13,055		
39	2011	11,380	1999	13,129		
40	2012	10,277	1995	13,289		
41	2013	13,729	2013	13,729		

Sumber: Hasil Analisis (2021)

#### 4.7.1. Simulasi Debit Air Kering

Operasi Waduk yang dilakukan pada simulasi debit air kering, akan dihitung (simulasi Januari - Periode I) seperti contoh dibawah ini:

- Kolom [4]: 15 hari (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [5]:  $0,39 \text{ m}^3/\text{dt}$  (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [6]:  $\{[5] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,39 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 0,50 \text{ juta m}^3$
- Kolom [7]:  $0,94 \text{ l/dt/ha}$  (lihat Tabel 4.3)
- Kolom [8]:  $\{[7] \times \text{Luas Lahan Irigasi}\}/1000$   
 $(0,94 \times 841)/1000 = 0,79 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Kolom [9]:  $\{[8] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,79 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 1,02 \text{ juta m}^3$
- Kolom [10]:  $0,10 \text{ m}^3/\text{dt}$  (lihat Tabel 4.4)
- Kolom [11]:  $\{[10] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,10 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 0,13 \text{ juta m}^3$
- Kolom [12]:  $1,47 \text{ km}^2 \rightarrow$  Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [13]:  $2,67 \text{ mm/hr}$  (lihat Tabel 4.5)
- Kolom [14]:  $\{[13] \cdot [12] \cdot [4] \cdot 10^3\}/10^6$   
 $(2,67 \times 1,47 \times 15 \times 10^3)/10^6 = 0,06 \text{ juta m}^3$
- Kolom [15]:  $[9] + [11]$   
 $1,02 + 0,13 = 1,15 \text{ juta m}^3$
- Kolom [16]:  $[17] + [6] - [14] - [15]$   
 $10,26 + 0,50 - 0,06 - 1,15 = 9,55 \text{ juta m}^3$
- Kolom [17]:  $9,55 \text{ juta m}^3$
- Kolom [18]:  $[17] + [\text{Tampungan Mati}]$   
 $9,55 + 3,83 = 13,38 \text{ juta m}^3$
- Kolom [19]:  $0,00$
- Kolom [20]:  $104,00 \text{ m} \rightarrow$  Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [21]:  $[18] > \text{Tampungan Mati}$ , Maka [21] = Sukses

Untuk mengetahui secara detail hasil perhitungan simulasi waduk debit air kering dapat dilihat pada Tabel 4.39. Sedangkan Tinggi muka Air dapat dilihat pada Gambar 4.67.



Tabel 4.39. Simulasi Waduk Keandalan 97,3% (Debit Air Kering)

Kapasitas tampungan efektif waduk	=	10260632,25	m <sup>3</sup>	10,26	Juta m <sup>3</sup>	Usia Guna Waduk	=	50	thn
Tampungan mati	=	3830300,25	m <sup>3</sup>	3,83	Juta m <sup>3</sup>	Luas daerah irigasi	=	841,00	Ha (Hasil Analisa Hidrologi)
Jumlah periode gagal	=	7				NWL	=	104.000	m <sup>3</sup>
Peluang Keandalan Tampungan	=	81	%			LWL	=	93,650	m
Peluang Kegagalan Tampungan	=	19	%			Kebutuhan air baku	=	0,1	m <sup>3</sup> /dt
Pola Tata Tanam	=	Padi - Polowijo - Polowijo							

Perhitungan Kapasitas Tampungan Waduk (Debit Air Kering - Keandalan 97,3%) Tahun 1973 - Tahun 2013

No	Bulan	Periode	Jumlah Hari	Inflow		Kebutuhan Irigasi			Kebutuhan Air Baku		A	Evaporasi		Total Outflow	S <sub>net</sub>	S akhir periode	S total periode	Spillover	El Mk Air Wdk	Keterangan
				(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(lt/dt/ha)	(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )		(mm/hari)	(juta m <sup>3</sup> )							
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
1	Jan.	1	15	0,39	0,50	0,94	0,79	1,02	0,10	0,13	1,47	2,67	0,06	1,15	9,55	9,55	13,38	0,00	104,000	sukses
2		2	16	0,41	0,57	0,81	0,68	0,94	0,10	0,14	1,42	2,67	0,06	1,08	8,98	8,98	12,81	0,00	104,000	sukses
3	Feb.	1	15	0,53	0,69	0,51	0,43	0,56	0,10	0,13	1,38	3,25	0,07	0,69	8,92	8,92	12,75	0,00	104,000	sukses
4		2	14	0,50	0,60	0,39	0,33	0,40	0,10	0,12	1,38	3,25	0,06	0,52	8,95	8,95	12,78	0,00	104,000	sukses
5	Mar.	1	15	0,28	0,36	0,73	0,61	0,80	0,10	0,13	1,38	3,87	0,08	0,93	8,30	8,30	12,13	0,00	104,000	sukses
6		2	16	0,30	0,41	0,70	0,59	0,81	0,10	0,14	1,34	3,87	0,08	0,95	7,68	7,68	11,51	0,00	104,000	sukses
7	Apr.	1	15	0,14	0,19	0,96	0,81	1,05	0,10	0,13	1,30	5,07	0,10	1,18	6,59	6,59	10,42	0,00	104,000	sukses
8		2	15	0,14	0,19	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,23	5,07	0,09	0,52	6,16	6,16	9,99	0,00	100,920	sukses
9	Mei	1	15	0,01	0,01	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,20	3,70	0,07	0,52	5,59	5,59	9,42	0,00	100,428	sukses
10		2	16	0,01	0,02	0,45	0,38	0,52	0,10	0,14	1,16	3,70	0,07	0,66	4,87	4,87	8,70	0,00	99,793	sukses
11	Jun.	1	15	0,01	0,01	0,63	0,53	0,69	0,10	0,13	1,09	4,17	0,07	0,82	4,00	4,00	7,83	0,00	98,939	sukses
12		2	15	0,01	0,01	0,68	0,57	0,74	0,10	0,13	0,93	4,17	0,06	0,87	3,08	3,08	6,91	0,00	97,904	sukses
13	Jul.	1	15	0,01	0,01	0,76	0,64	0,83	0,10	0,13	0,84	4,45	0,06	0,96	2,08	2,08	5,91	0,00	96,662	sukses
14		2	16	0,01	0,01	0,76	0,64	0,88	0,10	0,14	0,79	4,45	0,06	1,02	1,01	1,01	4,84	0,00	95,233	sukses
15	Agst.	1	15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,71	4,45	0,05	0,13	0,83	0,83	4,66	0,00	94,995	sukses
16		2	16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,14	0,69	4,45	0,05	0,14	0,65	0,65	4,48	0,00	94,708	sukses
17	Sept.	1	15	0,00	0,00	0,42	0,35	0,46	0,10	0,13	0,66	4,72	0,05	0,59	0,02	0,02	3,85	0,00	93,688	sukses
18		2	15	0,00	0,00	0,46	0,39	0,50	0,10	0,13	0,58	4,72	0,04	0,63	-0,65	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
19	Okt.	1	15	0,00	0,00	0,59	0,50	0,64	0,10	0,13	0,58	4,83	0,04	0,77	-0,81	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
20		2	16	0,00	0,00	0,73	0,61	0,85	0,10	0,14	0,58	4,83	0,04	0,99	-1,03	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
21	Nop.	1	15	0,00	0,00	0,72	0,61	0,78	0,10	0,13	0,58	4,57	0,04	0,91	-0,95	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
22		2	15	0,00	0,00	0,75	0,63	0,82	0,10	0,13	0,58	4,57	0,04	0,95	-0,98	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
23	Des.	1	15	0,11	0,14	0,83	0,70	0,90	0,10	0,13	0,58	3,74	0,03	1,03	-0,92	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
24		2	16	0,12	0,16	1,35	1,14	1,57	0,10	0,14	0,58	3,74	0,03	1,71	-1,58	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal

Sumber: Hasil perhitungan

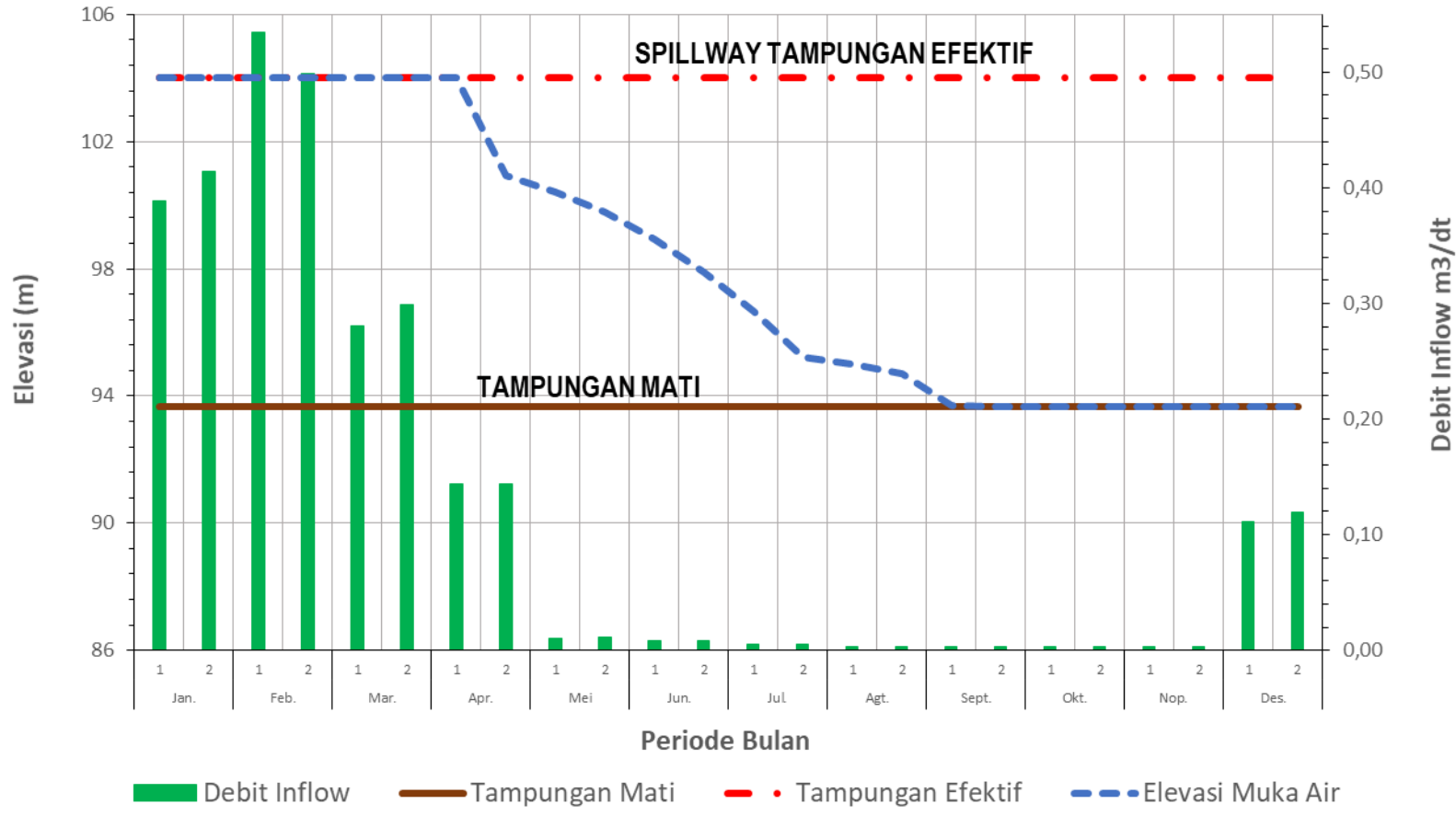
Keterangan :

- |   |  |   |
|---|--|---|
| 1. Diketahui                                  | 9. $[(8) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60] / 10^6$          | 17. Jika (16) < 0 maka (17) = 0   |
| 2. Diketahui                                  | 10. Data Kebutuhan Air Baku                            | - Jika (16) < Kapasitas Tampungan maka (17) = (16)                                    |
| 3. Diketahui                                  | 11. $[(10) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60] / 10^6$        | - Jika (16) > Kapasitas Tampungan maka (17) = Kapasitas Tampungan                     |
| 4. Diketahui                                  | 12. Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknamo | 18. (17) + Tampungan mati   |
| 5. Data Debit Inflow                          | 13. Data Evaporasi                                     | 19. - Jika (16) - (17) < Kapasitas Tampungan Waduk maka (19) = 0                      |
| 6. $[(5) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60] / 10^6$ | 14. $[(13) \cdot (12) \cdot (4) \cdot 10^3] / 10^6$    | - Jika (16) - (17) > Kapasitas Tampungan maka (19) = (16) - Kapasitas Tampungan Waduk |
| 7. Kebutuhan Air Irigasi                      | 15. Total Outflow (9) + (11)                           | 20. Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknamo                                |
| 8. $(7) \cdot \text{Luas Lahan} / 1000$       | 16. $(17) + (8) - (14) - (15)$                         | 21. - Jika (18) < Tampungan Mati maka (21) = Gagal                                    |
|   |  | - Jika (18) > Tampungan Mati maka (21) = Sukses                                       |

Sumber: Hasil Analisis (2021)

## EL. MUKA AIR WADUK DEBIT AIR KERING 97,3%

Tampungan Keandalan 81% mampu melayani Irigasi 841 ha Tanam PADI-POLOWIJO-POLOWIJO dan Kebutuhan Air Baku Hingga Tahun 2060



Gambar 4.67. Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 97,3% (Debit Air Kering)



#### 4.7.2. Simulasi Debit Air Rendah

Operasi Waduk yang dilakukan pada simulasi debit air rendah, akan dihitung (simulasi Januari - Periode I) seperti contoh dibawah ini:

- Kolom [4]: 15 hari (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [5]:  $0,66 \text{ m}^3/\text{dt}$  (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [6]:  $\{[5] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,66 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 0,85 \text{ juta m}^3$
- Kolom [7]:  $0,94 \text{ l/dt/ha}$  (lihat Tabel 4.3)
- Kolom [8]:  $\{[7] \times \text{Luas Lahan Irigasi}\}/1000$   
 $(0,94 \times 841)/1000 = 0,79 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Kolom [9]:  $\{[8] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,79 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 1,02 \text{ juta m}^3$
- Kolom [10]:  $0,10 \text{ m}^3/\text{dt}$  (lihat Tabel 4.4)
- Kolom [11]:  $\{[10] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,10 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 0,13 \text{ juta m}^3$
- Kolom [12]:  $1,47 \text{ km}^2 \rightarrow$  Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [13]:  $2,67 \text{ mm/hr}$  (lihat Tabel 4.5)
- Kolom [14]:  $\{[13] \cdot [12] \cdot [4] \cdot 10^3\}/10^6$   
 $(2,67 \times 1,47 \times 15 \times 10^3)/10^6 = 0,06 \text{ juta m}^3$
- Kolom [15]:  $[9] + [11]$   
 $1,02 + 0,13 = 1,15 \text{ juta m}^3$
- Kolom [16]:  $[17] + [6] - [14] - [15]$   
 $10,26 + 0,85 - 0,06 - 1,15 = 9,95 \text{ juta m}^3$
- Kolom [17]:  $9,90 \text{ juta m}^3$
- Kolom [18]:  $[17] + [\text{Tampungan Mati}]$   
 $9,90 + 3,83 = 13,73 \text{ juta m}^3$
- Kolom [19]:  $0,00$
- Kolom [20]:  $104,00 \text{ m} \rightarrow$  Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [21]:  $[18] > \text{Tampungan Mati}$ , Maka  $[21] = \text{Sukses}$

Untuk mengetahui secara detail hasil perhitungan simulasi waduk debit air rendah dapat dilihat pada Tabel 4.40. Sedangkan Tinggi muka Air dapat dilihat pada Gambar 4.68.

Tabel 4.40. Simulasi Waduk Keandalan 75,3% (Debit Air Rendah)

Kapasitas tampungan efektif waduk	=	10260632,25	m <sup>3</sup>	10,26	Juta m <sup>3</sup>	Usia Guna Waduk	=	50	thn
Tampungan mati	=	3830300,25	m <sup>3</sup>	3,83	Juta m <sup>3</sup>	Luas daerah irigasi	=	841,00	Ha (Hasil Analisa Hidrologi)
Jumlah periode gagal	=	5				NWL	=	104.000	m
Peluang Keandalan Tampungan	=	86	%			LWL	=	93,650	m
Peluang Kegagalan Tampungan	=	14	%			Kebutuhan air baku	=	0,1	m <sup>3</sup> /dt
Pola Tata Tanam	=	Padi - Polowijo - Polowijo							

**Perhitungan Kapasitas Tampungan Waduk (Debit Air Rendah - Keandalan 75,3%) Tahun 1973 - Tahun 2013**

No	Bulan	Periode	Jumlah Hari	Inflow		Kebutuhan Irigasi		Kebutuhan Air Baku		A	Evaporasi		Total Outflow	S <sub>t-1</sub>	S akhir periode	S total periode	Spillover	El Mk Air Wdk	Keterangan	
				(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(lt/dt/ha)	(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /dt)		(juta m <sup>3</sup> )	(mm/hari)								(juta m <sup>3</sup> )
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
															10,26					
1	Jan.	1	15	0,66	0,85	0,94	0,79	1,02	0,10	0,13	1,47	2,67	0,06	1,15	9,90	9,90	13,73	0,00	104,000	sukses
2		2	16	0,70	0,97	0,81	0,68	0,94	0,10	0,14	1,45	2,67	0,06	1,08	9,72	9,72	13,55	0,00	104,000	sukses
3	Feb.	1	15	0,59	0,76	0,51	0,43	0,56	0,10	0,13	1,43	3,25	0,07	0,69	9,73	9,73	13,56	0,00	104,000	sukses
4		2	14	0,55	0,67	0,39	0,33	0,40	0,10	0,12	1,43	3,25	0,07	0,52	9,81	9,81	13,64	0,00	104,000	sukses
5	Mar.	1	15	0,26	0,33	0,73	0,61	0,80	0,10	0,13	1,44	3,87	0,08	0,93	9,14	9,14	12,97	0,00	104,000	sukses
6		2	16	0,27	0,38	0,70	0,59	0,81	0,10	0,14	1,39	3,87	0,09	0,95	8,48	8,48	12,31	0,00	104,000	sukses
7	Apr.	1	15	0,04	0,05	0,96	0,81	1,05	0,10	0,13	1,35	5,07	0,10	1,18	7,25	7,25	11,08	0,00	104,000	sukses
8		2	15	0,04	0,05	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,28	5,07	0,10	0,52	6,68	6,68	10,51	0,00	104,000	sukses
9	Mei	1	15	0,03	0,04	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,24	3,70	0,07	0,52	6,13	6,13	9,96	0,00	100,891	sukses
10		2	16	0,03	0,05	0,45	0,38	0,52	0,10	0,14	1,20	3,70	0,07	0,66	5,45	5,45	9,28	0,00	100,305	sukses
11	Jun.	1	15	0,03	0,04	0,63	0,53	0,69	0,10	0,13	1,15	4,17	0,07	0,82	4,60	4,60	8,43	0,00	99,524	sukses
12		2	15	0,03	0,04	0,68	0,57	0,74	0,10	0,13	1,04	4,17	0,06	0,87	3,70	3,70	7,53	0,00	98,604	sukses
13	Jul.	1	15	0,03	0,03	0,76	0,64	0,83	0,10	0,13	0,90	4,45	0,06	0,96	2,72	2,72	6,55	0,00	97,459	sukses
14		2	16	0,03	0,04	0,76	0,64	0,88	0,10	0,14	0,82	4,45	0,06	1,02	1,67	1,67	5,50	0,00	96,146	sukses
15	Agt.	1	15	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,76	4,45	0,05	0,13	1,52	1,52	5,35	0,00	95,947	sukses
16		2	16	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,10	0,14	0,75	4,45	0,05	0,14	1,36	1,36	5,19	0,00	95,728	sukses
17	Sept.	1	15	0,02	0,03	0,42	0,35	0,46	0,10	0,13	0,74	4,72	0,05	0,59	0,75	0,75	4,58	0,00	94,863	sukses
18		2	15	0,02	0,03	0,46	0,39	0,50	0,10	0,13	0,68	4,72	0,05	0,63	0,10	0,10	3,93	0,00	93,819	sukses
19	Okt.	1	15	0,02	0,02	0,59	0,50	0,64	0,10	0,13	0,58	4,83	0,04	0,77	-0,70	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
20		2	16	0,02	0,02	0,73	0,61	0,85	0,10	0,14	0,58	4,83	0,04	0,99	-1,01	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
21	Nop.	1	15	0,37	0,48	0,72	0,61	0,78	0,10	0,13	0,58	4,57	0,04	0,91	-0,48	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
22		2	15	0,37	0,48	0,75	0,63	0,82	0,10	0,13	0,58	4,57	0,04	0,95	-0,51	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
23	Des.	1	15	0,84	1,09	0,83	0,70	0,90	0,10	0,13	0,58	3,74	0,03	1,03	0,03	0,03	3,86	0,00	93,695	sukses
24		2	16	0,90	1,24	1,35	1,14	1,57	0,10	0,14	0,58	3,74	0,03	1,71	-0,47	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal

Sumber: Hasil perhitungan

**Keterangan :**

- Diketahui
- Diketahui
- Diketahui
- Diketahui
- Data Debit Inflow
- (5) . (4) . (24 . 60 . 60) / 10<sup>6</sup>
- Kebutuhan Air Irigasi
- (7) . Luas Lahan / 1000
- (8) . (4) . (24 . 60 . 60) / 10<sup>6</sup>
- Data Evaporasi
- (10) . (4) . (24 . 60 . 60) / 10<sup>6</sup>
- Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknamo
- Data Evaporasi
- (13) . (12) . (4) . 10<sup>3</sup> / 10<sup>6</sup>
- Total Outflow (9) + (11)
- (17) + (8) - (14) - (15)
- Jika (16) < 0 maka (17) = 0
- Jika (16) < Kapasitas Tampungan maka (17) = (16)
- Jika (16) > Kapasitas Tampungan maka (17) = Kapasitas Tampungan
- (17) + Tampungan mati
- Jika (16) - (17) < Kapasitas Tampungan Waduk maka (19) = 0
- Jika (16) - (17) > Kapasitas Tampungan maka (19) = (16) - Kapasitas Tampungan Waduk
- Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknamo
- Jika (18) < Tampungan Mati maka (21) = Gagal
- Jika (18) > Tampungan Mati maka (21) = Sukses

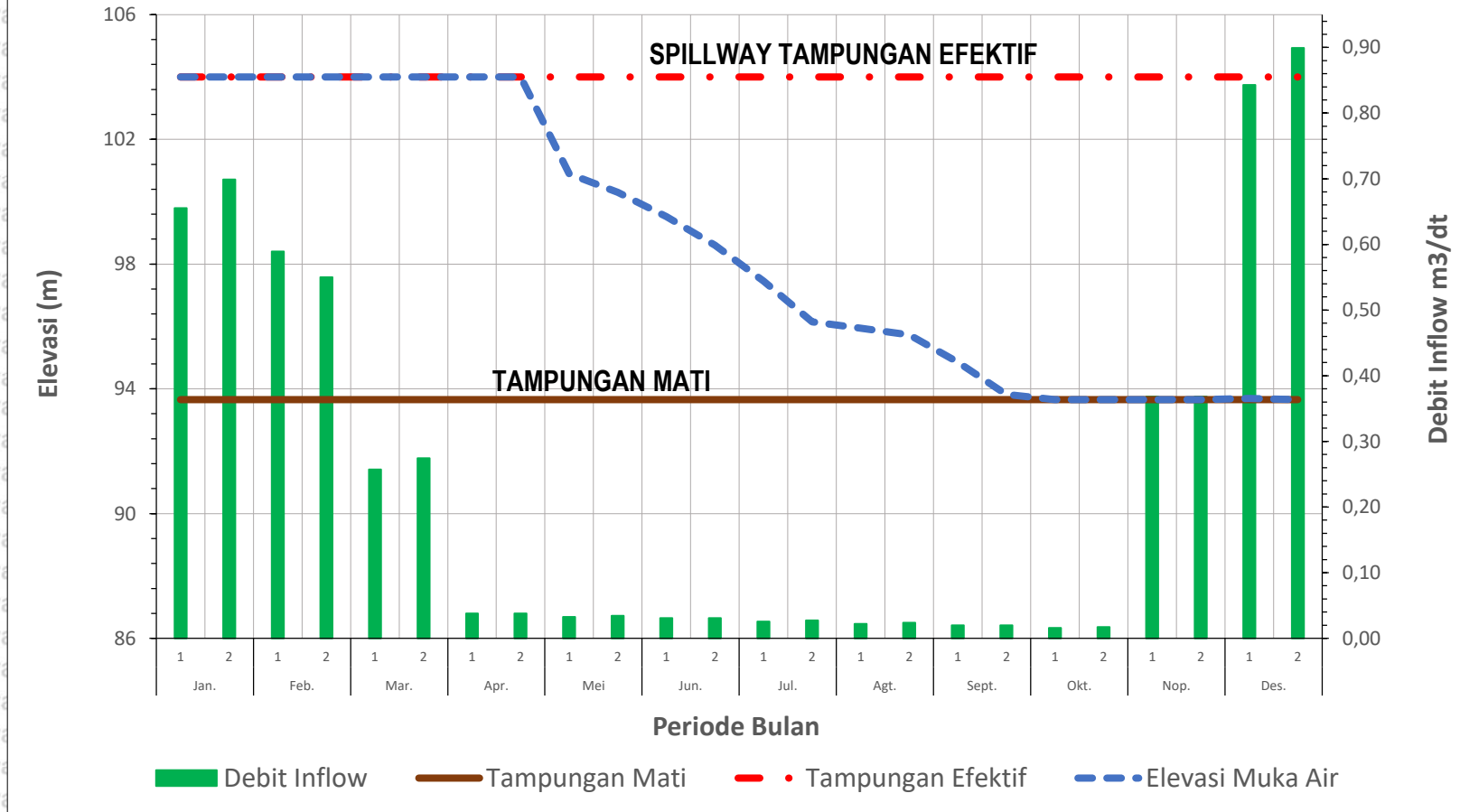
Sumber: Hasil Analisis (2021)





## EL. MUKA AIR WADUK DEBIT AIR RENDAH 75,3%

Tampungan Keandalan 86% mampu melayani Irigasi 841 ha Tanam PADI-POLOWIJO-POLOWIJO dan Kebutuhan Air Baku Hingga Tahun 2060



Gambar 4.68. Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 75,3% (Debit Air Rendah)

### 4.7.3. Simulasi Debit Air Normal

Operasi Waduk yang dilakukan pada simulasi debit air normal, akan dihitung (simulasi Januari - Periode I) seperti contoh dibawah ini:

- Kolom [4]: 15 hari (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [5]:  $0,89 \text{ m}^3/\text{dt}$  (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [6]:  $\{[5] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,89 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 1,15 \text{ juta m}^3$
- Kolom [7]:  $0,94 \text{ l/dt/ha}$  (lihat Tabel 4.3)
- Kolom [8]:  $\{[7] \times \text{Luas Lahan Irigasi}\}/1000$   
 $(0,94 \times 841)/1000 = 0,79 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Kolom [9]:  $\{[8] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,79 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 1,02 \text{ juta m}^3$
- Kolom [10]:  $0,10 \text{ m}^3/\text{dt}$  (lihat Tabel 4.4)
- Kolom [11]:  $\{[10] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\}/10^6$   
 $(0,10 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60)/10^6 = 0,13 \text{ juta m}^3$
- Kolom [12]:  $1,47 \text{ km}^2 \rightarrow$  Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [13]:  $2,67 \text{ mm/hr}$  (lihat Tabel 4.5)
- Kolom [14]:  $\{[13] \cdot [12] \cdot [4] \cdot 10^3\}/10^6$   
 $(2,67 \times 1,47 \times 15 \times 10^3)/10^6 = 0,06 \text{ juta m}^3$
- Kolom [15]:  $[9] + [11]$   
 $1,02 + 0,13 = 1,15 \text{ juta m}^3$
- Kolom [16]:  $[17] + [6] - [14] - [15]$   
 $10,26 + 1,15 - 0,06 - 1,15 = 10,20 \text{ juta m}^3$
- Kolom [17]:  $10,20 \text{ juta m}^3$
- Kolom [18]:  $[17] + [\text{Tampungan Mati}]$   
 $10,20 + 3,83 = 14,03 \text{ juta m}^3$
- Kolom [19]:  $0,00$
- Kolom [20]:  $104,00 \text{ m} \rightarrow$  Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [21]:  $[18] > \text{Tampungan Mati}$ , Maka [21] = Sukses

Untuk mengetahui secara detail hasil perhitungan simulasi waduk debit air normal dapat dilihat pada Tabel 4.41. Sedangkan Tinggi muka Air dapat dilihat pada Gambar 4.69.



Tabel 4.41. Simulasi Waduk Keandalan 50,7% (Debit Air Normal)

Kapasitas tampungan efektif waduk	=	10260632,25	m <sup>3</sup>	10,26	Juta m <sup>3</sup>	Usia Guna Waduk	=	50	thn
Tampungan mati	=	3830300,25	m <sup>3</sup>	3,83	Juta m <sup>3</sup>	Luas daerah irigasi	=	841,00	Ha (Hasil Analisa Hidrologi)
Jumlah periode gagal	=	4				NWL	=	104.000	m
Peluang Keandalan Tampungan	=	89	%			LWL	=	93,650	m
Peluang Kegagalan Tampungan	=	11	%			Kebutuhan air baku	=	0,1	m <sup>3</sup> /dt
Pola Tata Tanam	=	Padi - Polowijo - Polowijo							

Perhitungan Kapasitas Tampungan Waduk (Debit Air Normal - Keandalan 50,7%) Tahun 1973 - Tahun 2013

No	Bulan	Periode	Jumlah Hari	Inflow		Kebutuhan Irigasi			Kebutuhan Air Baku		A	Evaporasi (mm/hari)	Total Outflow (juta m <sup>3</sup> )	S <sub>n-1</sub> (juta m <sup>3</sup> )	S akhir periode (juta m <sup>3</sup> )	S total periode (juta m <sup>3</sup> )	Spillover (juta m <sup>3</sup> )	El Mk Air Wdk (m)	Keterangan	
				(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(l/dt/ha)	(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )										(km <sup>2</sup> )
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
1	Jan.	1	15	0,89	1,15	0,94	0,79	1,02	0,10	0,13	1,47	2,67	0,06	1,15	10,20	10,26	14,09	0,00	104,000	sukses
2		2	16	0,95	1,31	0,81	0,68	0,94	0,10	0,14	1,47	2,67	0,06	1,08	10,37	10,26	14,09	0,11	104,000	sukses
3	Feb.	1	15	1,12	1,45	0,51	0,43	0,56	0,10	0,13	1,47	3,25	0,07	0,69	10,95	10,26	14,09	0,69	104,000	sukses
4		2	14	1,05	1,26	0,39	0,33	0,40	0,10	0,12	1,47	3,25	0,07	0,52	10,94	10,26	14,09	0,68	104,000	sukses
5	Mar.	1	15	0,52	0,67	0,73	0,61	0,80	0,10	0,13	1,47	3,87	0,09	0,93	9,92	9,92	13,75	0,00	104,000	sukses
6		2	16	0,55	0,76	0,70	0,59	0,81	0,10	0,14	1,45	3,87	0,09	0,95	9,64	9,64	13,47	0,00	104,000	sukses
7	Apr.	1	15	0,14	0,18	0,96	0,81	1,05	0,10	0,13	1,43	5,07	0,11	1,18	8,54	8,54	12,37	0,00	104,000	sukses
8		2	15	0,14	0,18	0,56	0,30	0,39	0,10	0,13	1,35	5,07	0,10	0,52	8,09	8,09	11,92	0,00	104,000	sukses
9	Mei	1	15	0,02	0,03	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,33	3,70	0,07	0,52	7,52	7,52	11,35	0,00	104,000	sukses
10		2	16	0,02	0,03	0,45	0,38	0,52	0,10	0,14	1,29	3,70	0,08	0,66	6,81	6,81	10,64	0,00	104,000	sukses
11	Jun.	1	15	0,02	0,02	0,63	0,53	0,69	0,10	0,13	1,25	4,17	0,08	0,82	5,94	5,94	9,77	0,00	100,725	sukses
12		2	15	0,02	0,02	0,68	0,57	0,74	0,10	0,13	1,19	4,17	0,07	0,87	5,01	5,01	8,84	0,00	99,927	sukses
13	Jul.	1	15	0,01	0,02	0,76	0,64	0,83	0,10	0,13	1,11	4,45	0,07	0,96	4,00	4,00	7,83	0,00	98,936	sukses
14		2	16	0,01	0,02	0,76	0,64	0,88	0,10	0,14	0,93	4,45	0,07	1,02	2,93	2,93	6,76	0,00	97,718	sukses
15	Agst.	1	15	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,83	4,45	0,06	0,13	2,76	2,76	6,59	0,00	97,510	sukses
16		2	16	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,10	0,14	0,82	4,45	0,06	0,14	2,58	2,58	6,41	0,00	97,290	sukses
17	Sept.	1	15	0,01	0,01	0,42	0,35	0,46	0,10	0,13	0,81	4,72	0,06	0,59	1,94	1,94	5,77	0,00	96,492	sukses
18		2	15	0,01	0,01	0,46	0,39	0,50	0,10	0,13	0,78	4,72	0,06	0,63	1,27	1,27	5,10	0,00	95,596	sukses
19	Okt.	1	15	0,01	0,01	0,59	0,50	0,64	0,10	0,13	0,73	4,83	0,05	0,77	0,45	0,45	4,28	0,00	94,392	sukses
20		2	16	0,01	0,01	0,73	0,61	0,85	0,10	0,14	0,62	4,83	0,05	0,99	-0,58	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
21	Nop.	1	15	0,18	0,23	0,72	0,61	0,78	0,10	0,13	0,58	4,57	0,04	0,91	-0,73	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
22		2	15	0,18	0,23	0,75	0,63	0,82	0,10	0,13	0,58	4,57	0,04	0,95	-0,76	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
23	Des.	1	15	0,98	1,27	0,83	0,70	0,90	0,10	0,13	0,58	3,74	0,03	1,03	0,20	0,20	4,03	0,00	94,003	sukses
24		2	16	1,04	1,44	1,35	1,14	1,57	0,10	0,14	0,58	3,74	0,03	1,71	-0,10	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal

Sumber: Hasil perhitungan

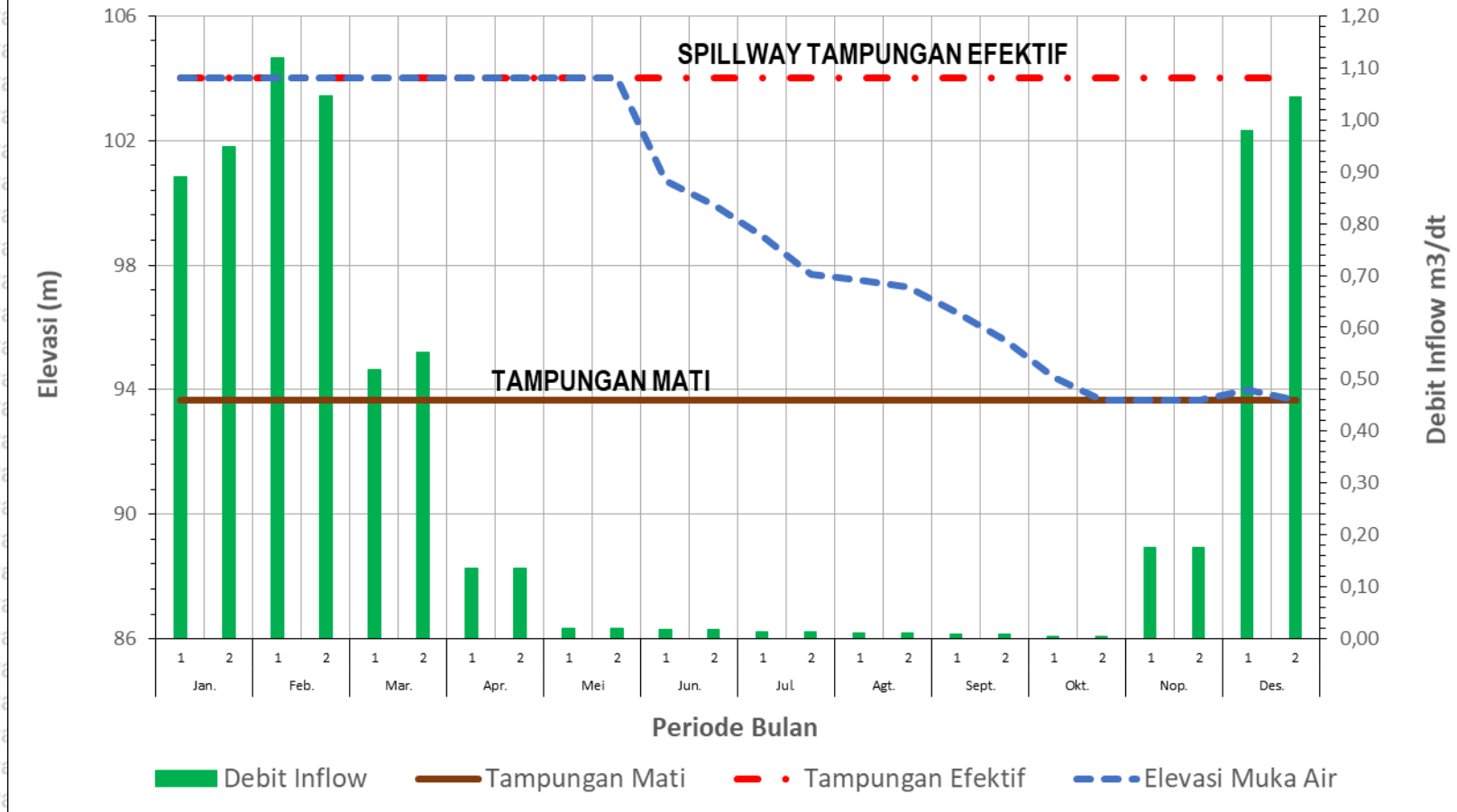
Keterangan :

- |   |  |   |
|---|--|---|
| 1. Diketahui                                | 9. $[(8) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60 / 10^6$           | 17. - Jika (16) < 0 maka (17) = 0   |
| 2. Diketahui                                | 10. Data Kebutuhan Air Baku                            | - Jika (16) < Kapasitas Tampungan maka (17) = (16)                                    |
| 3. Diketahui                                | 11. $[(10) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60 / 10^6$         | - Jika (16) > Kapasitas Tampungan maka (17) = Kapasitas Tampungan                     |
| 4. Diketahui                                | 12. Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknamo | 18. (17) + Tampungan mati   |
| 5. Data Debit Inflow                        | 13. Data Evaporasi                                     | 19. - Jika (16) - (17) < Kapasitas Tampungan Waduk maka (19) = 0                      |
| 6. $(5) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60 / 10^6$ | 14. $[(13) \cdot (12) \cdot (4) \cdot 10^3 / 10^6$     | - Jika (16) - (17) > Kapasitas Tampungan maka (19) = (16) - Kapasitas Tampungan Waduk |
| 7. Kebutuhan Air Irigasi                    | 15. Total Outflow (9) + (11)                           | 20. Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknamo                                |
| 8. $(7) \cdot \text{Luas Lahan} / 1000$     | 16. $(17) + (8) - (14) - (15)$                         | 21. - Jika (18) < Tampungan Mati maka (21) = Gagal                                    |
|   |  | - Jika (18) > Tampungan Mati maka (21) = Sukses                                       |

Sumber: Hasil Analisis (2021)

## EL. MUKA AIR WADUK DEBIT AIR NORMAL 50,7%

Tampungan Keandalan 89% mampu melayani Irigasi 841 ha Tanam PADI-POLOWIJO-POLOWIJO dan Kebutuhan Air Baku Hingga Tahun 2060



Gambar 4.69. Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 50,7% (Debit Air Normal)



#### 4.7.4. Simulasi Debit Air Cukup

Operasi Waduk yang dilakukan pada simulasi debit air cukup, akan dihitung (simulasi Januari - Periode I) seperti contoh dibawah ini:

- Kolom [4]: 15 hari (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [5]: 1,84 m<sup>3</sup>/dt (lihat Tabel 4.2)
- Kolom [6]:  $\{[5] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\} / 10^6$   
 $(1,84 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6 = 2,39 \text{ juta m}^3$
- Kolom [7]: 0,94 l/dt/ha (lihat Tabel 4.3)
- Kolom [8]:  $\{[7] \times \text{Luas Lahan Irigasi}\} / 1000$   
 $(0,94 \times 841) / 1000 = 0,79 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Kolom [9]:  $\{[8] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\} / 10^6$   
 $(0,79 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6 = 1,02 \text{ juta m}^3$
- Kolom [10]: 0,10 m<sup>3</sup>/dt (lihat Tabel 4.4)
- Kolom [11]:  $\{[10] \cdot [4] \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\} / 10^6$   
 $(0,10 \times 15 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6 = 0,13 \text{ juta m}^3$
- Kolom [12]: 1,47 km<sup>2</sup> → Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [13]: 2,67 mm/hr (lihat Tabel 4.5)
- Kolom [14]:  $\{[13] \cdot [12] \cdot [4] \cdot 10^3\} / 10^6$   
 $(2,67 \times 1,47 \times 15 \times 10^3) / 10^6 = 0,06 \text{ juta m}^3$
- Kolom [15]: [9] + [11]  
 $1,02 + 0,13 = 1,15 \text{ juta m}^3$
- Kolom [16]: [17] + [6] - [14] - [15]  
 $10,26 + 2,39 - 0,06 - 1,15 = 11,43 \text{ juta m}^3$
- Kolom [17]: 10,26 juta m<sup>3</sup>
- Kolom [18]: [17] + [Tampungan Mati]  
 $10,26 + 3,83 = 14,09 \text{ juta m}^3$
- Kolom [19]: 0,00
- Kolom [20]: 104,00 m → Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas (lihat Gambar 4.23)
- Kolom [21]: [18] > Tampungan Mati, Maka [21] = Sukses

Untuk mengetahui secara detail hasil perhitungan simulasi waduk debit air cukup dapat dilihat pada Tabel 4.42. Sedangkan Tinggi muka Air dapat dilihat pada Gambar 4.70.

Tabel 4.42. Simulasi Waduk Keandalan 26,6% (Debit Air Cukup)

Kapasitas tampungan efektif waduk	=	10260632,25	m <sup>3</sup>	10,26	Juta m <sup>3</sup>	Usia Guna Waduk	=	50	thn
Tampungan mati	=	3830300,25	m <sup>3</sup>	3,83	Juta m <sup>3</sup>	Luas daerah irigasi	=	841,00	Ha (Hasil Analisa Hidrologi)
Jumlah periode gagal	=	3				NWL	=	104.000	m <sup>3</sup>
Peluang Keandalan Tampungan	=	92	%			LWL	=	93.650	m <sup>3</sup>
Peluang Kegagalan Tampungan	=	8	%			Kebutuhan air baku	=	0,1	m <sup>3</sup> /dt
Pola Tata Tanam	=	Padi - Polowijo - Polowijo							

Perhitungan Kapasitas Tampungan Waduk (Debit Air Cukup - Keandalan 26,6%) Tahun 1973 - Tahun 2013

No	Bulan	Periode	Jumlah Hari	Inflow		Kebutuhan Irigasi		Kebutuhan Air Baku		A	Evaporasi		Total Outflow	S <sub>n+1</sub>	S akhir periode	S total periode	Spillover	El Mk Air Wdk	Keterangan	
				(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(lt/dt/ha)	(m <sup>3</sup> /dt)	(juta m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /dt)		(juta m <sup>3</sup> )	km <sup>2</sup>								(mm/hari)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	[20]	[21]
1	Jan.	1	15	1,84	2,39	0,94	0,79	1,02	0,10	0,13	1,47	2,67	0,06	1,15	11,43	10,26	14,09	0,00	104,000	sukses
2		16	1,96	2,72	0,81	0,68	0,94	0,10	0,14	1,47	2,67	0,06	1,08	11,83	10,26	14,09	1,57	104,000	sukses	
3	Feb.	1	15	1,94	2,51	0,51	0,43	0,56	0,10	0,13	1,47	3,25	0,07	0,69	12,01	10,26	14,09	1,75	104,000	sukses
4		14	1,81	2,19	0,39	0,33	0,40	0,10	0,12	1,47	3,25	0,07	0,52	11,86	10,26	14,09	1,60	104,000	sukses	
5	Mar.	1	15	0,97	1,25	0,73	0,61	0,80	0,10	0,13	1,47	3,87	0,09	0,93	10,50	10,26	14,09	0,24	104,000	sukses
6		16	1,03	1,43	0,70	0,59	0,81	0,10	0,14	1,47	3,87	0,09	0,95	10,64	10,26	14,09	0,38	104,000	sukses	
7	Apr.	1	15	0,47	0,61	0,96	0,81	1,05	0,10	0,13	1,47	5,07	0,11	1,18	9,58	10,26	13,41	0,00	104,000	sukses
8		2	15	0,47	0,61	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,42	5,07	0,11	0,52	9,56	9,56	13,39	0,00	104,000	sukses
9	Mei	1	15	0,14	0,18	0,36	0,30	0,39	0,10	0,13	1,42	3,70	0,08	0,52	9,14	9,14	12,97	0,00	104,000	sukses
10		16	0,15	0,20	0,45	0,38	0,52	0,10	0,14	1,39	3,70	0,08	0,66	8,60	8,60	12,43	0,00	104,000	sukses	
11	Jun.	1	15	0,03	0,04	0,63	0,53	0,69	0,10	0,13	1,36	4,17	0,08	0,82	7,73	7,73	11,56	0,00	104,000	sukses
12		2	15	0,03	0,04	0,68	0,57	0,74	0,10	0,13	1,31	4,17	0,08	0,87	6,81	6,81	10,64	0,00	104,000	sukses
13	Jul.	1	15	0,02	0,03	0,76	0,64	0,83	0,10	0,13	1,25	4,45	0,08	0,96	5,80	5,80	9,63	0,00	100,611	sukses
14		2	16	0,02	0,03	0,76	0,64	0,88	0,10	0,14	1,18	4,45	0,08	1,02	4,73	4,73	8,56	0,00	99,652	sukses
15	Agt.	1	15	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	1,06	4,45	0,07	0,13	4,55	4,55	8,38	0,00	99,482	sukses
16		2	16	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,10	0,14	1,03	4,45	0,07	0,14	4,37	4,37	8,20	0,00	99,305	sukses
17	Sept.	1	15	0,02	0,02	0,42	0,35	0,46	0,10	0,13	1,00	4,72	0,07	0,59	3,74	3,74	7,57	0,00	98,642	sukses
18		2	15	0,02	0,02	0,46	0,39	0,50	0,10	0,13	0,91	4,72	0,06	0,63	3,06	3,06	6,89	0,00	97,880	sukses
19	Okt.	1	15	0,01	0,02	0,59	0,50	0,64	0,10	0,13	0,84	4,83	0,06	0,77	2,25	2,25	6,08	0,00	96,881	sukses
20		2	16	0,01	0,02	0,73	0,61	0,85	0,10	0,14	0,79	4,83	0,06	0,99	1,22	1,22	5,05	0,00	95,526	sukses
21	Nop.	1	15	0,01	0,01	0,72	0,61	0,78	0,10	0,13	0,73	4,57	0,05	0,91	0,27	0,27	4,10	0,00	94,105	sukses
22		2	15	0,01	0,01	0,75	0,63	0,82	0,10	0,13	0,59	4,57	0,04	0,95	-0,71	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
23	Des.	1	15	0,01	0,01	0,83	0,70	0,90	0,10	0,13	0,58	3,74	0,03	1,03	-1,06	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal
24		2	16	0,01	0,01	1,35	1,14	1,57	0,10	0,14	0,58	3,74	0,03	1,71	-1,73	0,00	3,83	0,00	93,650	gagal

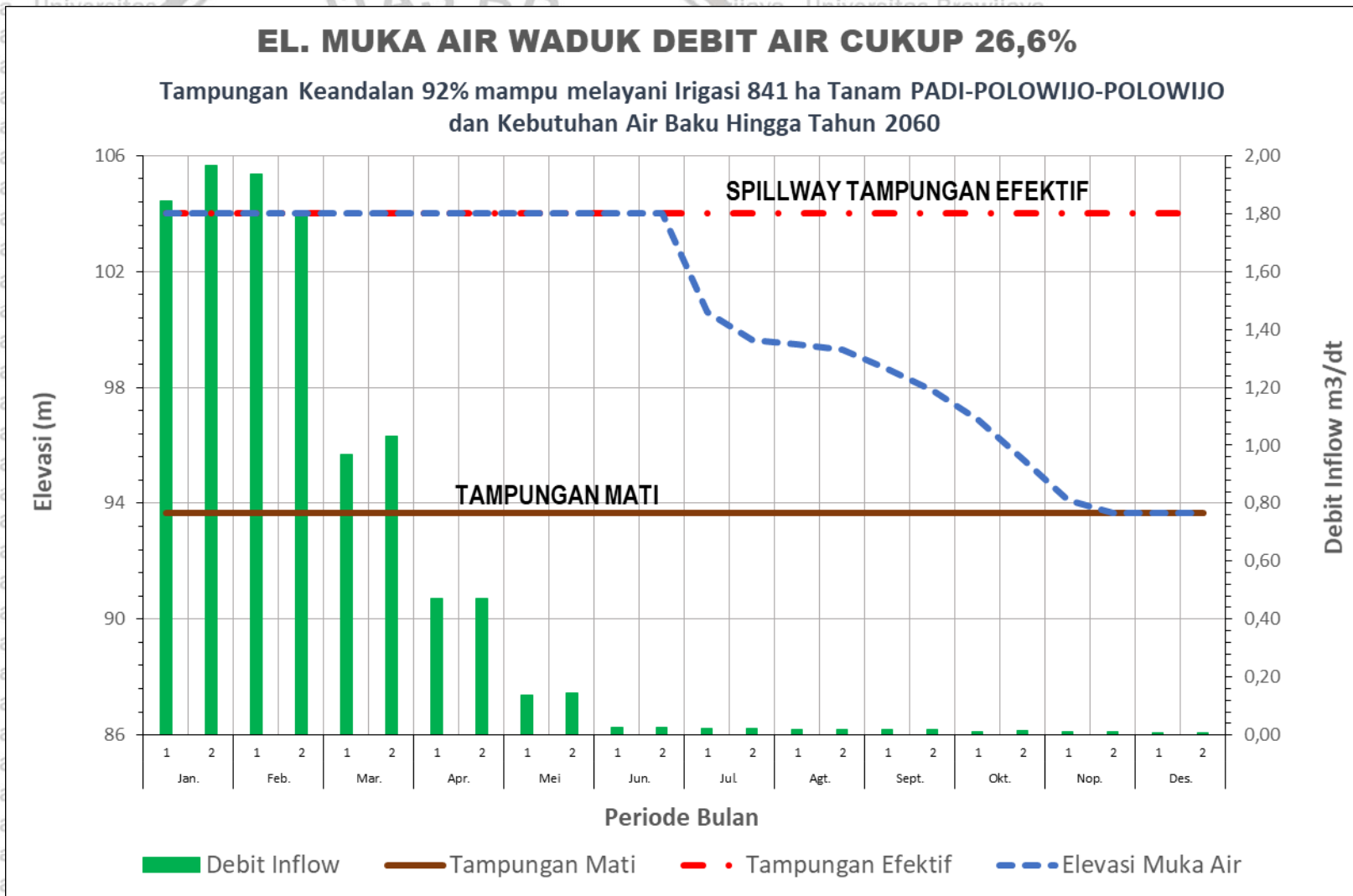
Sumber: Hasil perhitungan

Keterangan :

- Diketahui
- Diketahui
- Diketahui
- Diketahui
- Data Debit Inflow
- $(5) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 / 10^6$
- Kebutuhan Air Irigasi
- $(7) \cdot \text{Luas Lahan} / 1000$
- $(8) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 / 10^6$
- Data Kebutuhan Air Baku
- $(10) \cdot (4) \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 / 10^6$
- Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknomo
- Data Evaporasi
- $(13) \cdot (12) \cdot (4) \cdot 10^3 / 10^6$
- Total Outflow (9) + (11)
- $(17) + (8) - (14) - (15)$
- Jika  $(16) < 0$  maka  $(17) = 0$
- Jika  $(16) < \text{Kapasitas Tampungan}$  maka  $(17) = (16)$
- Jika  $(16) > \text{Kapasitas Tampungan}$  maka  $(17) = \text{Kapasitas Tampungan}$
- $(17) + \text{Tampungan mati}$
- Jika  $(16) - (17) < \text{Kapasitas Tampungan Waduk}$  maka  $(19) = 0$
- Jika  $(16) - (17) > \text{Kapasitas Tampungan}$  maka  $(19) = (16) - \text{Kapasitas Tampungan Waduk}$
- Hasil Interpolasi Lengkung Kapasitas Waduk Raknomo
- Jika  $(18) < \text{Tampungan Mati}$  maka  $(21) = \text{Gagal}$
- Jika  $(18) > \text{Tampungan Mati}$  maka  $(21) = \text{Sukses}$

Sumber: Hasil Analisis (2021)





Gambar 4.70. Elevasi Muka Air Waduk Keandalan 26,6% (Debit Air Cukup)

#### 4.8. Analisis Stabilitas Bendungan Raknamo

Analisis stabilitas bendungan Raknamo yang ditinjau berada pada penampang melintang (*cross section*) *Main Dam* 10 (MD.10) STA 0+300. Analisis stabilitas bendungan juga diperhitungkan disaat terjadi gempa, gempa yang diperhitungkan pada evaluasi keamanan bendungan yaitu; gempa dasar operasi (*operating basis earthquake*, OBE) dan gempa desain maksimum (*maximum design earthquake*, MDE). Untuk itu maka perlu dilakukan analisis gempa OBE dan MDE terlebih dahulu.

##### 4.8.1. Kajian Analisis Gempa

Analisis untuk menentukan besarnya koefisien gempa pada bendungan urugan sangat tergantung pada klasifikasi kelas resiko bangunan dan percepatan desain kelas resiko bendungan Raknamo. Agar dapat mengetahui klasifikasi kelas resiko bangunan dan percepatan desain kelas resiko pada bendungan Raknamo perlu diketahui total bobot yang ada berdasarkan tabel 2.7 dan persamaan 2-30 pada BAB II, maka dapat dilihat perhitungan pada tabel 4.43 di bawah ini.

Tabel 4.43. Klasifikasi Kelas Resiko Bangunan dan Percepatan Desain Bendungan Raknamo

No	Pengaruh Resiko	Ukuran	Faktor Resiko	Bobot
1	Kapasitas Tampung ( $10^6 \text{ m}^3$ )	14,09	F.Rk	4
2	Tinggi Bendungan (m)	37	F.Rt	4
3	Kebutuhan Evakuasi (orang)	1000 - 100	F.Re	8
4	Tingkat Kerusakan Hilir	Tinggi	F.Rh	10
<b>FR.tot</b>				<b>26</b>
<b>Klasifikasi Beban Gempa untuk Desain Bendungan Urugan</b>				<b>III (Tinggi)</b>

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Berdasarkan hasil analisis pada tabel 4.43 di atas maka selanjutnya dapat ditentukan kelas resiko bangunan menurut tabel 2.8 pada BAB II, maka nilai kelas resiko bangunan berada pada kelas III (Tinggi). Koefisien gempa yang dipakai pada analisis stabilitas lereng bendungan menggunakan koefisien gempa termodifikasi. Nilai gempa OBE menggunakan kala ulang 100 tahun sedangkan untuk gempa MDE menggunakan kala ulang 5000 tahun, penentuan gempa OBE dan MDE ditentukan menggunakan kriteria beban gempa untuk desain bendungan, lihat tabel 2.9 pada BAB II.

Penentuan zona gempa untuk periode ulang 100 tahun dan 5000 tahun berdasarkan peta zona gempa tahun 2017, untuk zona gempa periode ulang 100 tahun dapat dilihat pada







Berdasarkan peta zona gempa 2017 maka dapat ditentukan nilai koefisien gempa ( $z$ ) kalau ulang 100 tahun = 0,175 g dan nilai koefisien gempa ( $z$ ) kalau ulang 5000 tahun = 0,550 g. Contoh perhitungan koefisien gempa statis pada bendungan Raknamo untuk kala ulang 100 Tahun seperti berikut:

Diketahui:

Zona gempa ( $Z$ ) = 0,175 (didapat dari gambar 4.72)

Percepatan dasar gempa ( $a_c$ ) = 0,227 (didapat dari tabel 2.5 BAB II)

Koreksi jenis tanah setempat ( $v$ ) = 0,8 (didapat dari tabel 2.6 BAB II)

Koreksi pengaruh jenis struktur ( $\alpha$ ) = 0,5 (untuk bendungan urugan)

Gravitasi ( $g$ ) = 0,98 g

Dari nilai-nilai yang diketahui maka dapat dihitung percepatan gempa maksimum di permukaan tanah ( $a_d$ ).

$$a_d = Z \cdot a_c \cdot v$$

$$a_d = 0,175 \times 0,227 \times 0,8$$

$$a_d = 0,032 \text{ g}$$

sedangkan untuk nilai koefisien gempa dasar ( $K_h$ ) =  $a_d/g$

$$K_h = a_d/g$$

$$K_h = 0,032/0,98$$

$$K_h = 0,032$$

$$K_v = K_h \times 0,6$$

$$K_v = 0,032 \times 0,6$$

$$K_v = 0,019$$

$$K_o = K_h \times \alpha$$

$$K_o = 0,032 \times 0,5$$

$$K_o = 0,016$$

Selanjutnya perhitungan koefisien gempa statis pada bendungan Raknamo untuk kala ulang 100 tahun dan 5000 tahun dapat dilihat pada tabel 4.44.

Tabel 4.44. Perhitungan Koefisien Gempa Statis Bendungan Raknamo

No	Periode Ulang T	Z	ac	V	ad	$\alpha$	Ko	Kh	Kv	Keterangan
	(Tahun)									
1	100	0,175	0,227	0,8	0,032	0,5	0,016	0,032	0,019	OBE
2	5000	0,550	0,364	0,8	0,160	0,5	0,082	0,163	0,098	MDE

Sumber: Hasil Analisis (2021)



Analisis koefisien gempa dinamis pada bendungan Raknamo dapat dihitung dengan persamaan 2-28 dan persamaan 2-29 di BAB II, seperti contoh perhitungan di bawah ini:

- Untuk  $0,4 < y/h \leq 1,0$

$$K_s = y/h = 1:$$

$$K_s = K_o \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\}$$

$$K_s = 0,016 \times \{2,0 - 0,65 \times 1\}$$

$$K_s = 0,016 \times 1,400$$

$$K_s = 0,023$$

$$K_s = y/h = 0,75:$$

$$K_s = K_o \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\}$$

$$K_s = 0,016 \times \{2,0 - 0,65 \times 0,75\}$$

$$K_s = 0,016 \times 1,550$$

$$K_s = 0,025$$

$$K_s = y/h = 0,5:$$

$$K_s = K_o \times \{2,0 - 0,65 \times (y/h)\}$$

$$K_s = 0,016 \times \{2,0 - 0,65 \times 0,5\}$$

$$K_s = 0,016 \times 1,700$$

$$K_s = 0,028$$

- Untuk  $0 < y/h \leq 0,4$

$$K_s = y/h = 0,25:$$

$$K_s = K_o \times \{2,5 - 1,85 \times (y/h)\}$$

$$K_s = 0,016 \times \{2,5 - 1,85 \times 0,25\}$$

$$K_s = 0,016 \times 2,038$$

$$K_s = 0,033$$

Selanjutnya Perhitungan koefisien gempa dinamis horizontal pada bendungan Raknamo untuk kala ulang 100 tahun dan 5000 tahun dapat dilihat pada tabel 4.45.

Tabel 4.45. Perhitungan Koefisien Gempa Dinamis Bendungan Raknamo (Horisontal,  $K_h$ )

No	Periode Ulang T (Tahun)	ad (g)	Ko	Kh	Kh Pada y/H				Keterangan
					1	0,75	0,5	0,25	
1	100	0,032	0,016	0,032	0,023	0,025	0,028	0,033	OBE
2	5000	0,160	0,082	0,163	0,114	0,127	0,139	0,166	MDE

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Sedangkan nilai koefisien gempa dinamis vertikal bendungan Raknamo, dihitung sebesar  $0,5 \times$  gempa horizontal ( $K_h$ ), ( $K_v = 0,5 \times K_h$ ). Perhitungan koefisien gempa vertikal pada bendungan Raknamo dapat dilihat pada tabel 4.46 di bawah ini.

Tabel 4.46. Perhitungan Koefisien Gempa Dinamis Bendungan Raknamo (Vertikal,  $K_v$ )

No	Periode Ulang T (Tahun)	Kv Pada y/H				Keterangan
		1	0,75	0,5	0,25	
1	100	0,014	0,015	0,017	0,020	OBE
2	5000	0,069	0,076	0,083	0,100	MDE

Sumber: Hasil Analisis (2021)

#### 4.8.2. Evaluasi Keamanan Lereng Bendungan Raknamo

Analisis stabilitas terhadap lereng hulu dan hilir bendungan Raknamo dilakukan pada saat; tanpa gempa, dengan gempa statis 100 tahun, dengan gempa OBE dan dengan gempa MDE. Analisis stabilitas lereng ini menggunakan model *numeric* (SLOPE/W) aplikasi Geostudio 2012. Sebelum menggunakan model *numeric* (SLOPE/W) terlebih dahulu dilakukan analisis menggunakan model *numeric* (SEEP/W) kemudian diperoleh nilai tekanan air pori untuk masing-masing kasus, selanjutnya analisis model *numeric* (SLOPE/W) digabungkan dengan analisis model *numeric* (SEEP/W) untuk bisa diketahui nilai fakto keamanan pada 3 (tiga) kondisi yang berbeda-beda yaitu:

1. Awal impounding (*Case 1*)
2. Pengoperasian waduk (*Case 2 - Case 12*)
3. *Rapid Drowdown (Case 13 - Case 14)*

Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo tanpa gempa dan dengan gempa desain 100 tahun untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.47. di bawah ini.

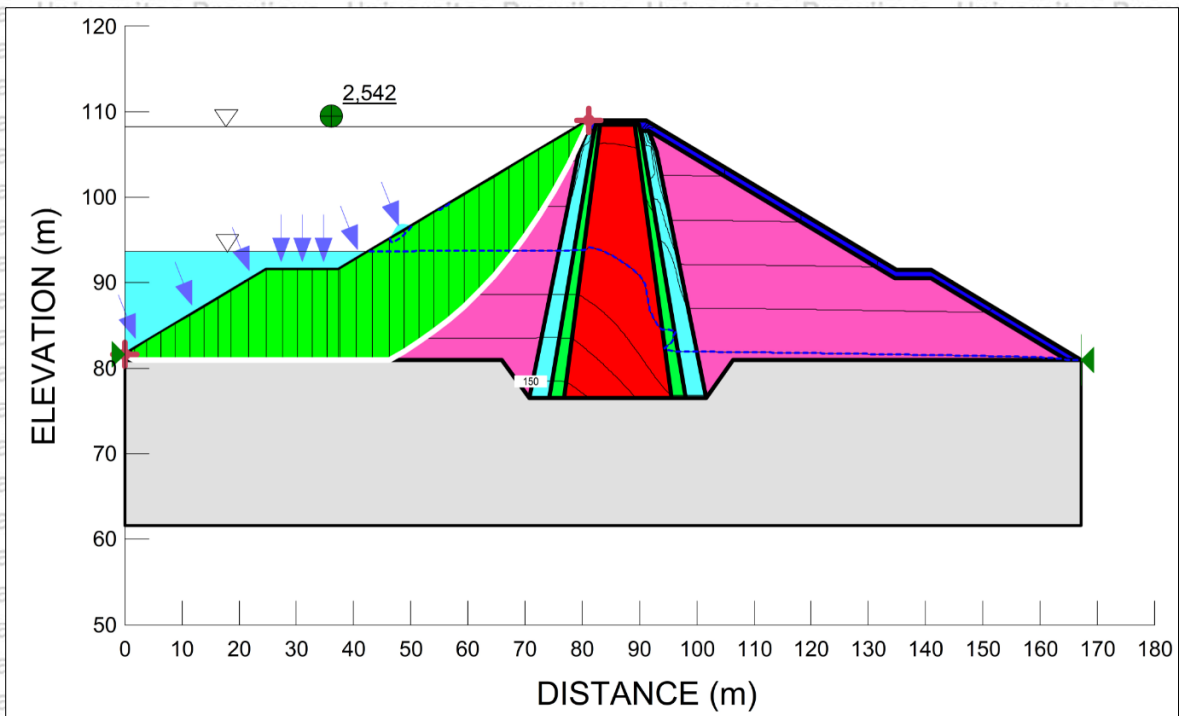


Tabel 4.47. Hasil Analisis Statis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Tanpa Gempa dan Dengan Gempa Desain 100 Tahun)

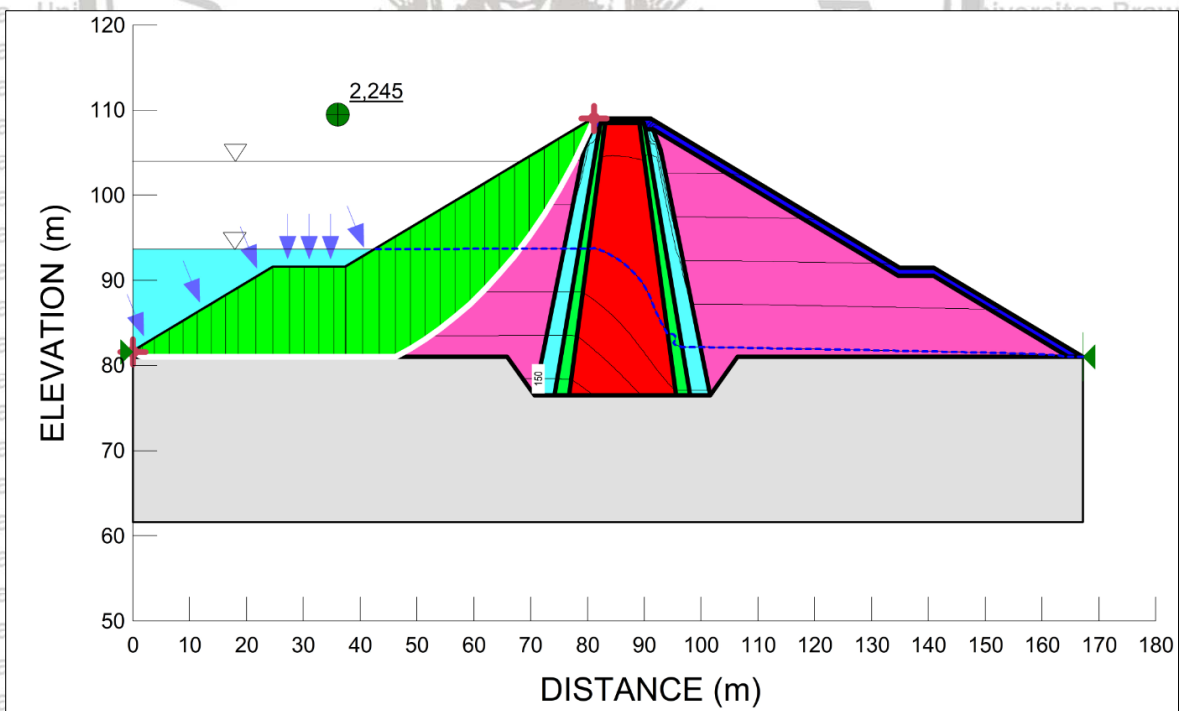
Kondisi	Lereng	Tanpa Gempa	Dengan Gempa			Syarat FK		Ket.	Ket.
		FK	Koef Gempa		FK	Tanpa Gempa	Dengan Gempa	Tanpa Gempa	Dengan Gempa
			Kh	Kv					
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	2,802	0,016	0,010	2,636	1,3	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,913	0,016	0,010	2,772	1,3	1,2	Aman	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	3,288	-	-	-	1,3	-	Aman	-
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	3,223	0,032	0,019	2,606	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,907	0,032	0,019	2,640	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	2,546	0,032	0,019	2,250	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,911	0,032	0,019	2,644	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	3,051	0,032	0,019	2,527	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,908	0,032	0,019	2,642	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	2,815	0,032	0,019	2,424	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,909	0,032	0,019	2,642	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	3,049	0,032	0,019	2,526	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,908	0,032	0,019	2,642	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	2,688	0,032	0,019	2,342	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,910	0,032	0,019	2,643	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	3,036	0,032	0,019	2,521	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,909	0,032	0,019	2,642	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	2,769	0,032	0,019	2,394	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,910	0,032	0,019	2,643	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	2,953	0,032	0,019	2,487	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,909	0,032	0,019	2,642	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	2,739	0,032	0,019	2,375	1,5	1,2	Aman	Aman
	Hilir	2,910	0,032	0,019	2,643	1,5	1,2	Aman	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	2,545	0,032	0,019	2,245	1,3	1,1	Aman	Aman
	Hilir	2,899	0,032	0,019	2,633	1,3	1,1	Aman	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	2,542	-	-	-	1,3	-	Aman	-
	Hilir	2,884	-	-	-	1,3	-	Aman	-

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Untuk dapat mengetahui hasil analisis stabilitas lereng untuk faktor keamanan paling minimum saat tanpa gempa dan dengan gempa statis 100 tahun, maka dapat dilihat pada gambar 4.73 dan gambar 4.74 yang di bawah ini.



Gambar 4.73. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (FWL – LWL) Tanpa Gempa



Gambar 4.74. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa Statis 100 Tahun



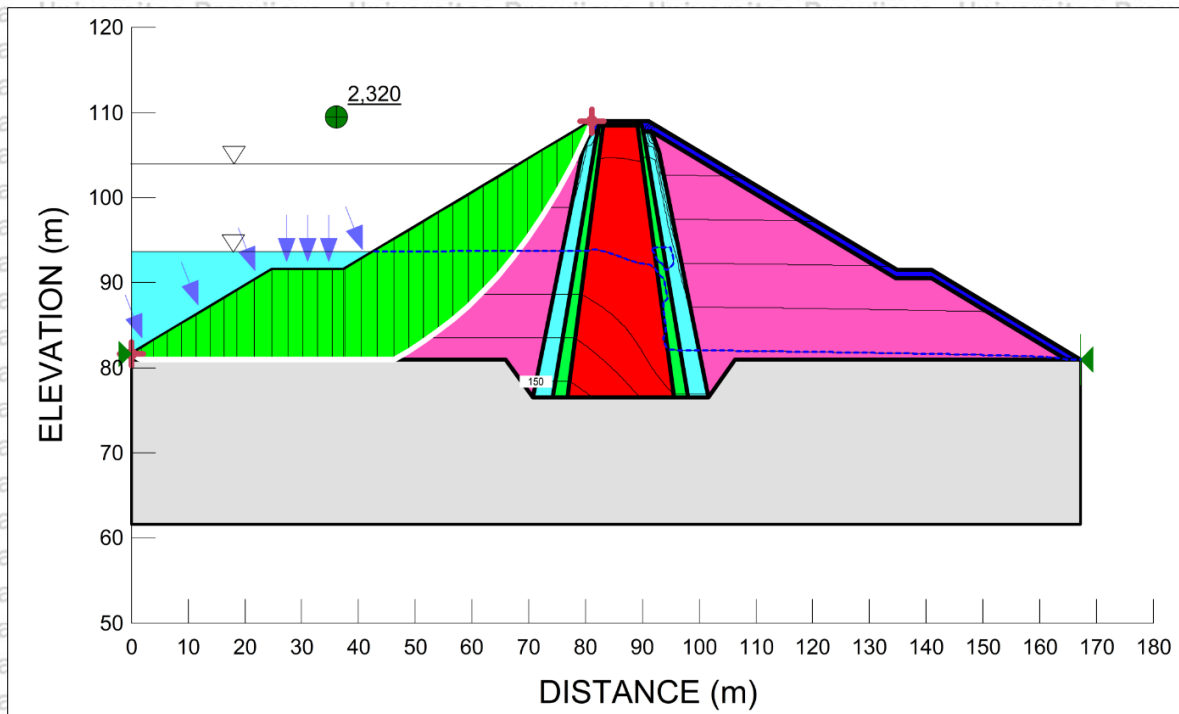
Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa OBE 100 tahun ( $y/H = 1$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.48. di bawah ini.

Tabel 4.48. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE),  
 $y/H = 1,00$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa OBE			Syarat FK (OBE)	
		Koef Gempa ( $y/H=1$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,023	0,014	2,570	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,715	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,023	0,014	2,795	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,698	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,023	0,014	2,753	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,710	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,023	0,014	2,325	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,714	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,023	0,014	2,660	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,711	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,023	0,014	2,522	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,712	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,023	0,014	2,659	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,711	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,023	0,014	2,429	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,713	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,023	0,014	2,653	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,711	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,023	0,014	2,488	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,713	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,023	0,014	2,613	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,712	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,023	0,014	2,467	1,2	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,713	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,023	0,014	2,320	1,1	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,704	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,023	0,014	2,322	1,1	Aman
	Hilir	0,023	0,014	2,688	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Untuk dapat mengetahui hasil analisis stabilitas lereng untuk faktor keamanan paling minimum saat dengan gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 1$ ), maka dapat dilihat pada gambar 4.75 yang di bawah ini.



Gambar 4.75. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 1$ )

Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa OBE 100 tahun ( $y/H = 0,75$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.49. di bawah ini.

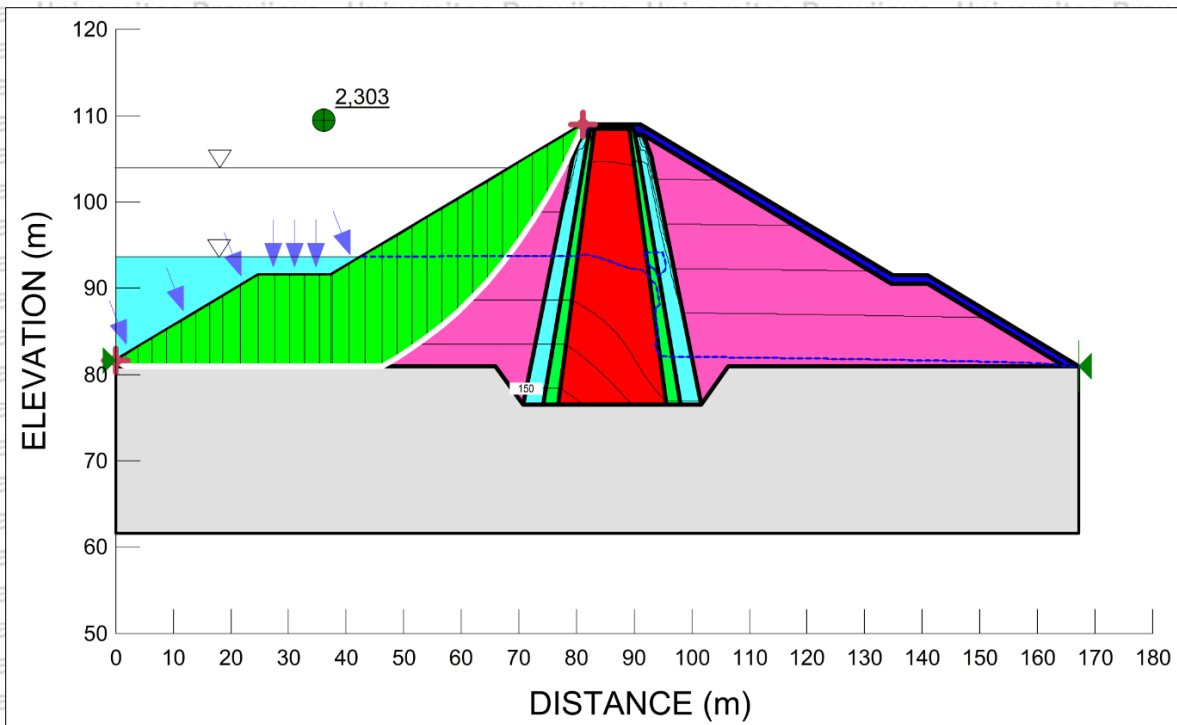


Tabel 4.49. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE),  
 $y/H = 0,75$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa OBE			Syarat FK (OBE)	
		Koef Gempa ( $y/H=0,75$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,025	0,015	2,552	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,699	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,025	0,015	2,760	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,682	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,025	0,015	2,719	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,694	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,025	0,015	2,308	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,698	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,025	0,015	2,629	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,695	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,025	0,015	2,499	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,696	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,025	0,015	2,628	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,695	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,025	0,015	2,409	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,697	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,025	0,015	2,623	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,696	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,025	0,015	2,466	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,697	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,025	0,015	2,584	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,696	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,025	0,015	2,446	1,2	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,697	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,025	0,015	2,303	1,1	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,688	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,025	0,015	2,305	1,1	Aman
	Hilir	0,025	0,015	2,673	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Untuk dapat mengetahui hasil analisis stabilitas lereng untuk faktor keamanan paling minimum saat dengan gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,75$ ), maka dapat dilihat pada gambar 4.76 yang di bawah ini.



Gambar 4.76. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,75$ )

Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa OBE 100 tahun ( $y/H = 0,50$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.50. di bawah ini.

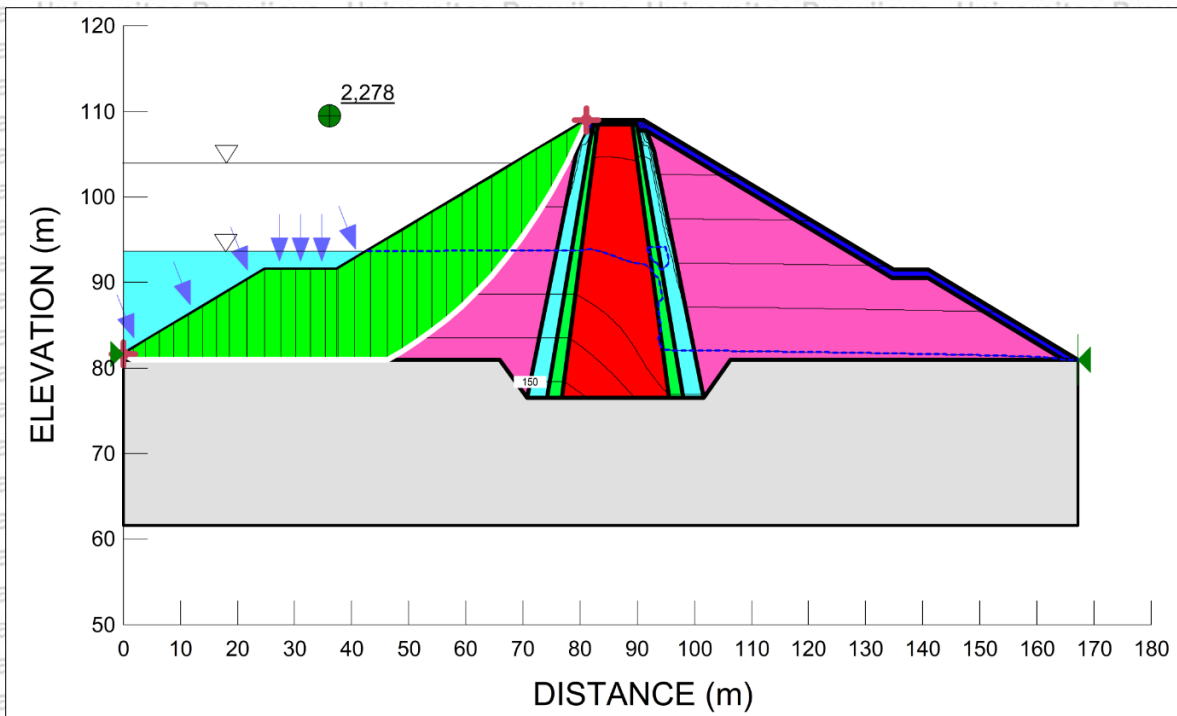


Tabel 4.50. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE),  
 $y/H = 0,50$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa OBE			Syarat FK (OBE)	
		Koef Gempa ( $y/H=0,5$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,028	0,017	2,525	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,676	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,028	0,017	2,709	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,659	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,028	0,017	2,669	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,671	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,028	0,017	2,283	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,674	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,028	0,017	2,584	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,672	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,028	0,017	2,467	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,673	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,028	0,017	2,583	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,672	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,028	0,017	2,379	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,674	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,028	0,017	2,578	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,672	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,028	0,017	2,435	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,673	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,028	0,017	2,542	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,672	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,028	0,017	2,415	1,2	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,673	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,028	0,017	2,278	1,1	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,665	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,028	0,017	2,280	1,1	Aman
	Hilir	0,028	0,017	2,650	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Untuk dapat mengetahui hasil analisis stabilitas lereng untuk faktor keamanan paling minimum saat dengan gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,50$ ), maka dapat dilihat pada gambar 4.77 yang di bawah ini.



Gambar 4.77. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,50$ )

Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa OBE 100 tahun ( $y/H = 0,25$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.51. di bawah ini.

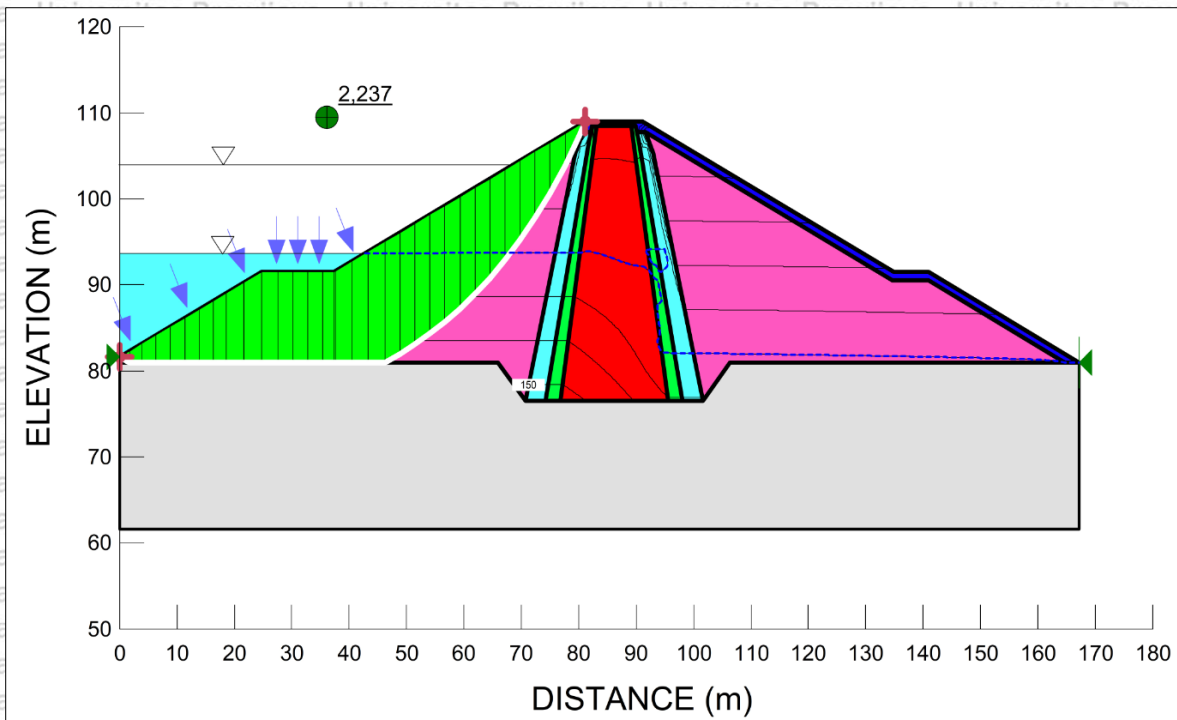


Tabel 4.51. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa OBE),  
 $y/H = 0,25$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa OBE			Syarat FK (OBE)	
		Koef Gempa ( $y/H=0,25$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,033	0,020	2,481	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,638	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,033	0,020	2,627	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,621	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,033	0,020	2,591	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,633	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,033	0,020	2,242	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,637	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,033	0,020	2,513	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,634	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,033	0,020	2,414	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,635	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,033	0,020	2,512	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,634	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,033	0,020	2,333	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,636	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,033	0,020	2,507	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,643	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,033	0,020	2,385	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,635	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,033	0,020	2,474	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,635	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,033	0,020	2,366	1,2	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,636	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,033	0,020	2,237	1,1	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,627	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,033	0,020	2,239	1,1	Aman
	Hilir	0,033	0,020	2,612	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)

Untuk dapat mengetahui hasil analisis stabilitas lereng untuk faktor keamanan paling minimum saat dengan gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,25$ ), maka dapat dilihat pada gambar 4.78 yang di bawah ini.



Gambar 4.78. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis OBE 100 tahun ( $y/H = 0,25$ )

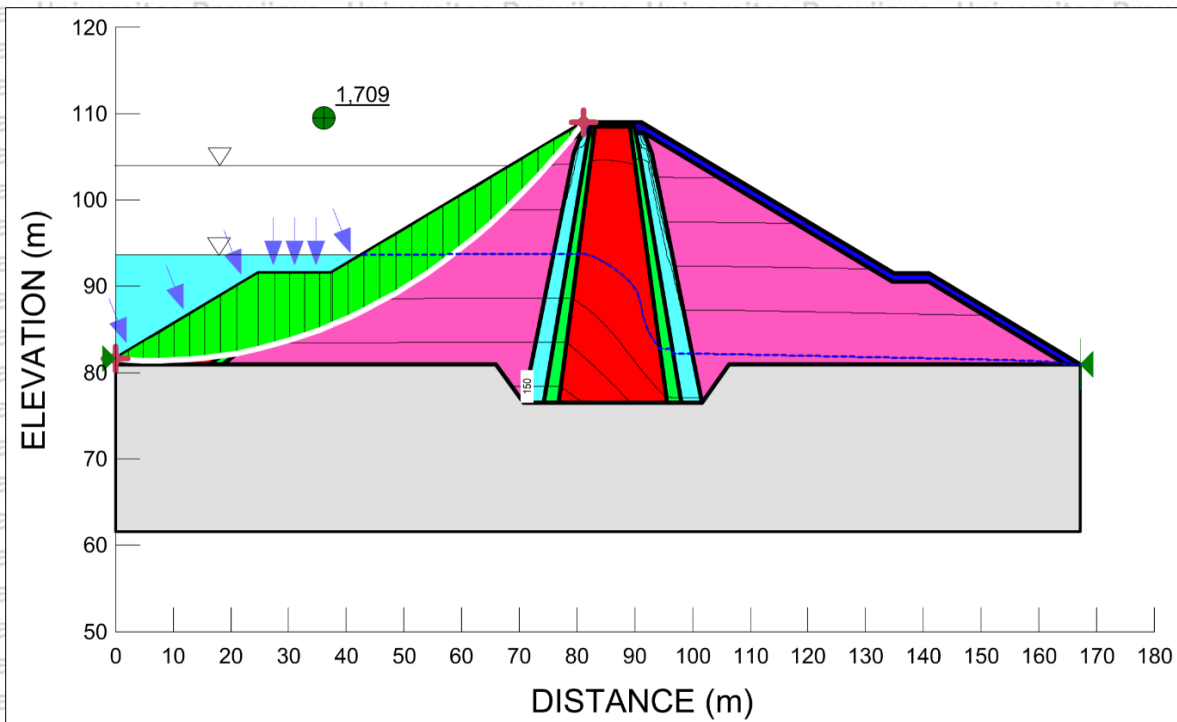
Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa MDE 5000 tahun ( $y/H = 1$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.52. di bawah ini.



Tabel 4.52. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE),  
 $y/H = 1,00$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa MDE			Syarat FK (MDE)	
		Koef Gempa ( $y/H=1$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,114	0,069	1,951	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,155	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,114	0,069	1,793	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,142	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,114	0,069	1,781	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,152	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,114	0,069	1,713	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,155	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,114	0,069	1,758	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,152	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,114	0,069	1,732	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,153	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,114	0,069	1,757	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,152	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,114	0,069	1,720	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,154	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,114	0,069	1,756	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,153	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,114	0,069	1,727	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,154	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,114	0,069	1,747	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,153	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,114	0,069	1,724	1,2	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,154	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,114	0,069	1,709	1,1	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,141	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,114	0,069	1,716	1,1	Aman
	Hilir	0,114	0,069	2,135	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)



Gambar 4.79. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 1$ )

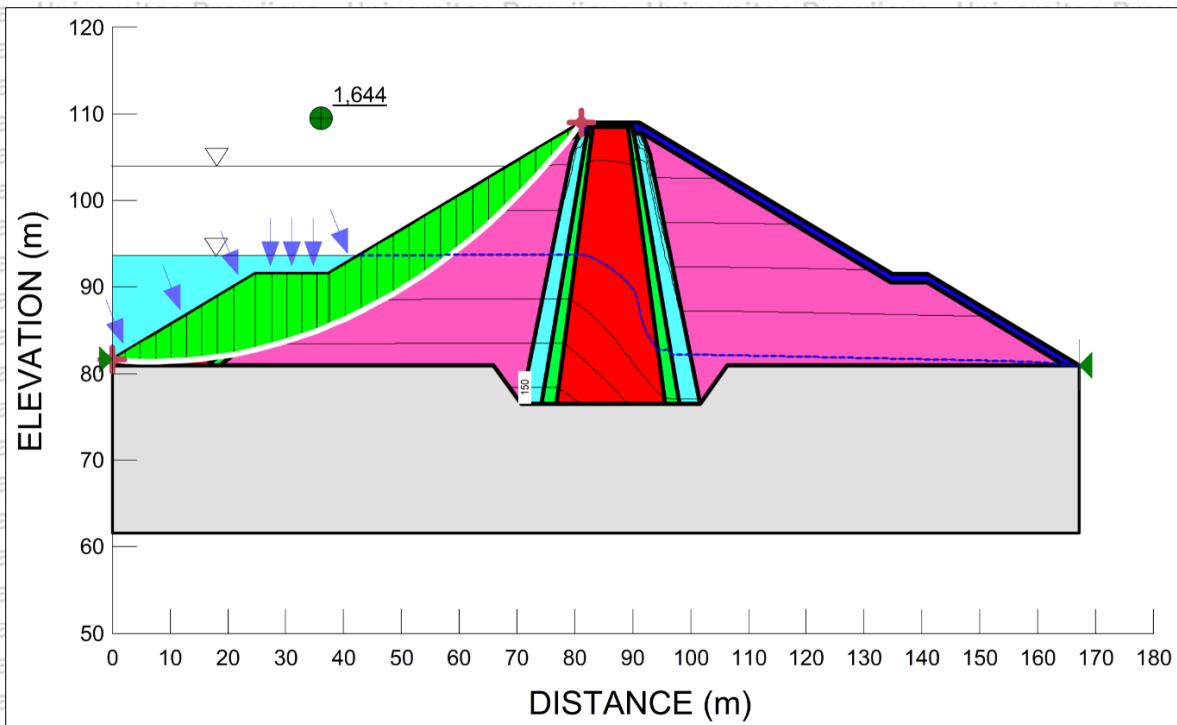
Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,75$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.53. di bawah ini.



Tabel 4.53. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE),  
 $y/H = 0,75$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa MDE			Syarat FK (MDE)	
		Koef Gempa ( $y/H=0,75$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,127	0,076	1,888	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,095	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,127	0,076	1,710	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,082	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,127	0,076	1,700	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,092	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,127	0,076	1,647	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,095	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,127	0,076	1,679	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,093	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,127	0,076	1,659	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,093	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,127	0,076	1,679	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,092	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,127	0,076	1,650	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,094	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,127	0,076	1,678	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,093	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,127	0,076	1,655	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,094	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,127	0,076	1,671	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,093	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,127	0,076	1,653	1,2	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,094	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,127	0,076	1,644	1,1	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,081	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,127	0,076	1,650	1,1	Aman
	Hilir	0,127	0,076	2,075	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)



Gambar 4.80. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,75$ )

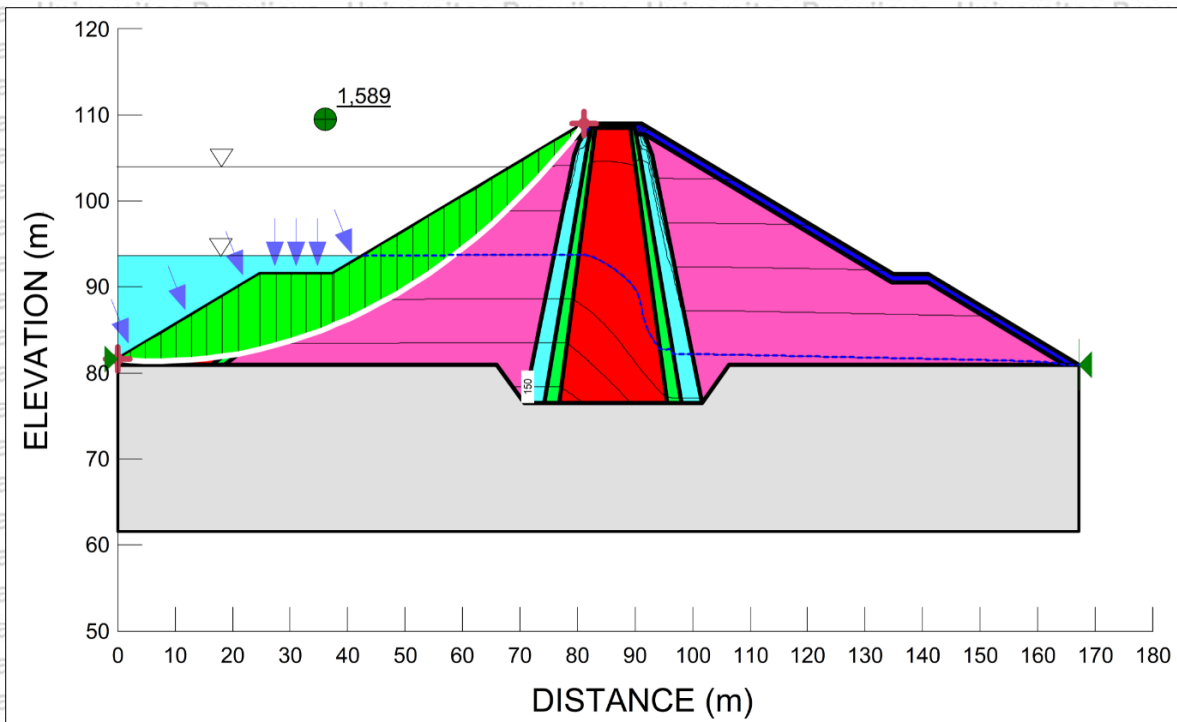
Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,50$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.54. di bawah ini.



Tabel 4.54. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE),  
 $y/H = 0,50$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa MDE			Syarat FK (MDE)	
		Koef Gempa ( $y/H=0,5$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,139	0,083	1,833	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,043	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,139	0,083	1,640	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,031	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,139	0,083	1,631	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,039	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,139	0,083	1,592	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,042	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,139	0,083	1,614	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,040	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,139	0,083	1,598	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,041	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,139	0,083	1,614	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,040	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,139	0,083	1,592	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,042	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,139	0,083	1,613	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,040	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,139	0,083	1,595	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,041	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,139	0,083	1,607	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,041	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,139	0,083	1,594	1,2	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,041	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,139	0,083	1,589	1,1	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,030	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,139	0,083	1,595	1,1	Aman
	Hilir	0,139	0,083	2,024	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)



Gambar 4.81. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,50$ )

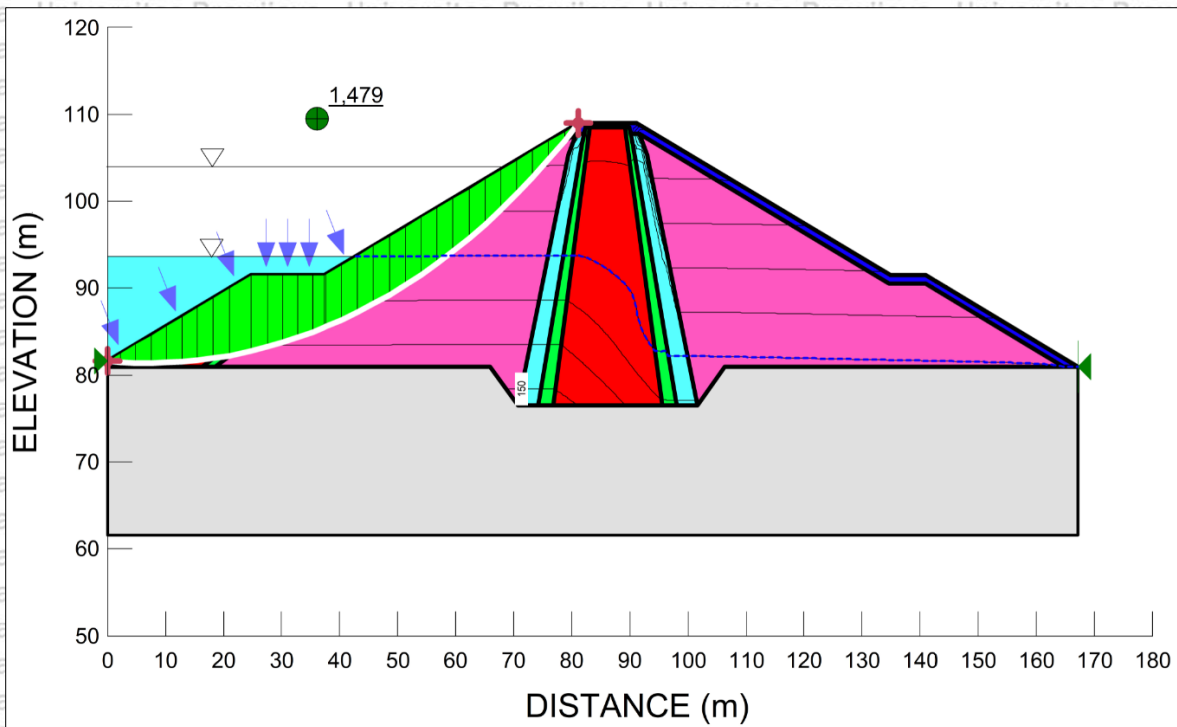
Agar dapat mengetahui nilai faktor keamanan (FS) analisis statis stabilitas lereng bendungan Raknamo dengan gempa MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,25$ ) untuk setiap kasus (*Case*) dari hasil analisis gabungan antara model *numeric* (SEEP/W) dan model *numeric* (SLOPE/W), maka dapat dilihat secara lengkap nilai faktor keamanan (FS) pada tabel 4.55. di bawah ini.



Tabel 4.55. Hasil Analisis Dinamis Stabilitas Lereng Bendungan Raknamo (Gempa MDE),  
 $y/H = 0,25$

Kondisi	Lereng	Dengan Gempa MDE			Syarat FK (MDE)	
		Koef Gempa ( $y/H=0,25$ )			Dengan Gempa	Ket.
		Kh	Kv	FK		
Case 1: Impounding Awal (El. 87,50 m)	Hulu	0,166	0,100	1,724	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,936	1,2	Aman
Case 2: Full Water Level (FWL), (El. 108,21 m)	Hulu	0,166	0,100	1,506	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,925	1,2	Aman
Case 3: Normal Water Level (NWL), (El. 104,00 m)	Hulu	0,166	0,100	1,500	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,933	1,2	Aman
Case 4: Low Water Level (LWL), (El. 93,65 m)	Hulu	0,166	0,100	1,482	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,936	1,2	Aman
Case 5: Debit Air Kering (97,3%) (El.100,92 m)	Hulu	0,166	0,100	1,488	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,934	1,2	Aman
Case 6: Debit Air Kering (97,3%) (El.97,904 m)	Hulu	0,166	0,100	1,479	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,934	1,2	Aman
Case 7: Debit Air Rendah (75,3%) (El.100,891 m)	Hulu	0,166	0,100	1,488	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,934	1,2	Aman
Case 8: Debit Air Rendah (75,3%) (El.96,146 m)	Hulu	0,166	0,100	1,476	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,935	1,2	Aman
Case 9: Debit Air Normal (50,7%) (El.100,725 m)	Hulu	0,166	0,100	1,487	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,934	1,2	Aman
Case 10: Debit Air Normal (50,7%) (El.97,290 m)	Hulu	0,166	0,100	1,477	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,935	1,2	Aman
Case 11: Debit Air Cukup (26,6%) (El.99,652 m)	Hulu	0,166	0,100	1,484	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,934	1,2	Aman
Case 12: Debit Air Cukup (26,6%) (El.96,881 m)	Hulu	0,166	0,100	1,477	1,2	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,935	1,2	Aman
Case 13: Rapid Drawdown (NWL - LWL)	Hulu	0,166	0,100	1,479	1,1	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,924	1,1	Aman
Case 14: Rapid Drawdown (FWL - LWL)	Hulu	0,166	0,100	1,485	1,1	Aman
	Hilir	0,166	0,100	1,918	1,1	Aman

Sumber: Hasil Analisis (2021)



Gambar 4.82. Nilai Faktor Keamanan Lereng Hulu Kondisi *Rapid Drawdown* (NWL – LWL) Dengan Gempa dinamis MDE 5000 tahun ( $y/H = 0,25$ )





## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa dan perhitungan yang telah dilakukan dengan memperhatikan rumusan masalah, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Kesimpulan untuk pola tekanan air pori dan rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan Raknamo antara lain:

- a) Pola tekanan air pori pada penampang MD.10 STA 0+300 berdasarkan hasil *numeric* maupun *actual* untuk instrumen (VP.05 sampai VP.09) memiliki bentuk parabola terbuka ke bawah dan juga mempunyai tren yang sama dengan perubahan elevasi muka air di waduk, sedangkan untuk instrumen (VP.10 dan VP.11) memiliki bentuk parabola terbuka ke bawah dan juga mempunyai tren yang berbeda dengan perubahan elevasi muka air yang terjadi selama tahun 2018 – 2020 di waduk. Sedangkan Pola tekanan air pori pada penampang MD.16 STA 0+420 berdasarkan hasil *numeric* maupun *actual* untuk instrumen (VP.05, VP.07, VP.09, VP.11) memiliki tren yang sama dengan perubahan elevasi muka air di waduk, sedangkan untuk instrumen (VP.06, VP.08, VP.10, VP.12, VP.13, VP.14, VP.15) memiliki tren yang berbeda dengan perubahan elevasi muka air yang terjadi selama tahun 2018 – 2020 di waduk.
- b) Pola rembesan pada tubuh bendungan berdasarkan hasil *numeric* memiliki bentuk parabola terbuka ke bawah dan juga mempunyai tren yang sama dengan perubahan elevasi muka air di waduk, sedangkan hasil *actual* memiliki tren yang sedikit berbeda dengan perubahan elevasi muka air di waduk.

2. Pola penurunan (*settlement*) yang terjadi pada penampang MD.11 STA 0+320 berdasarkan hasil *numeric* maupun *actual* untuk instrumen (SP.01, PM.01, PM.02) memiliki bentuk lebih cenderung linear dan juga mempunyai tren yang cenderung sama selama 2 tahun (tahun 2018 – tahun 2020), untuk instrumen (PM.03, PM.04, PM.05) memiliki tren yang cenderung berbeda selama 1,3 tahun (Januari 2018 – April 2019). Sedangkan Pola penurunan (*settlement*) yang terjadi pada penampang MD.17 STA 0+443,4 berdasarkan hasil *numeric* maupun *actual* untuk instrumen (SP.01, PM.01, PM.02) memiliki bentuk lebih cenderung linear dan juga mempunyai tren yang



cenderung sama selama 2 tahun (tahun 2018 – tahun 2020), untuk instrumen (PM.03, PM.04, PM.05) memiliki tren yang cenderung berbeda selama 1,8 tahun (Januari 2018 – September 2019).

3. Evaluasi keamanan terhadap rembesan, *settlement* dan stabilitas lereng yang terjadi pada tubuh bendungan Raknamo antara lain:

a) Berdasarkan hasil analisis *numeric* (SEEP/W) pada tubuh bendungan adalah  $0,00176 \text{ m}^3/\text{dtk} < 0,014 \text{ m}^3/\text{dtk}$ , maka bendungan masih aman terhadap debit maksimum rembesan. sedangkan berdasarkan hasil bacaan *actual* di lapangan (*Instrument V-Notch*) adalah  $0,00427 \text{ m}^3/\text{dtk} < 0,014 \text{ m}^3/\text{dtk}$  maka bendungan masih aman terhadap debit maksimum rembesan.

b) Berdasarkan hasil analisis *numeric* (SIGMA/W) pada inti bendungan adalah  $0,00334 < 0,02$ , maka bendungan masih aman karena *settlement* tidak melebihi batas yang diijinkan. Sedangkan berdasarkan hasil bacaan *actual* di lapangan (*multilayer settlement*) adalah  $0,00337 < 0,02$ , maka bendungan masih aman karena *settlement* tidak melebihi batas yang diijinkan.

c) Berdasarkan hasil analisis *numeric* (SLOPE/W) untuk kestabilan lereng bendungan Raknamo, dengan kondisi tanpa gempa, dengan gempa statis 100 tahun, serta dengan gempa dinamis OBE maupun MDE, adalah sebagai berikut:

- Faktor keamanan lereng bendungan Raknamo kondisi (Tanpa Gempa) adalah  $2,542 > 1,3$ , maka lereng bendungan masih dalam kondisi stabil atau aman.
- Faktor keamanan lereng bendungan Raknamo kondisi (Dengan Gempa Statis 100 Tahun) adalah  $2,245 > 1,1$ , maka lereng bendungan masih dalam kondisi stabil atau aman.
- Faktor keamanan lereng bendungan Raknamo kondisi (Dengan Gempa Dinamis OBE) adalah  $2,237 > 1,1$ , maka lereng bendungan masih dalam kondisi stabil atau aman.
- Faktor keamanan lereng bendungan Raknamo kondisi (Dengan Gempa Dinamis MDE) adalah  $1,476 > 1,1$ , maka lereng bendungan masih dalam kondisi stabil atau aman.



## 5.2. Saran

Berdasarkan kesimpulan yang ada maka dapat disarankan agar:

1. Dari kesimpulan tentang korelasi atau tingkat hubungan pada penampang MD.16 STA 0+420 untuk alat instrumen *Vibrating Wire Piezometer* (VP.06, VP.08, VP.10, VP.12, VP.15) sangat rendah, maka perlu dicek kembali atau dilakukan kalibrasi ulang pada alat instrumen *Vibrating Wire Piezometer* tersebut.
2. Agar struktur lereng bendungan raknamo tersebut tetap aman saat operasional bendungan, maka diperlukan pemeliharaan terhadap struktur tersebut.





## DAFTAR PUSTAKA

- B. G. Look. 2007. *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2004. *Pedoman Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*. Jakarta: Balai Bendungan.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2004. *Instrumentasi Tubuh Bendungan Tipe Urugan dan Tanggul*. Jakarta: Balai Bendungan.
- Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal SDA. 2007. *Pembangunan Bendungan Urugan pada Pondasi Tanah Lunak*. Jakarta: Balai Bendungan.
- Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal SDA. 2008. *Analisis Dinamik Bendungan Urugan*. Jakarta: Balai Bendungan.
- Hardiyatmo, H. C. 2002. *Mekanika tanah 1*. Edisi III. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. 2010. *Mekanika tanah 2*. Edisi V. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Imran, A., Muhammed, B., Natasha Javed. 2017. *Numerical Analysis of Seepage and Slope Stability in an Earthen Dam by Using Geo-Slope Software*. 2 (2017):13-20.
- McMahon, T.A. & Mein, R.G. 1978. *Reservoir Capacity and Yield*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company
- Mohammad, R. & Mohsen, H. 2017. *Evaluation of Behaviors of Earth and Rockfill Dams During Construction and Initial Impounding Using Instrumentation Data and Numerical Modeling*. 9 (2017):709-725.
- Mohammad, H. Aminfar., A. Rastbud, H. Ahmadi., A. Naseri. 2016. *Comparing the geodetical and geotechnical Methods in investigating the deformation of Earthfill dams; a case study of mahabad earthfill Dam, iran*. 4 (2016):619-637.
- Mohamed, N. Salem., Hasem, M. Eldeeb., Salma, A. Nofal. 2019. *Analysis of Seepage through Earth Dams with Internal Core*. 8 (2019):768-777.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., & Narayanan, R. 2007. *Hydraulic Structures*. Edisi IV. London: Taylor & Francis Group.
- Pandian, R.S., Nair, I.S., Lakshmanan, E. 2016. *Finite Element Modelling of a Heavily Exploited Coastal Aquifer for Assessing The Response of Groundwater Level to The Changes in Pumping and Rainfall Variation Due to Climate Change*. Hydrology Research, 47 (2016):42-60.
- Pusat Studi Gempa Nasional, Pusat litbang Perumahan dan Permukiman. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Sanjay, R., Ramakrishna, A. & Anindya, P. 2018. *A Simplified Approach to Assess Seismic Stability of Tailings Dams*. 10 (2018):1082-1090.



- Soedibyo, 2003. *Teknik Bendungan*. Cetakan Kedua. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Sosrodarsono, S. & Takeda, K. *Bendungan Tipe Urugan*. Cetakan Keempat. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Shivakumar, A., Shivamant, H. & Solanki, P. 2015. *Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method*. 4 (2015):876-883.
- Undayani, S., Sri, W., Suharyanto. & Windu, P. 2017. *Displacement analysis of dam based on material parameters using numerical simulation and monitoring instrumentation*. 258 (05013):1-6.
- Undayani, S., Sri, W., Suharyanto. & Windu, P. 2017. *Influence of Pore Water Pressure to Seepage and Stability of Embankment Dam (Case Study of Sermo Dam Yogyakarta, Indonesia)*. 101 (05007):1-5.
- Undayani, S., Sri, W., Suharyanto. & Windu, P. 2016. *Analisis tekanan air pori menggunakan metode elemen hingga Dengan pemodelan mohr-coulomb pada plaxis*. Universitas Atma Jaya. Yogyakarta, 26-27 Oktober 2016.
- W. Zhou., S. Li., Z. Zhou, & X. Chang. *Remote Sensing of Deformation of a High Concrete-Faced Rockfill Dam Using InSAR: A Study of the Shuibuya Dam, China*. 8 (255):1-15.
- Xiaoping, C. & Jingwu, H. 2011. *Stability Analysis of Bank Slope Under Conditions of Reservoir Impounding and Rapid Drawdown*. 3 (Supp):429-437.
- K.L. Morton., M.C. Muresan. & F.R. Debswana. 2008. *Importance of Pore Pressure Monitoring in High Walls*. 225-238.



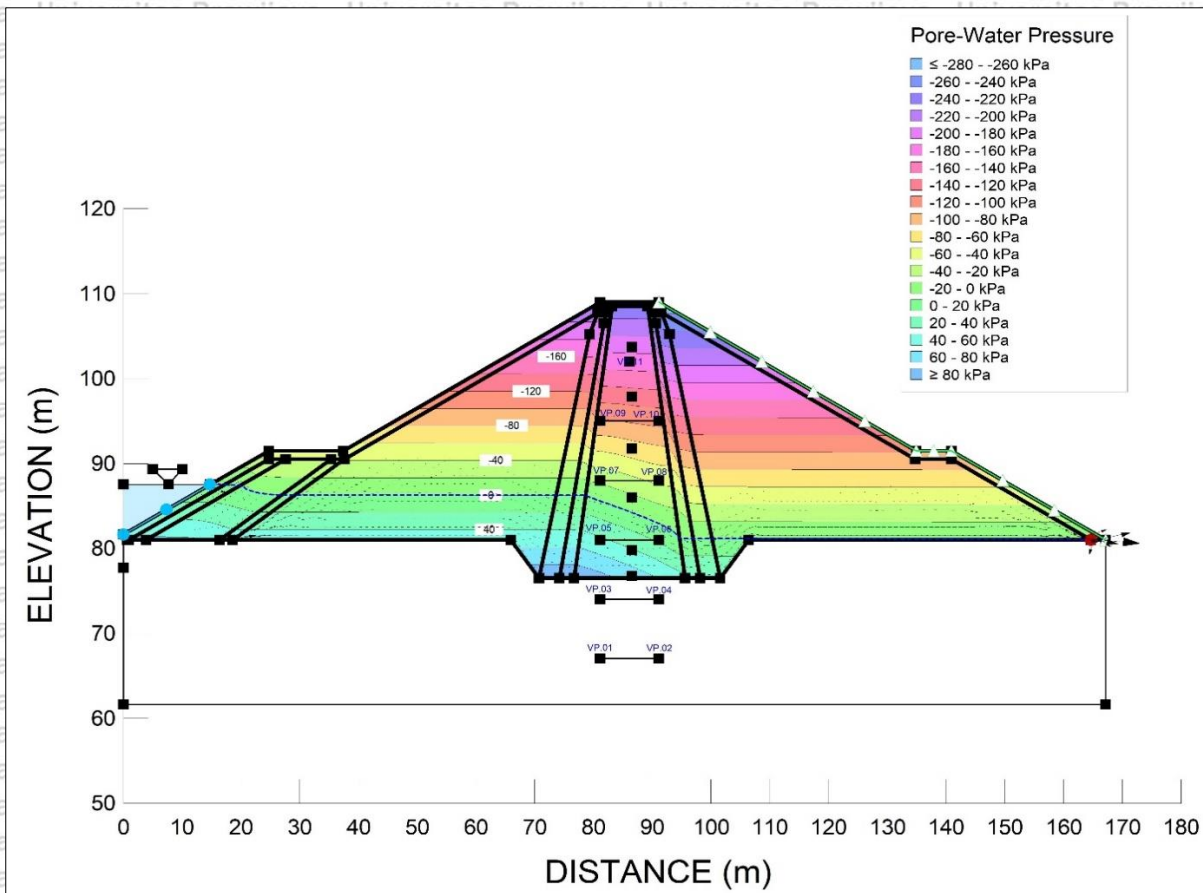
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

# Lampiran 1

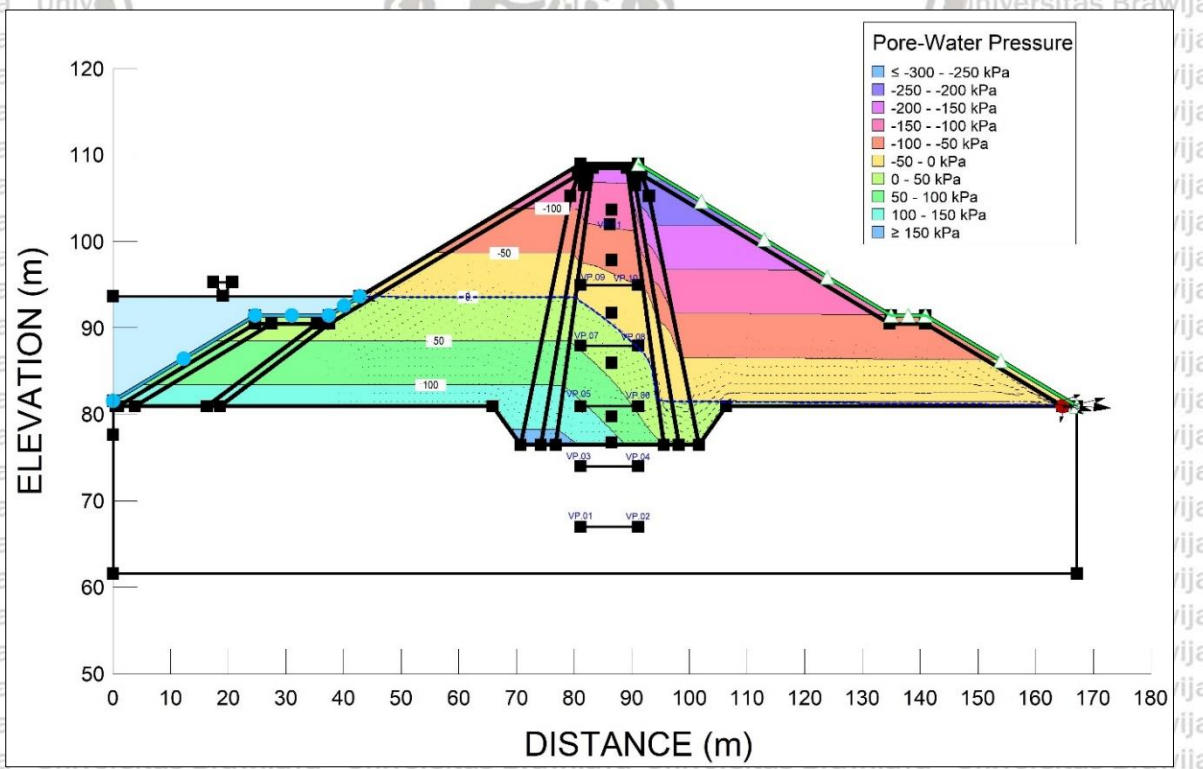
## Analisis Tekanan Air Pori



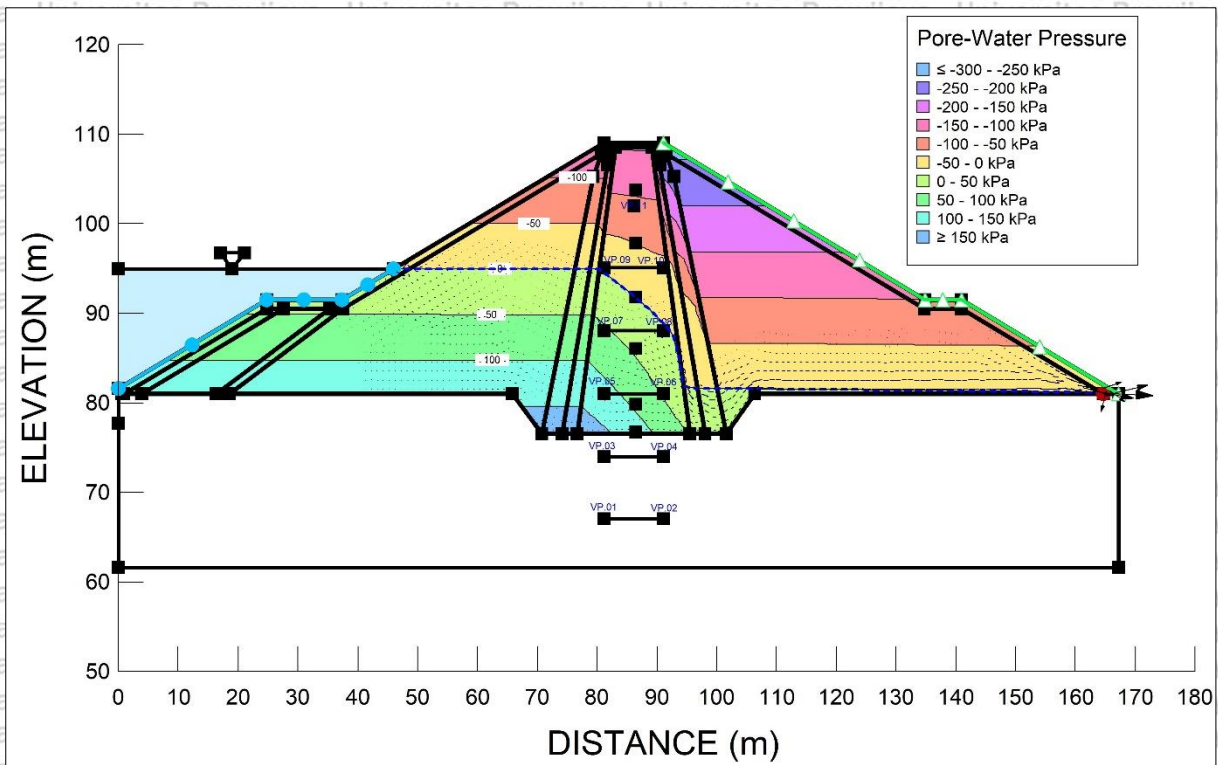




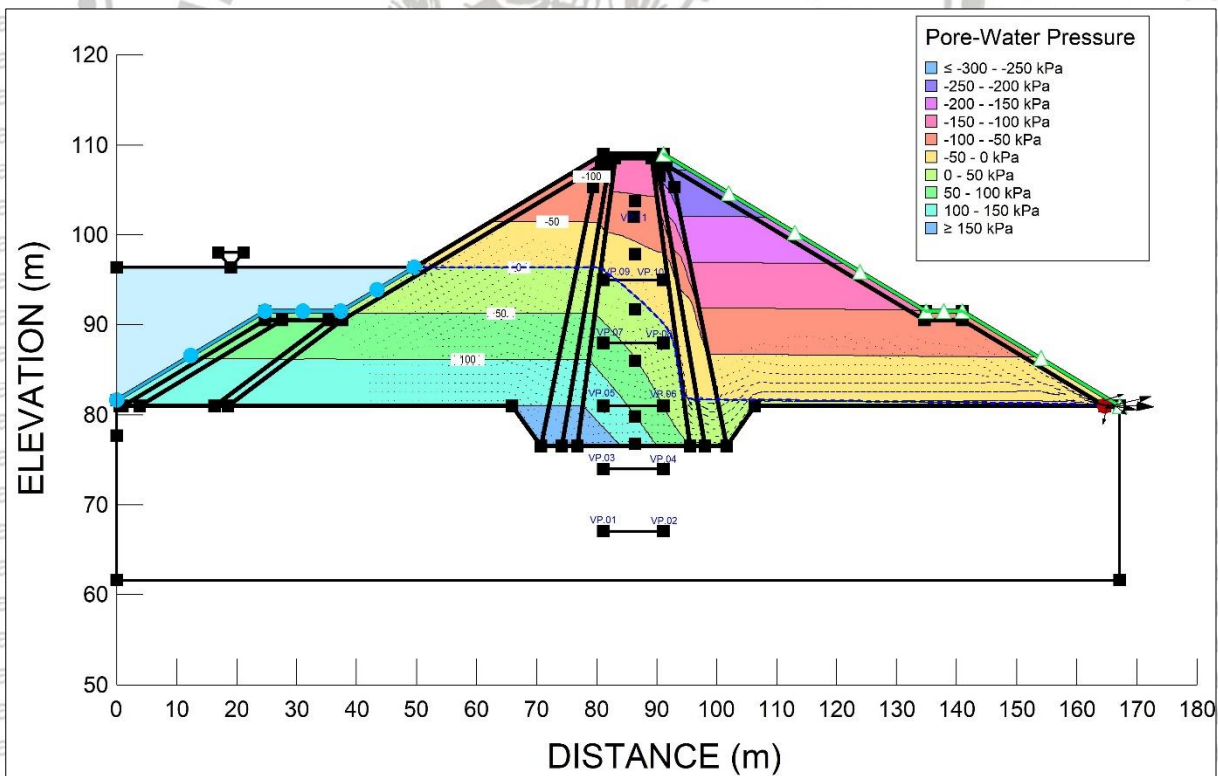
Gambar L1a.1. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Jan 2018)



Gambar L1a.2. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (28 Feb 2018)

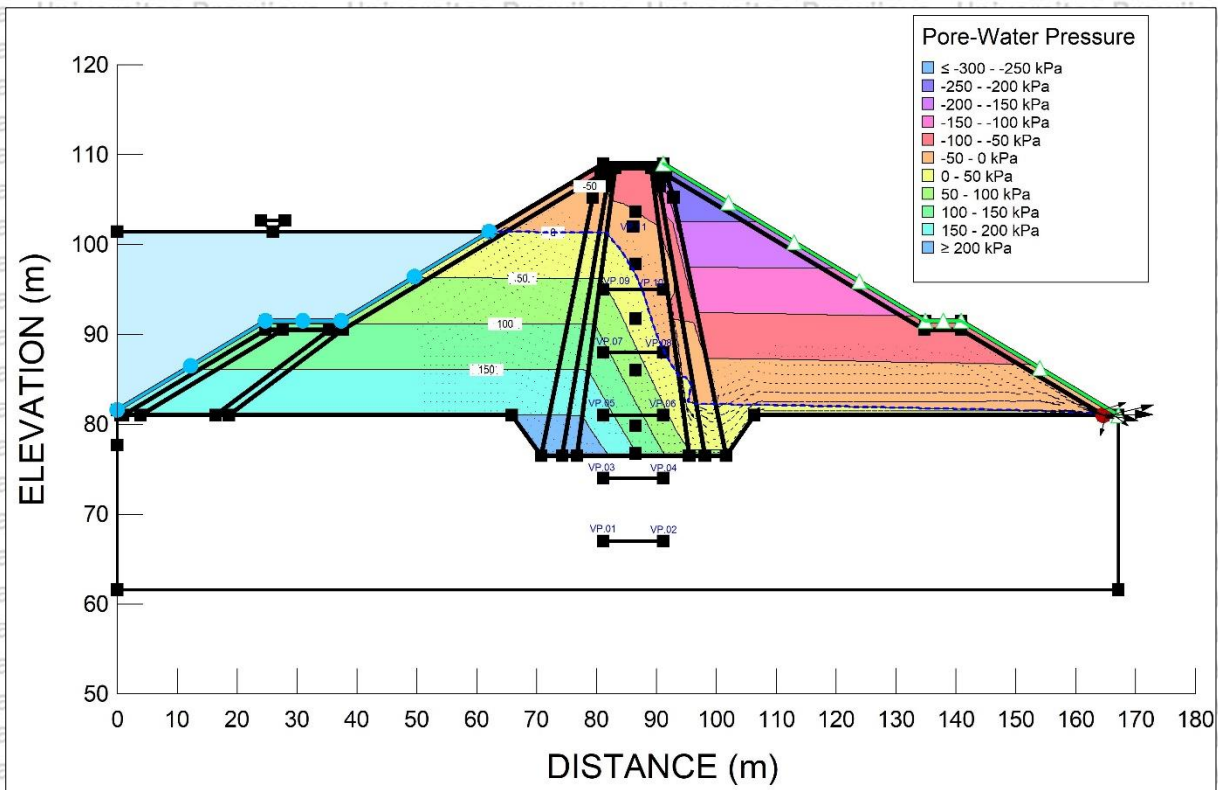


Gambar L1a.3. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Apr 2018)

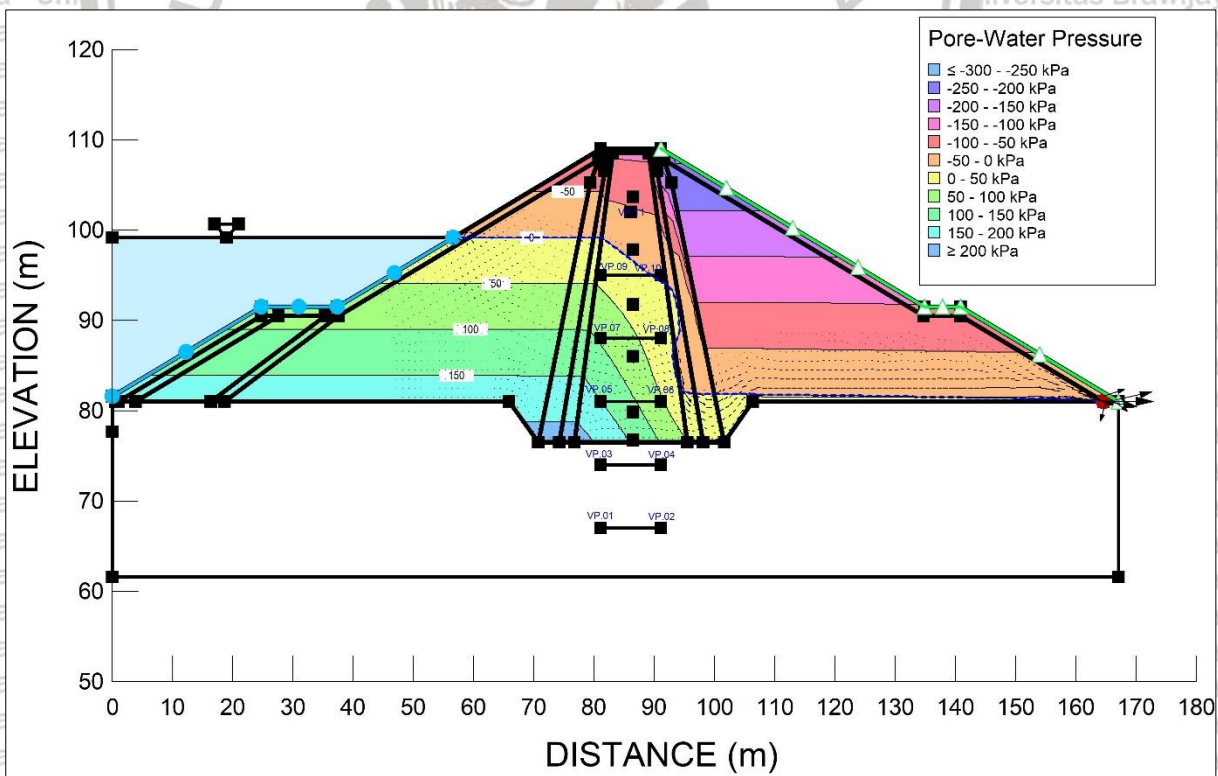


Gambar L1a.4. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Jan 2019)

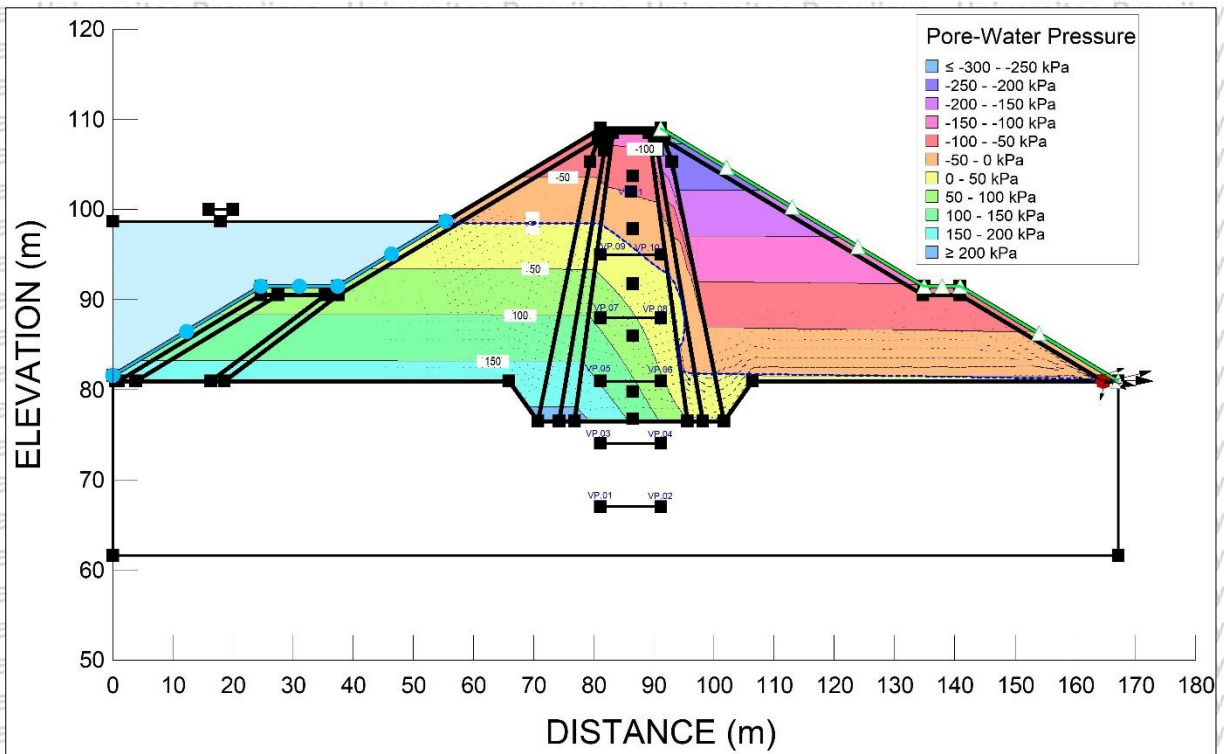




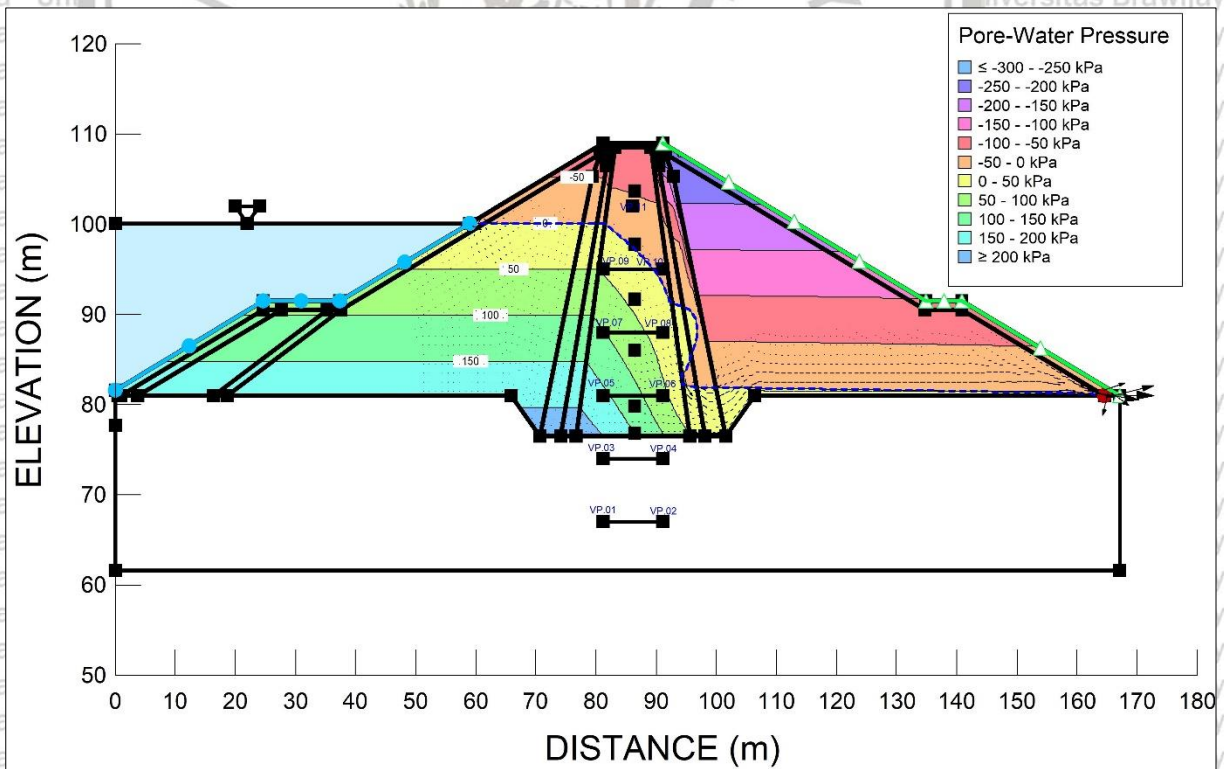
Gambar L1a.5. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Apr 2019)



Gambar L1a.6. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Sep 2019)

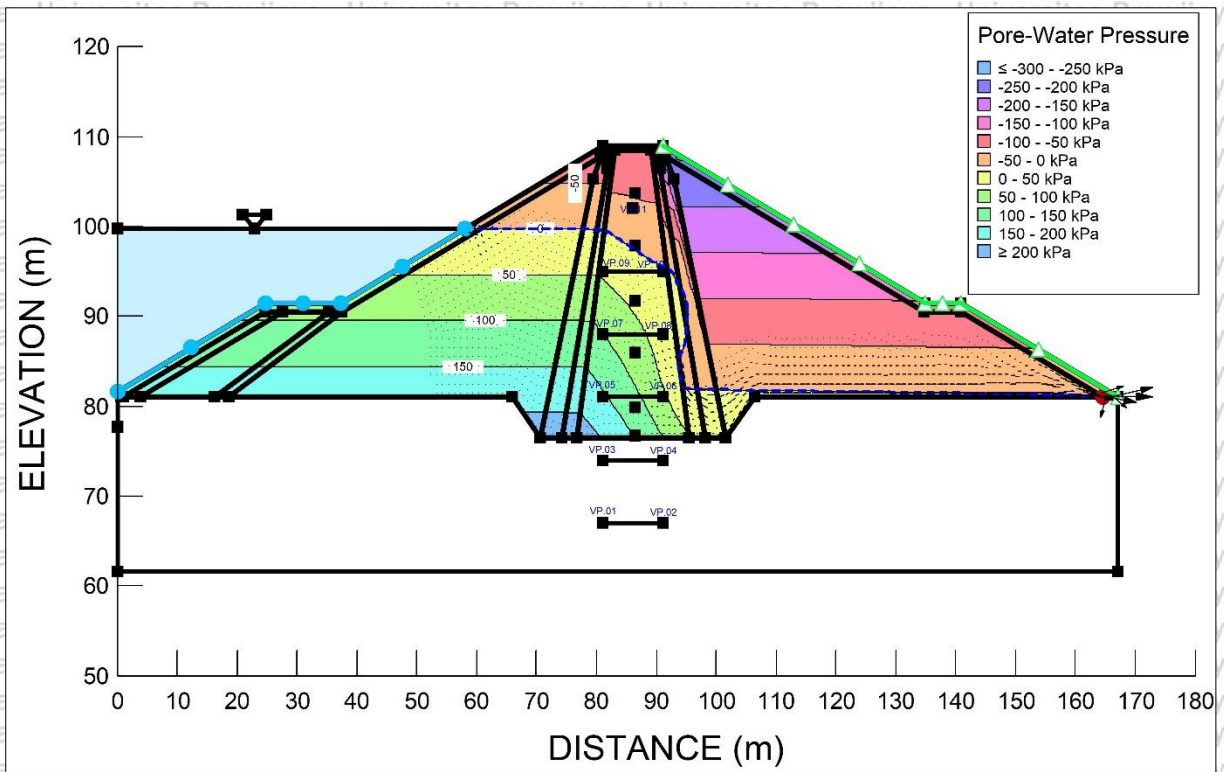


Gambar L1a.7. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Des 2019)

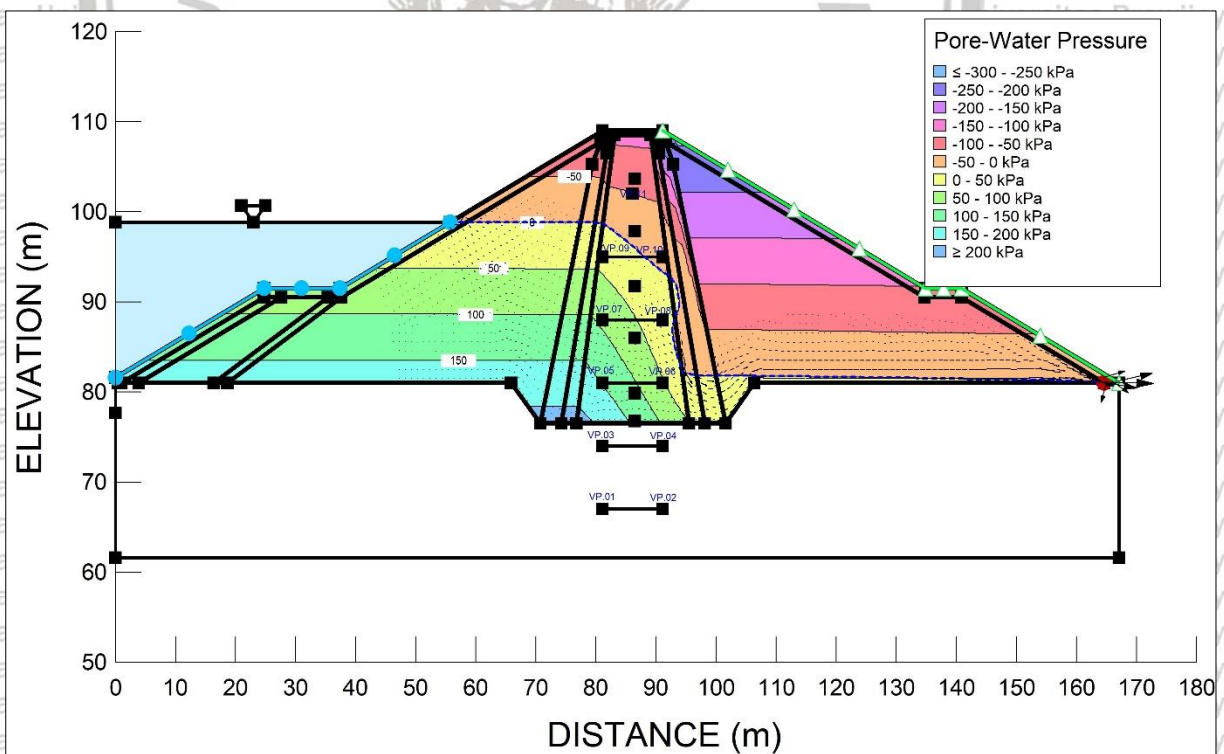


Gambar L1a.8. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (29 Feb 2020)

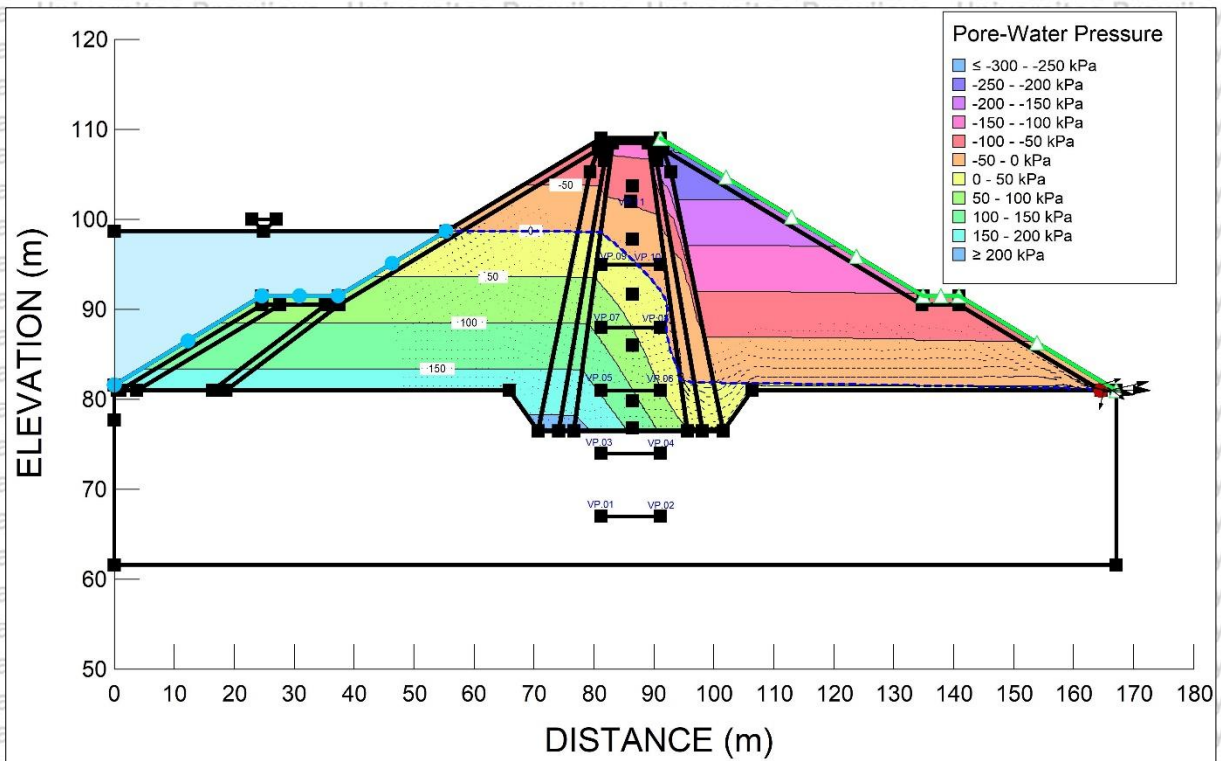




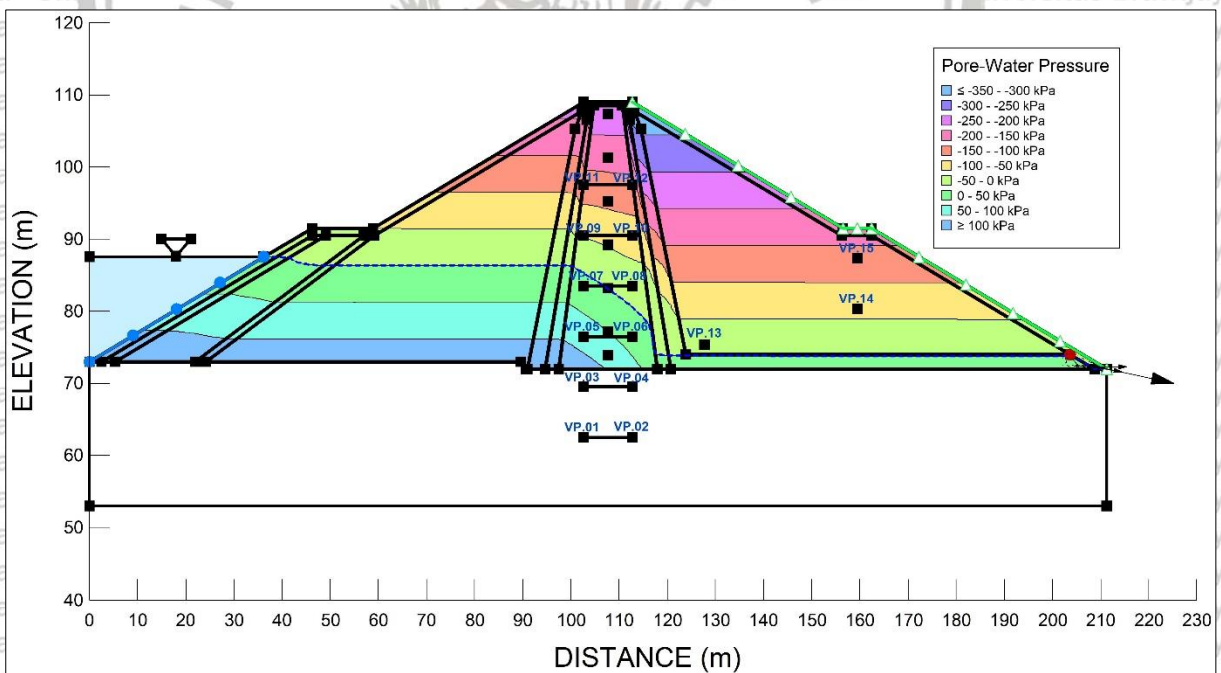
Gambar L1a.9. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Apr 2020)



Gambar L1a.10. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Sep 2020)

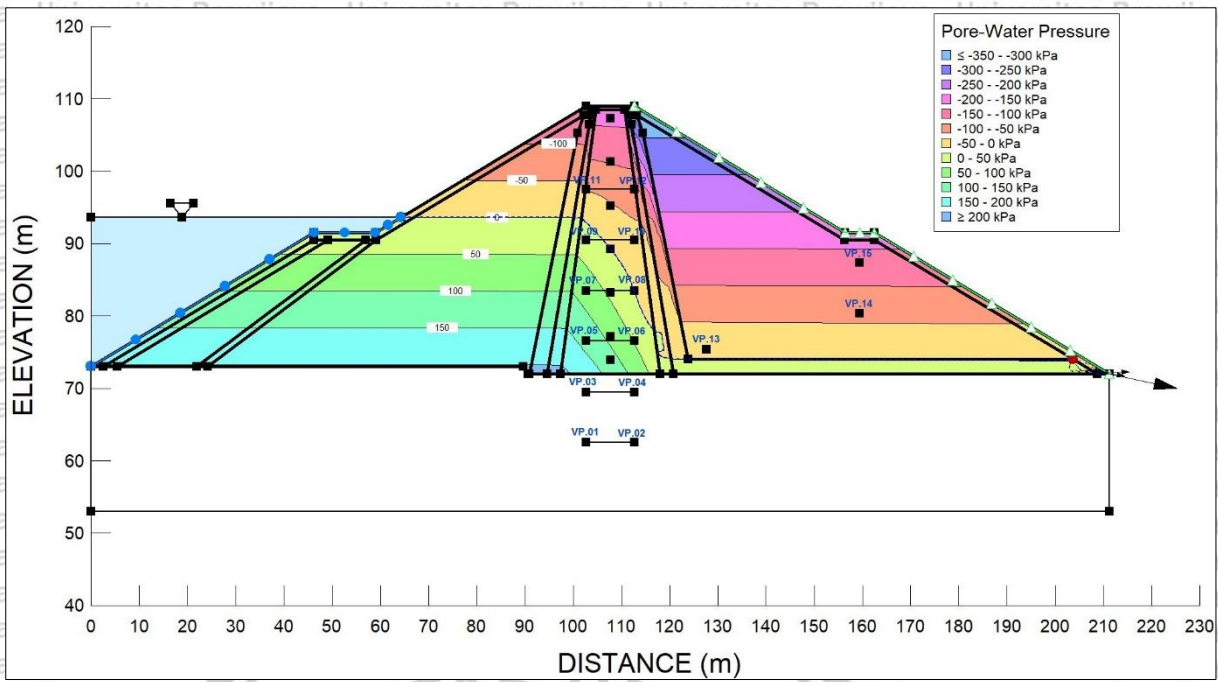


Gambar L1a.11. Tekanan Air Pori Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Des 2020)

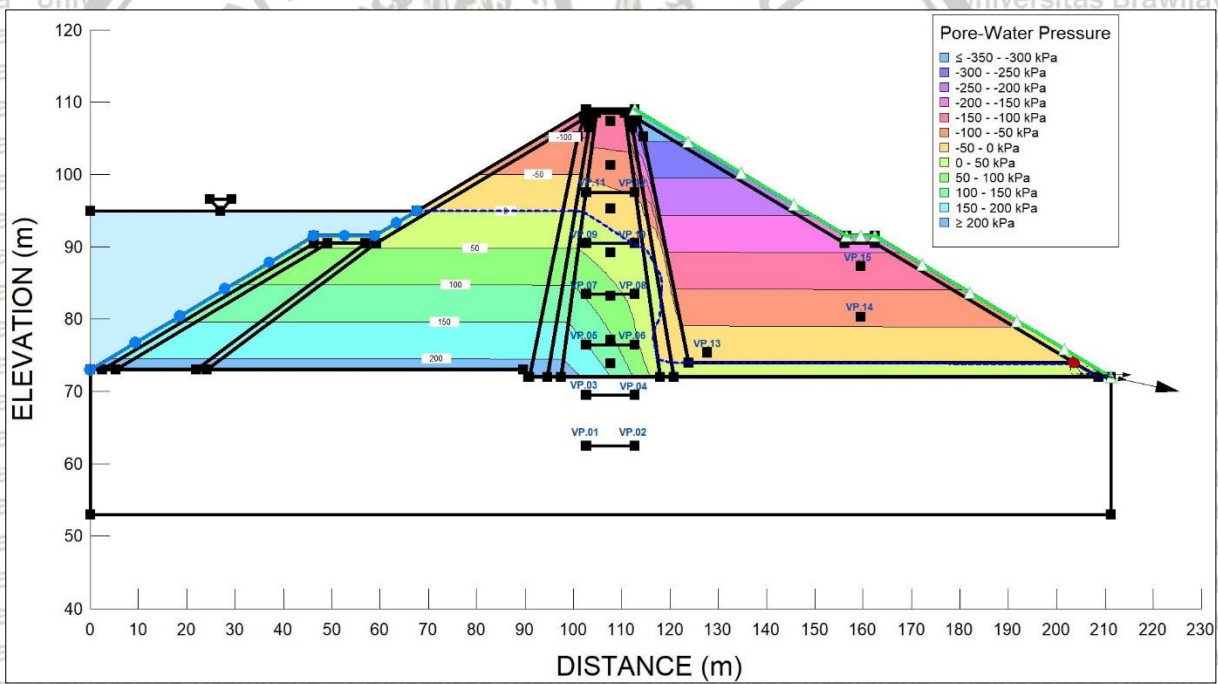


Gambar L1b.1. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Jan 2018)

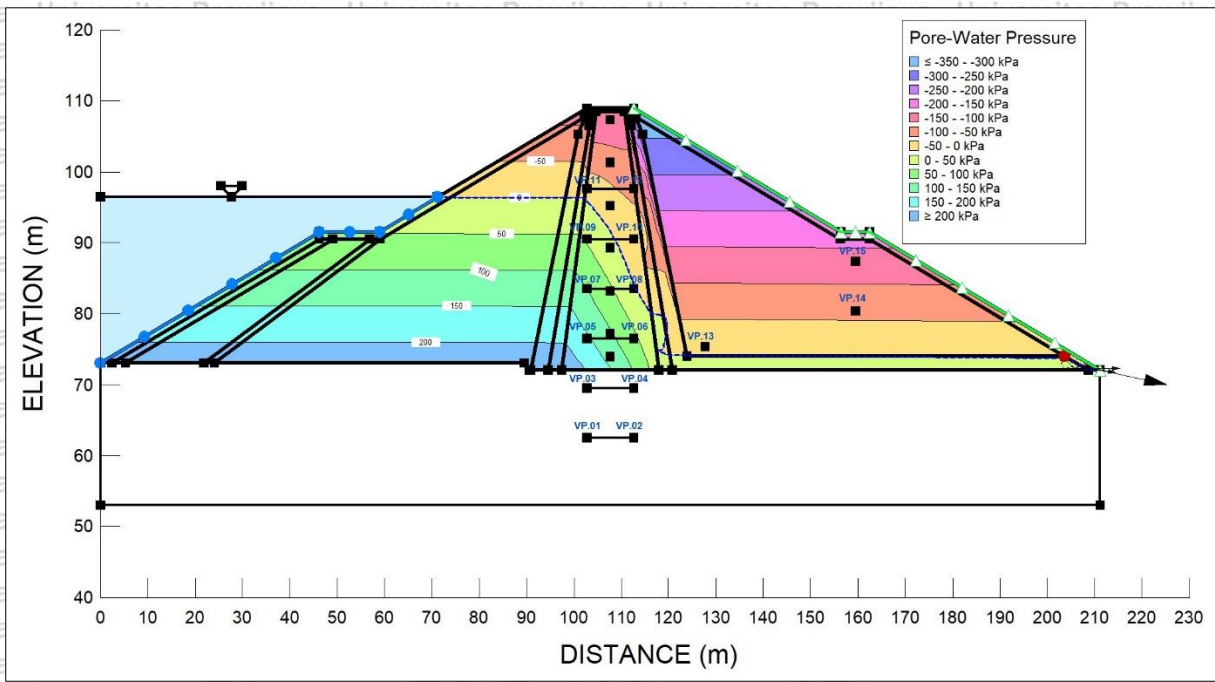




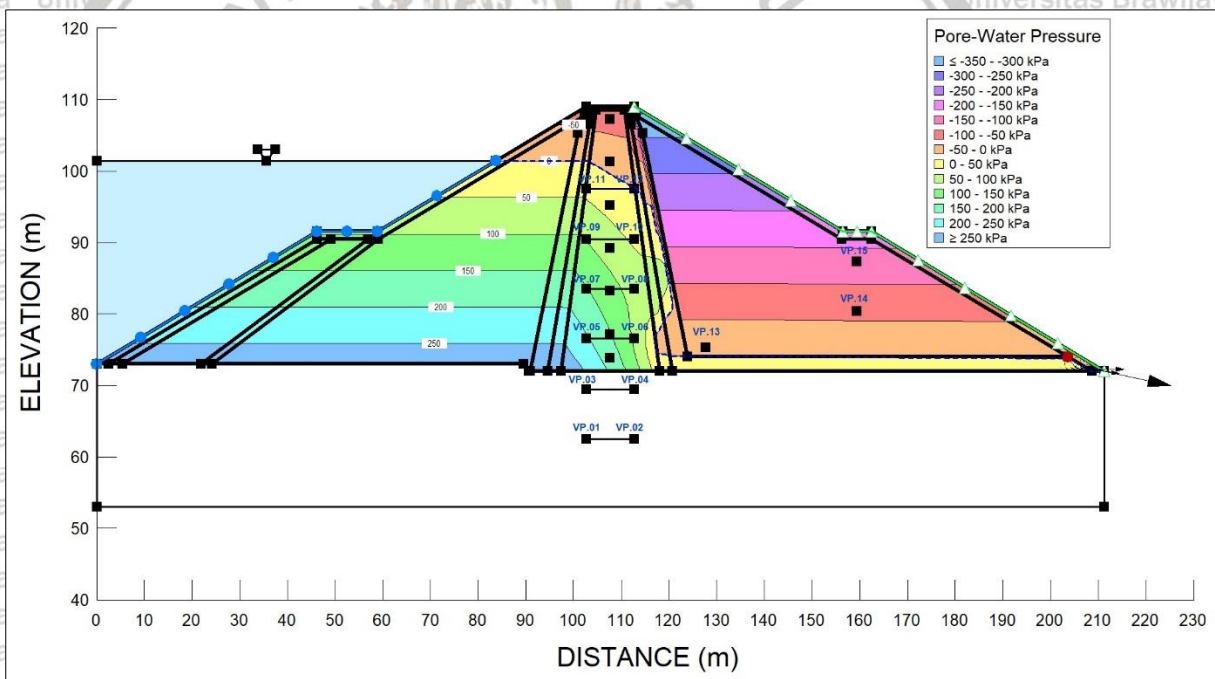
Gambar L1b.2. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (28 Feb 2018)



Gambar L1b.3. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Apr 2018)

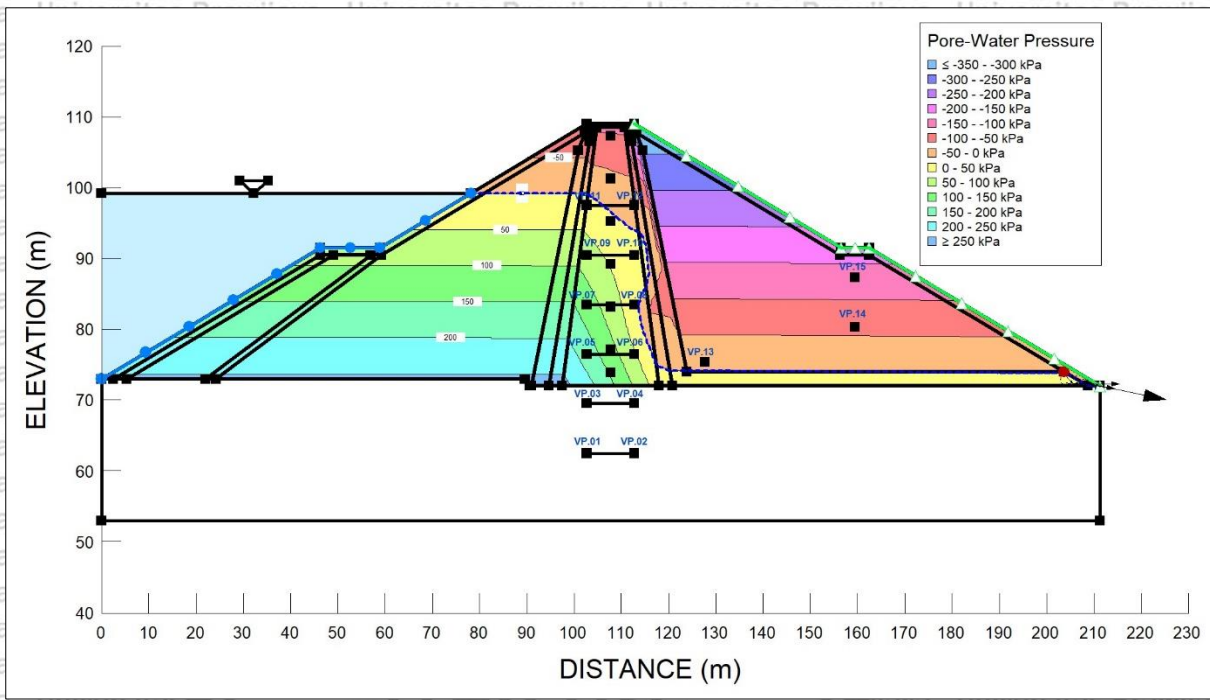


Gambar L1b.4. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Jan 2019)

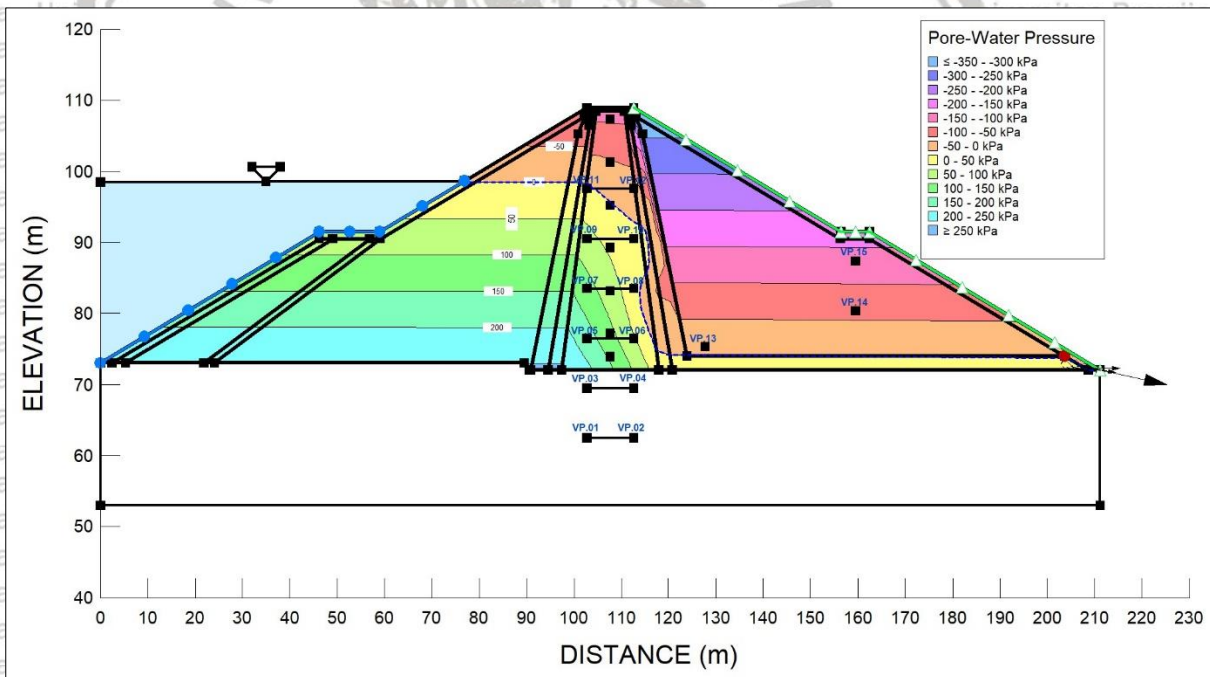


Gambar L1b.5. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Apr 2019)

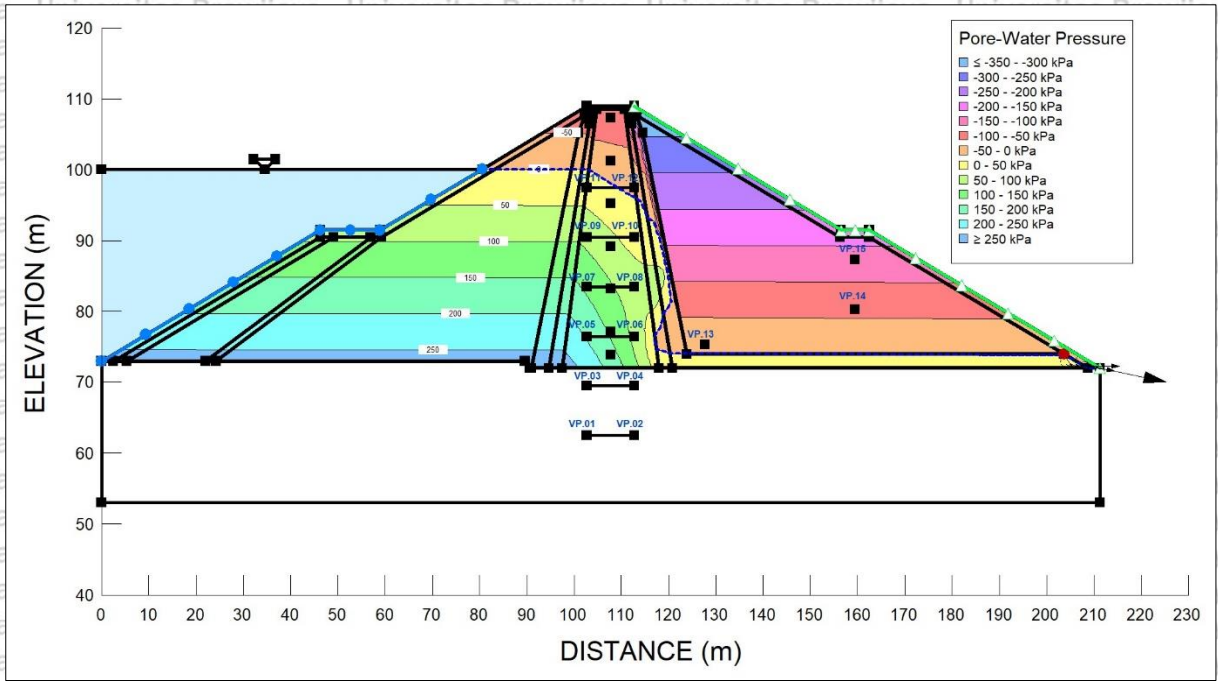




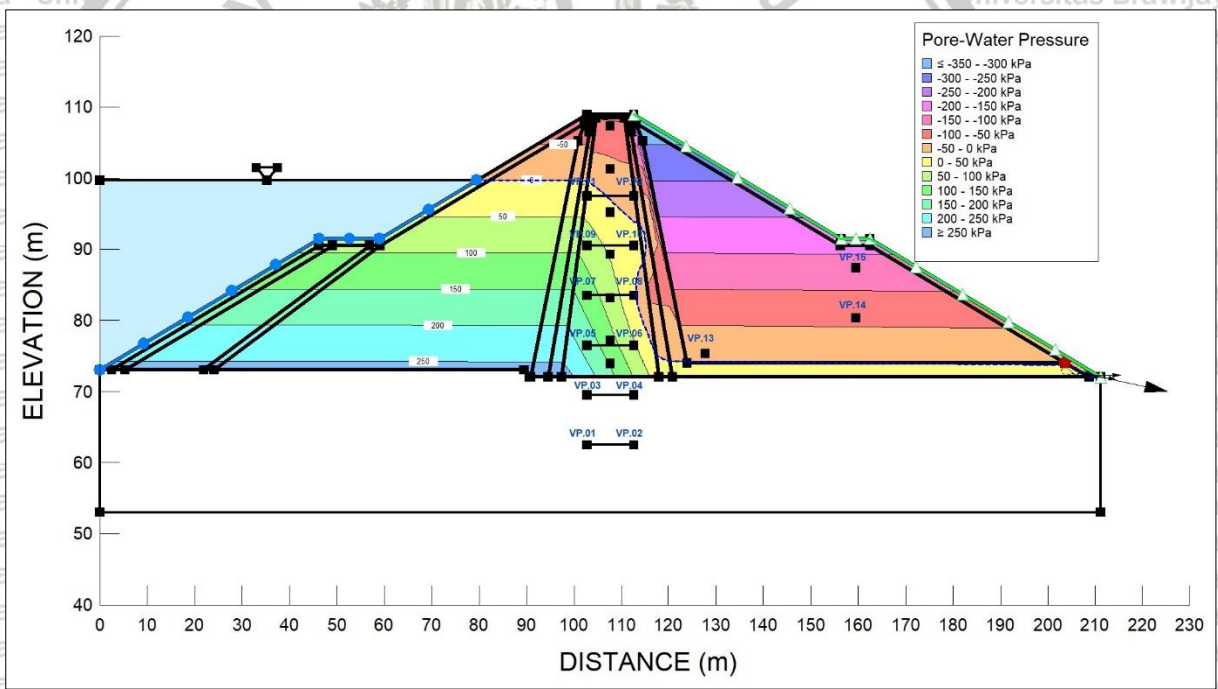
Gambar L1b.6. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Sep 2019)



Gambar L1b.7. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Des 2019)

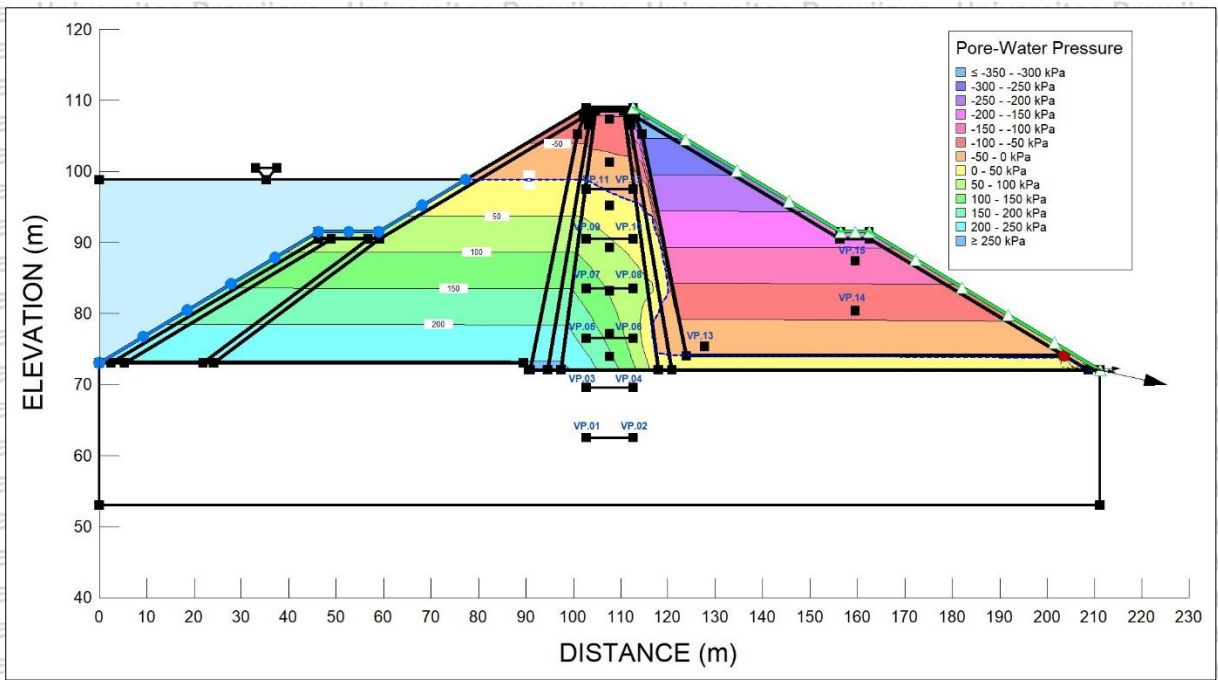


Gambar L1b.8. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (29 Feb 2020)

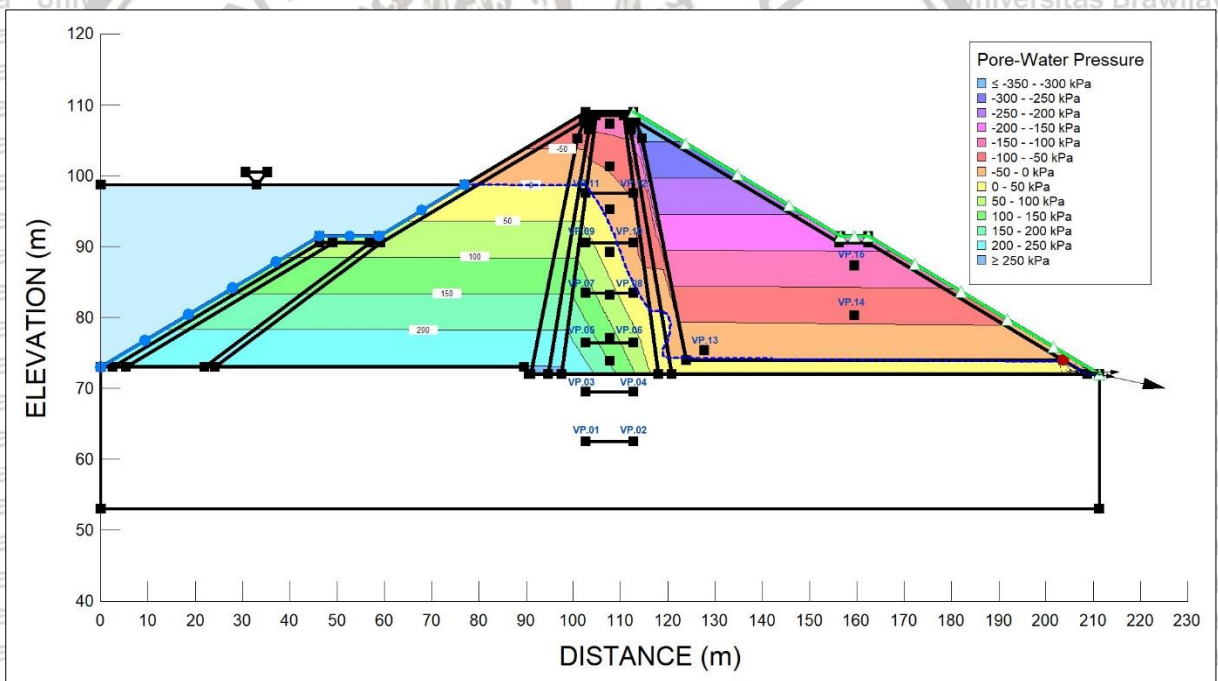


Gambar L1b.9. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Apr 2020)





Gambar L1b.10. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Sep 2020)

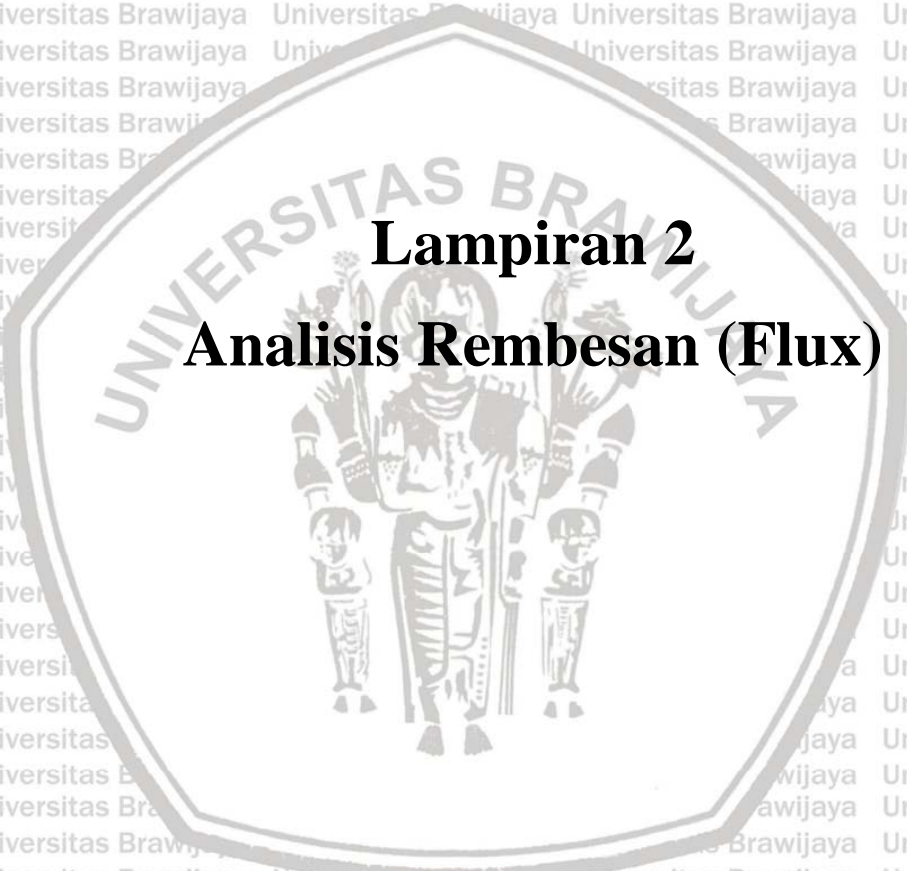


Gambar L1b.11. Tekanan Air Pori Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Des 2020)



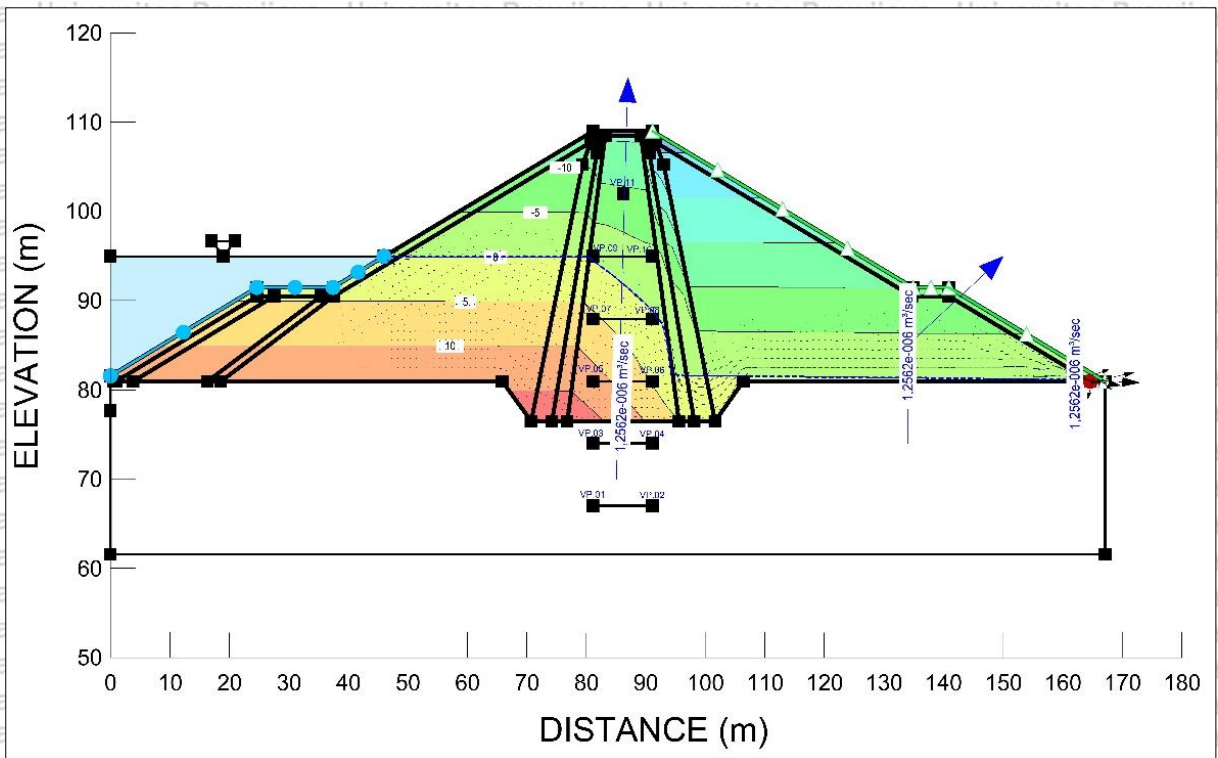
# Lampiran 2

## Analisis Rembesan (Flux)

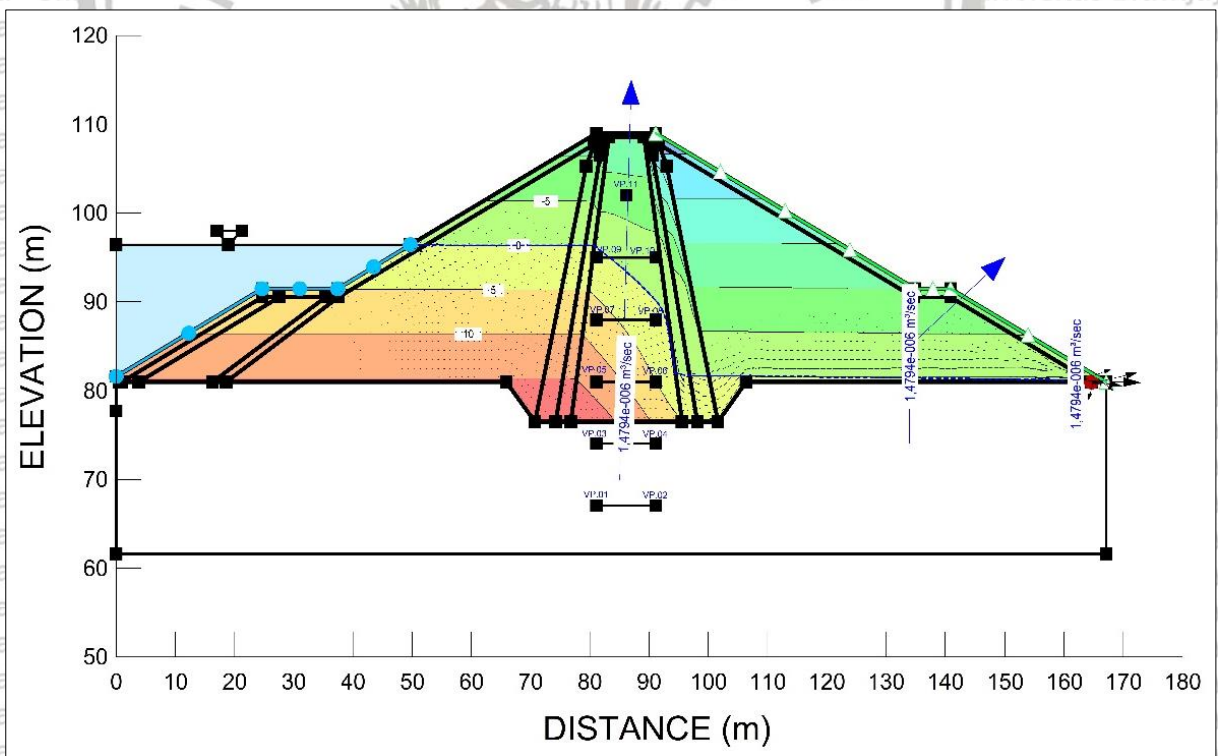






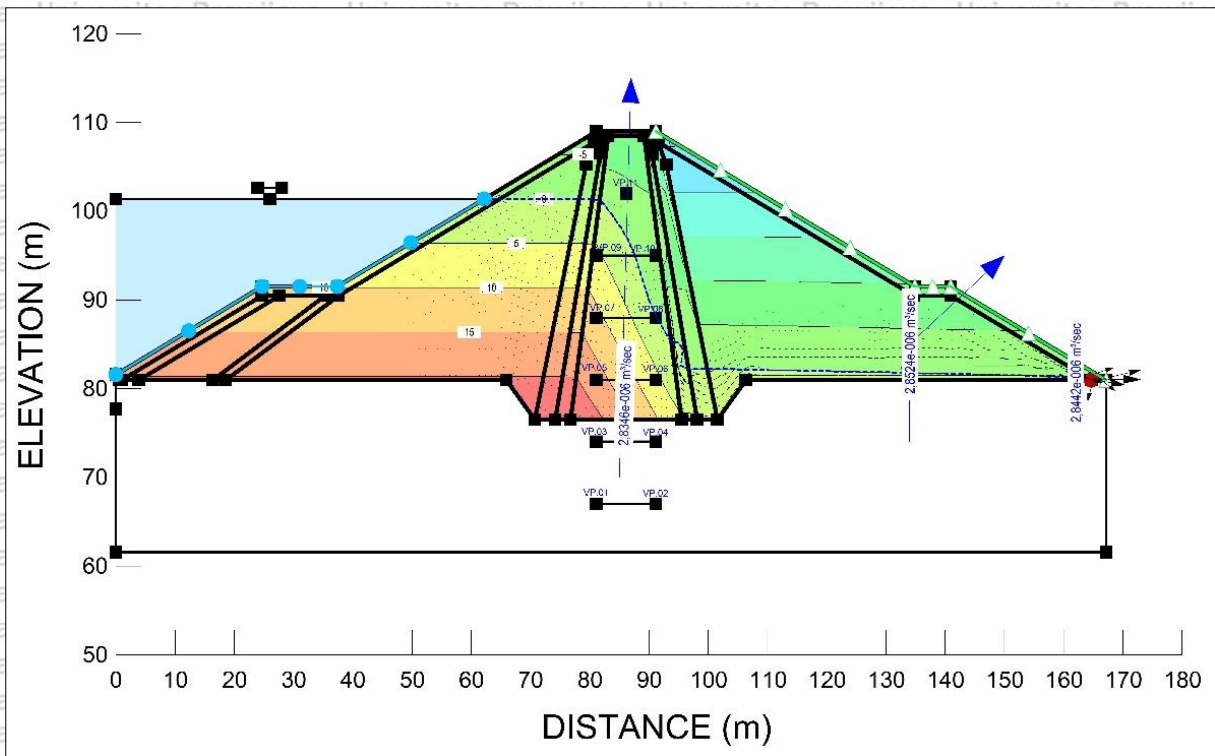


Gambar L2a.3. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Apr 2018)

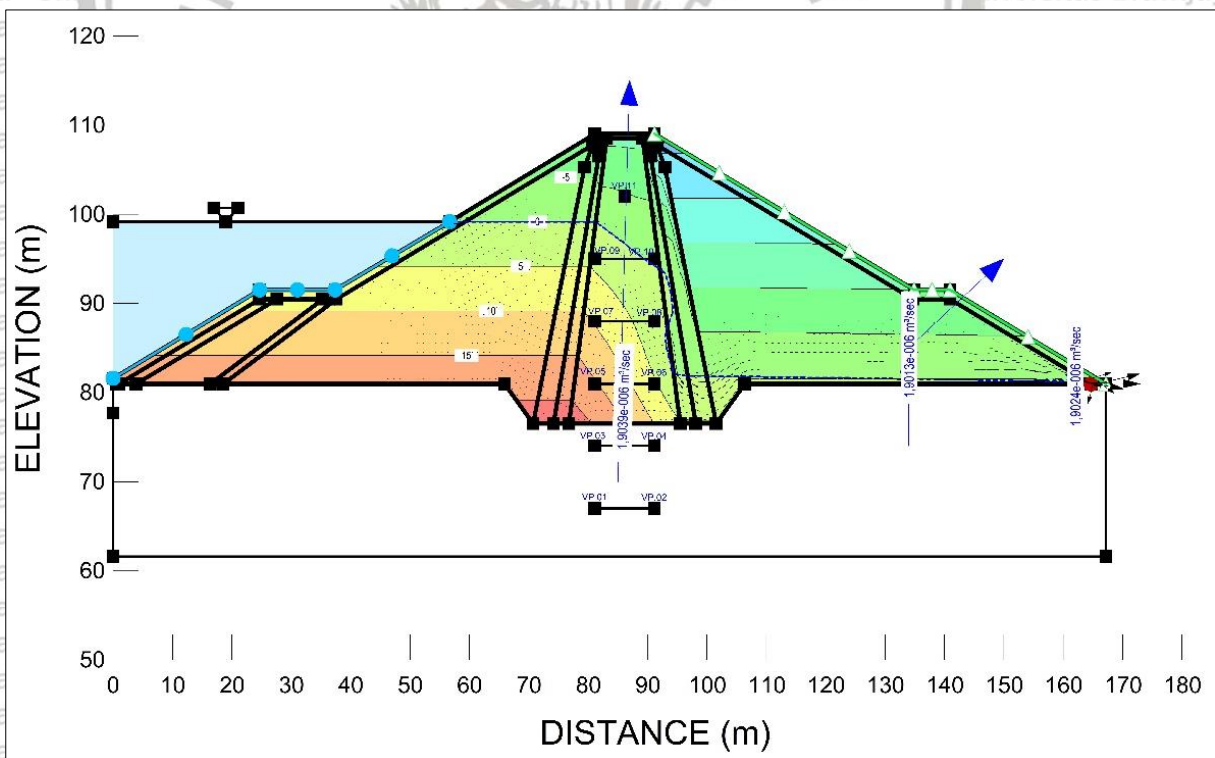


Gambar L2a.4. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Jan 2019)

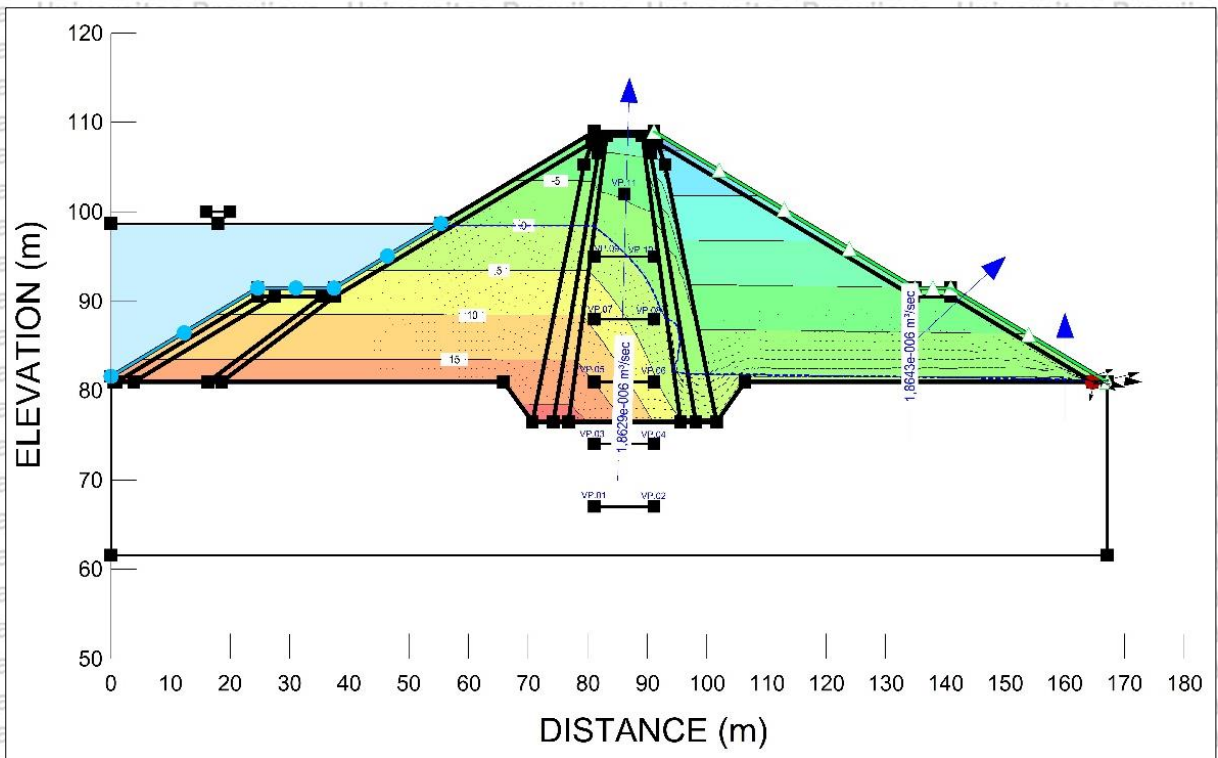




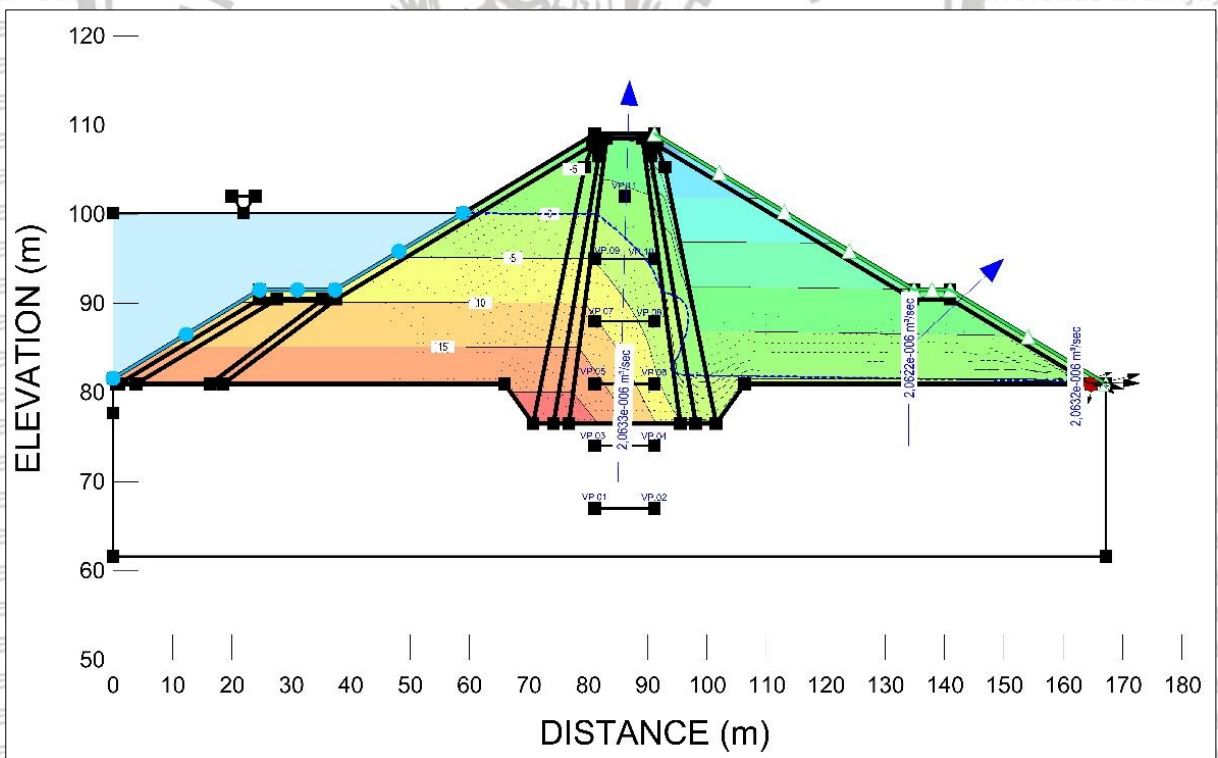
Gambar L2a.5. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Apr 2019)



Gambar L2a.6. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Sep 2019)

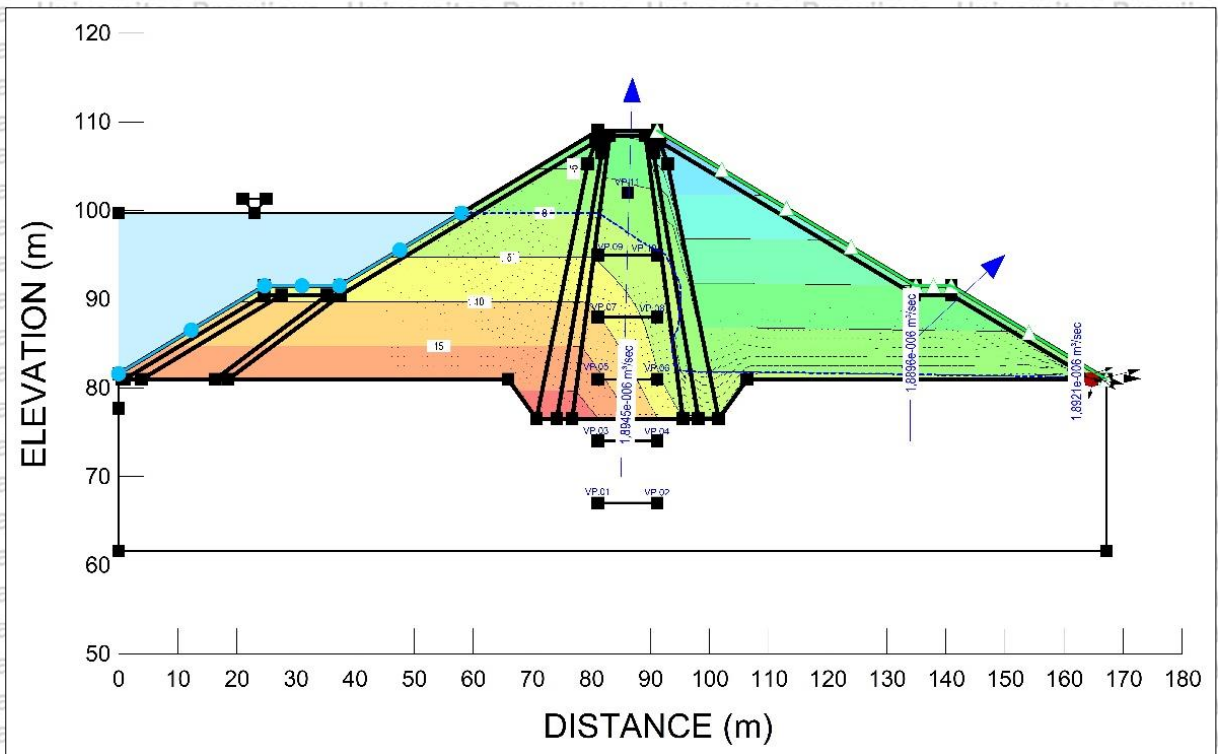


Gambar L2a.7. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Des 2019)

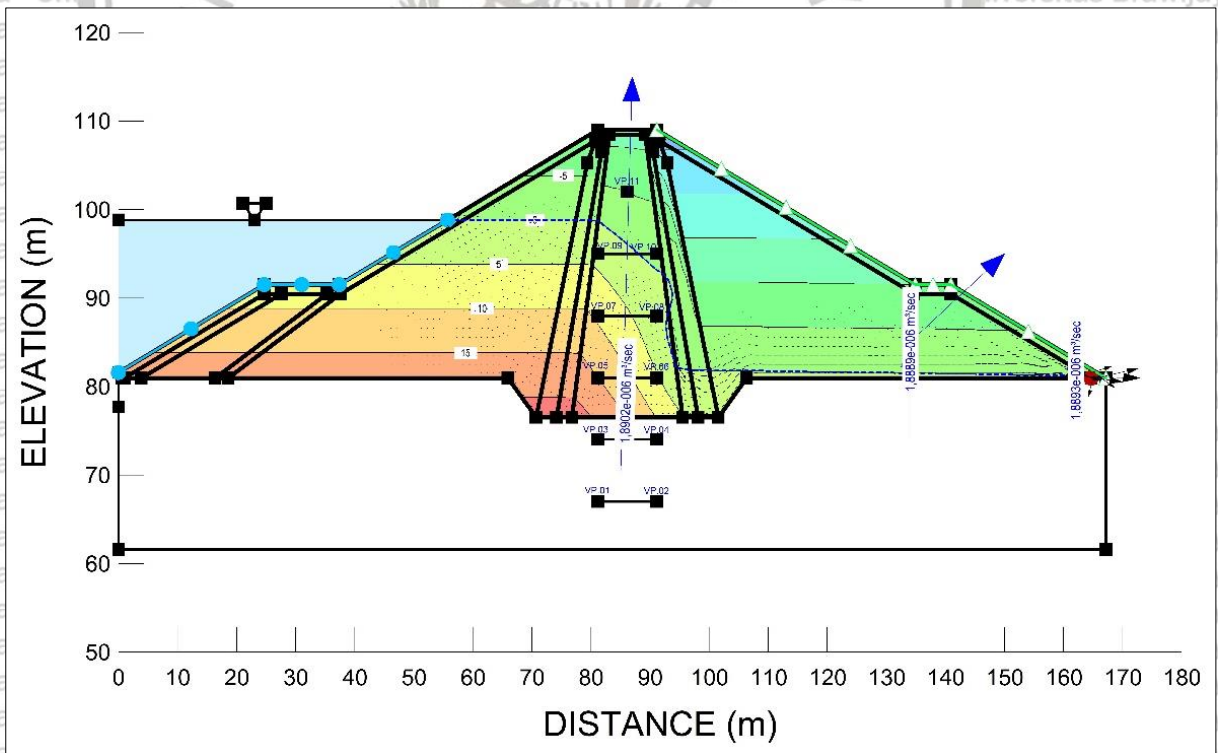


Gambar L2a.8. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (29 Feb 2020)

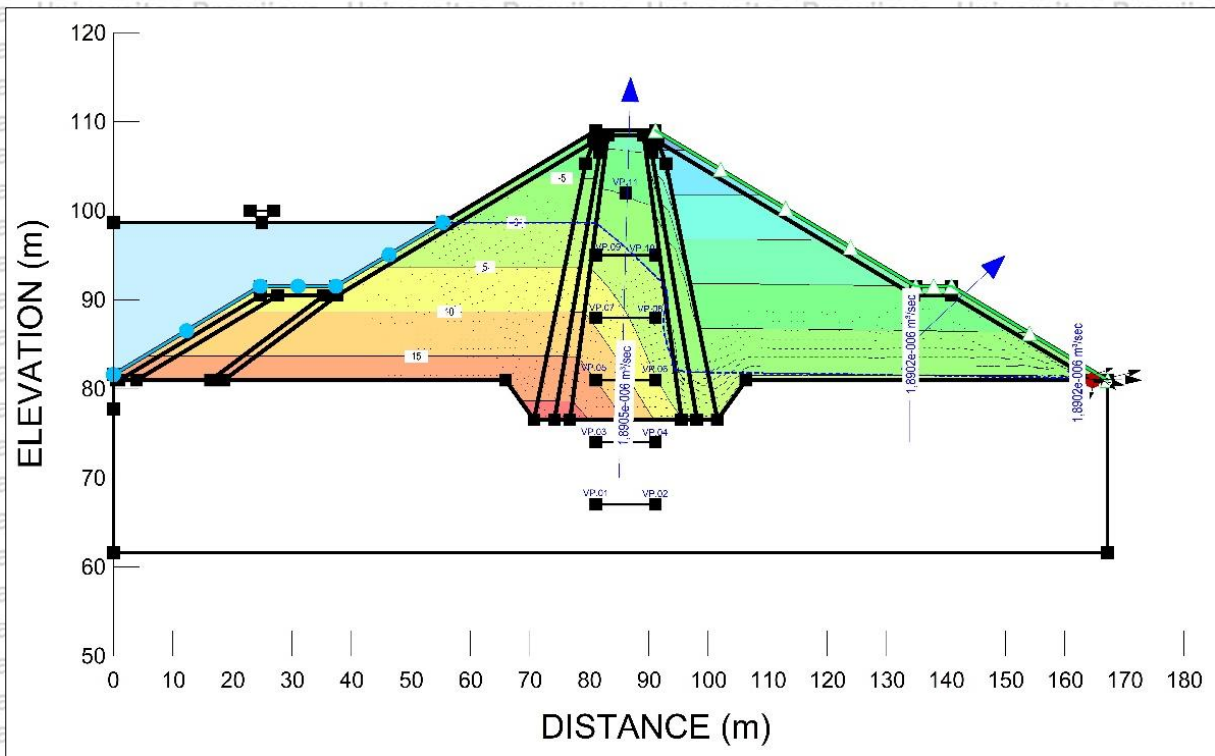




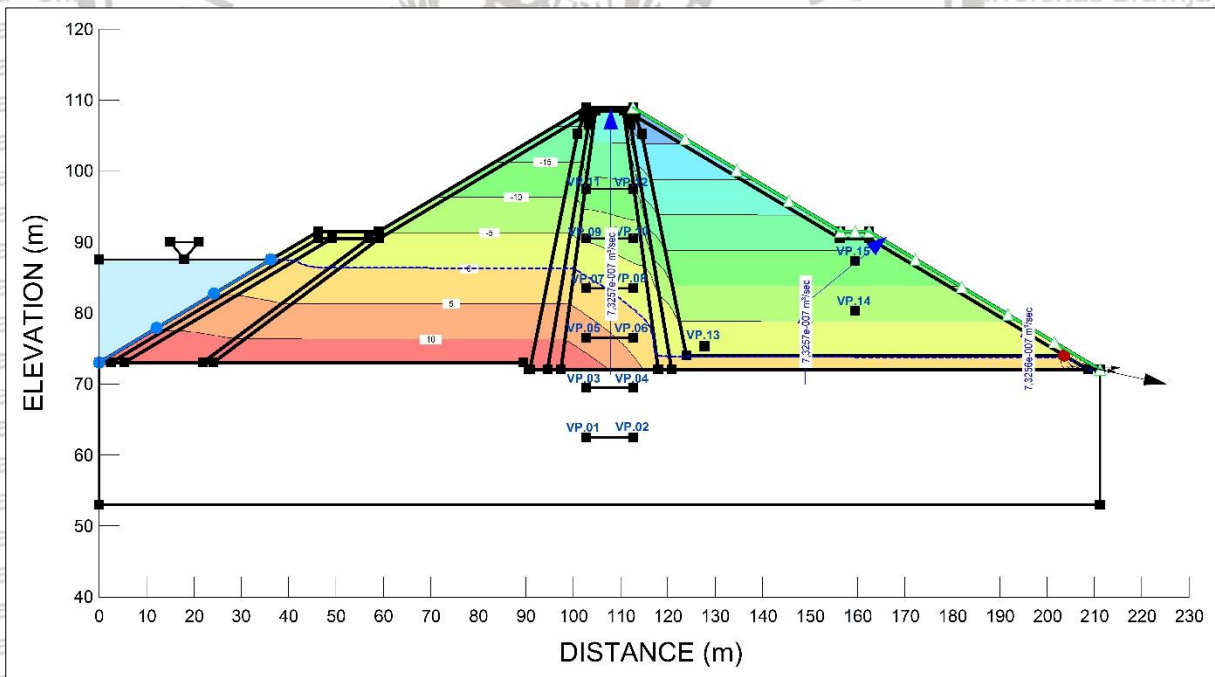
Gambar L2a.9. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Apr 2020)



Gambar L2a.10. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (30 Sep 2020)

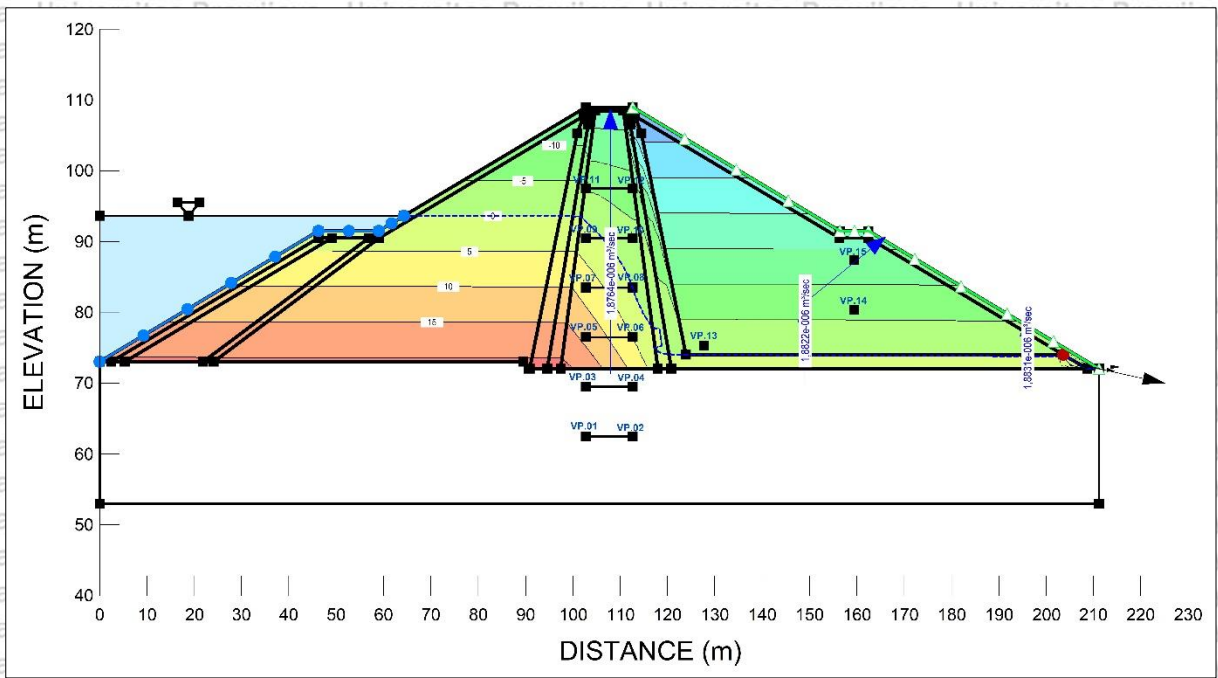


Gambar L2a.11. Rembesan (Flux) Penampang MD.10 STA 0+300 (31 Des 2020)

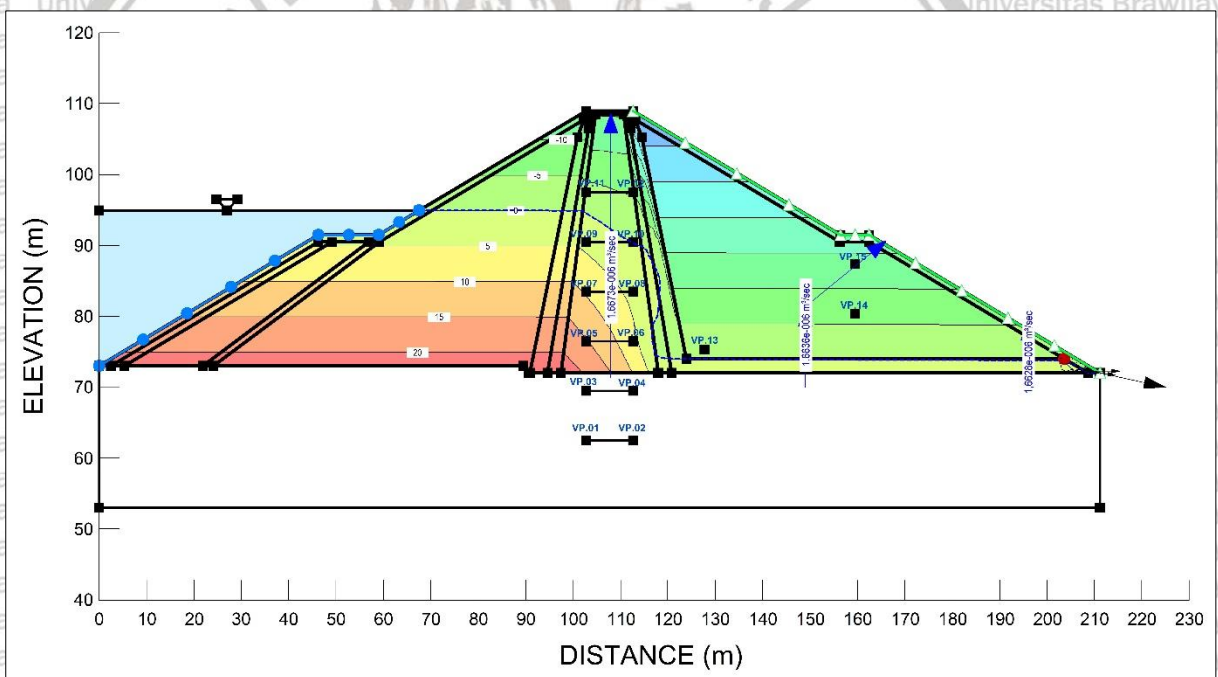


Gambar L2b.1. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Jan 2018)

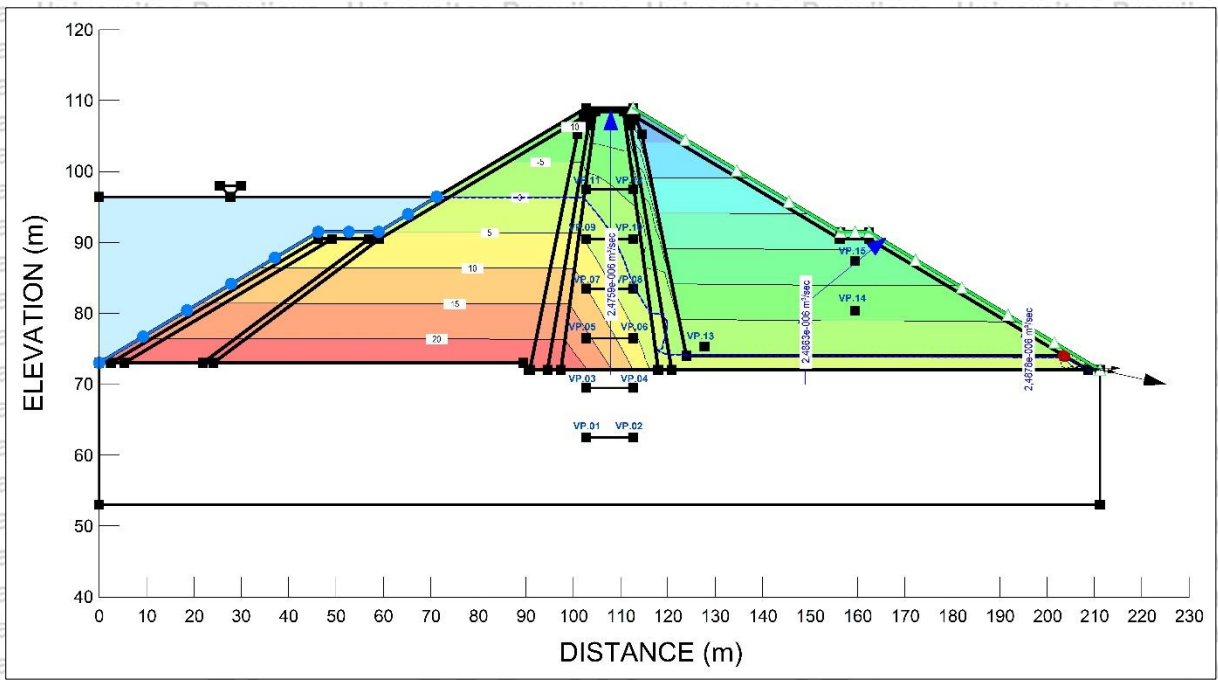




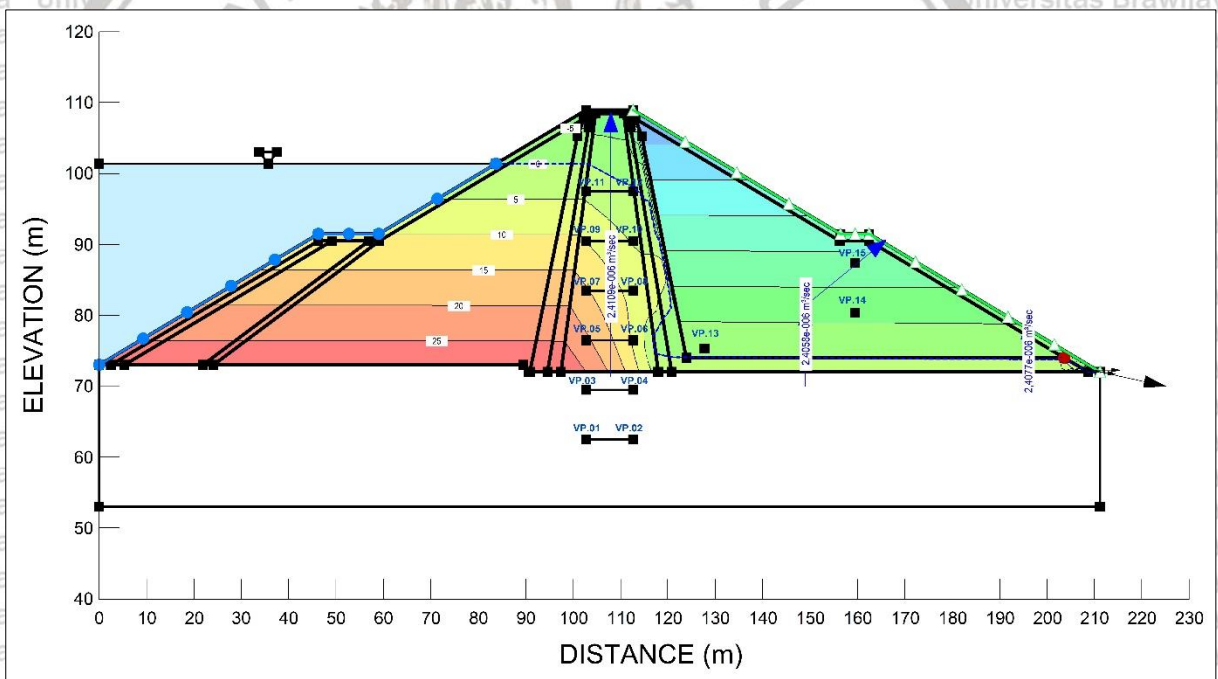
Gambar L2b.2. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (28 Feb 2018)



Gambar L2b.3. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Apr 2018)

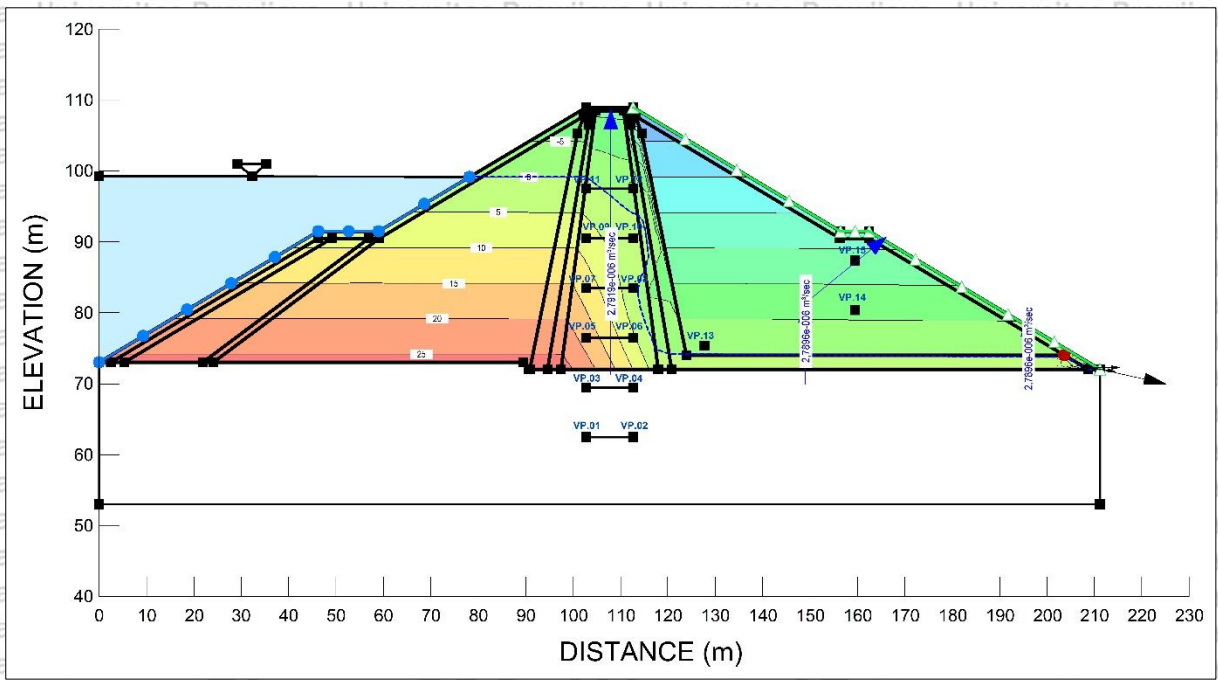


Gambar L2b.4. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Jan 2019)

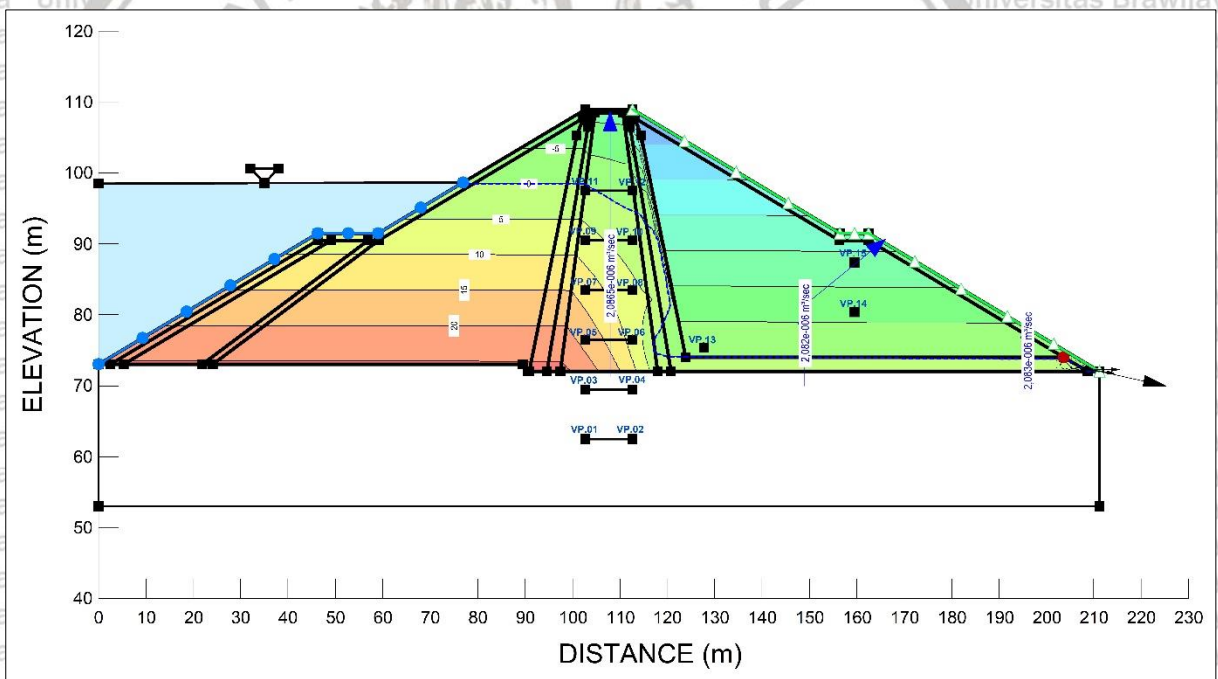


Gambar L2b.5. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Apr 2019)

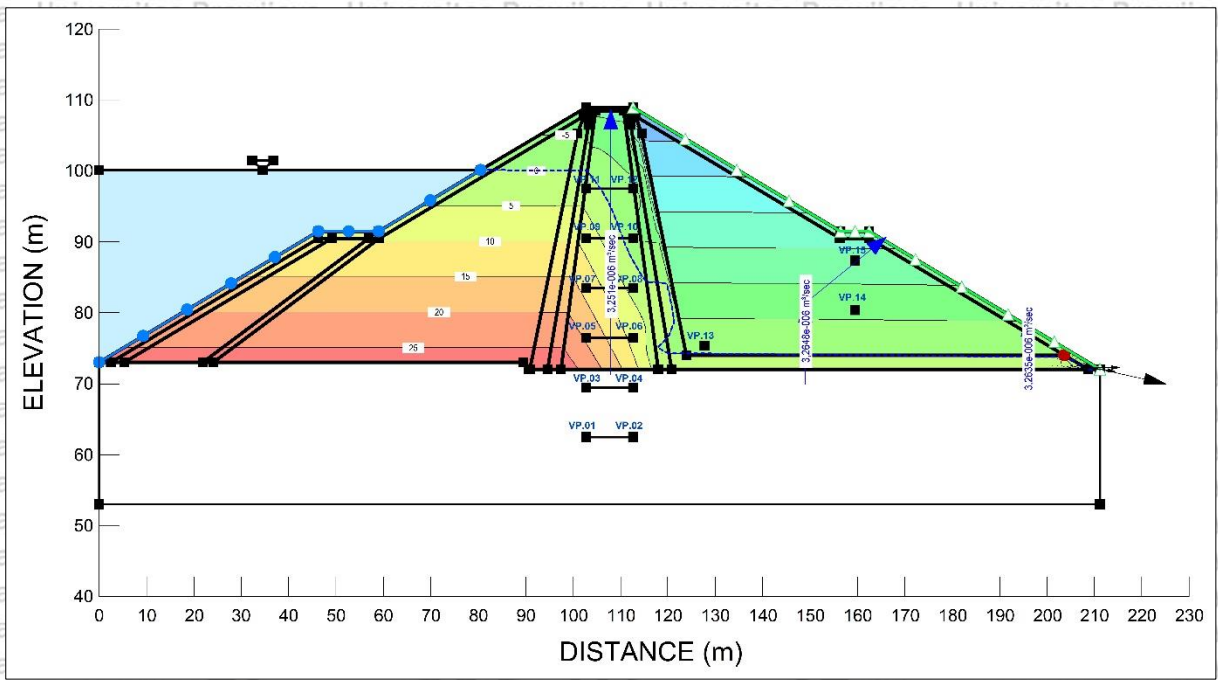




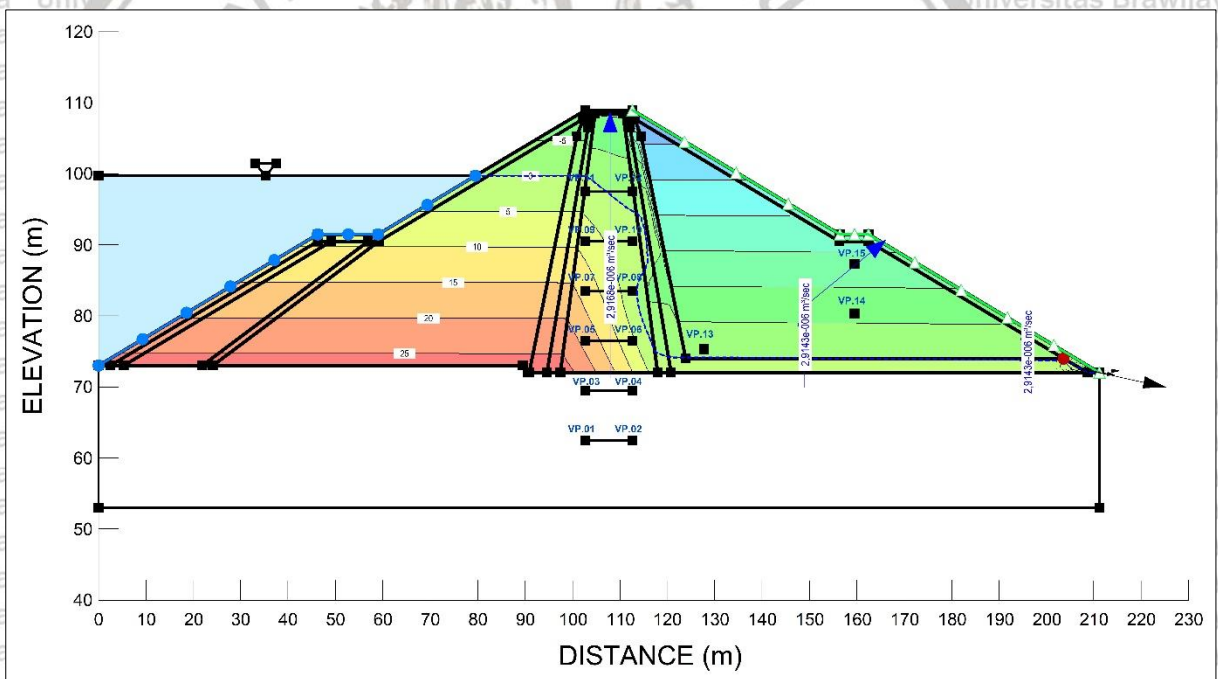
Gambar L2b.6. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Sep 2019)



Gambar L2b.7. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Des 2019)

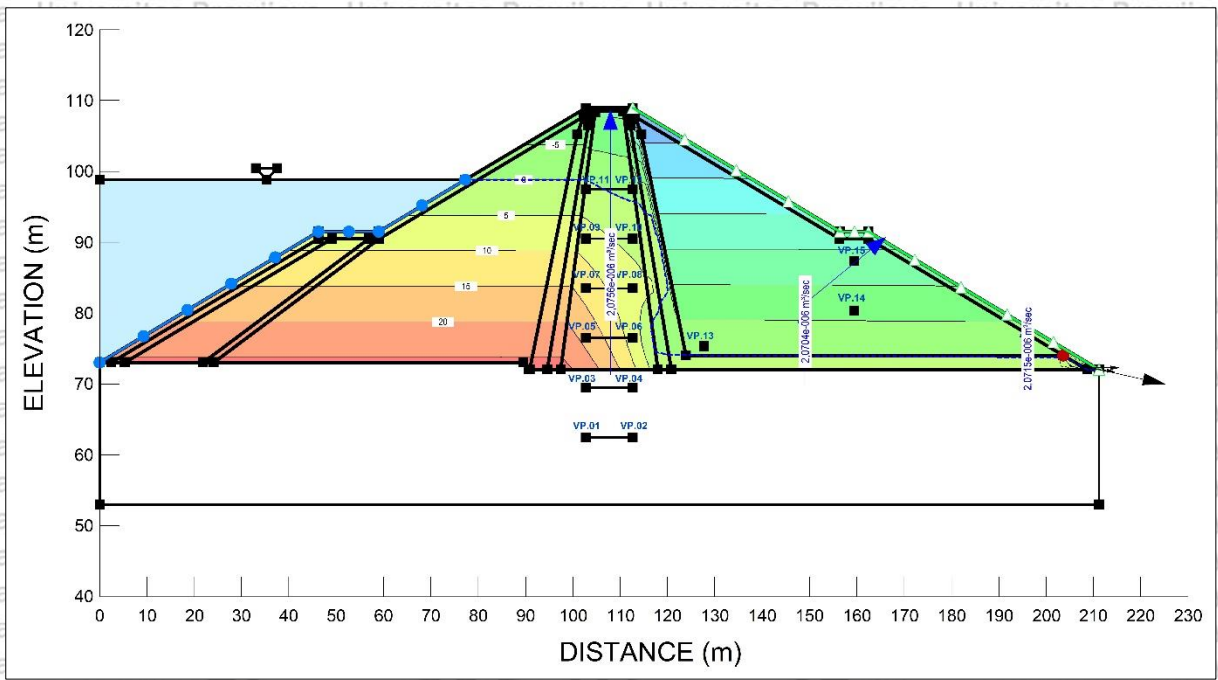


Gambar L2b.8. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (29 Feb 2020)

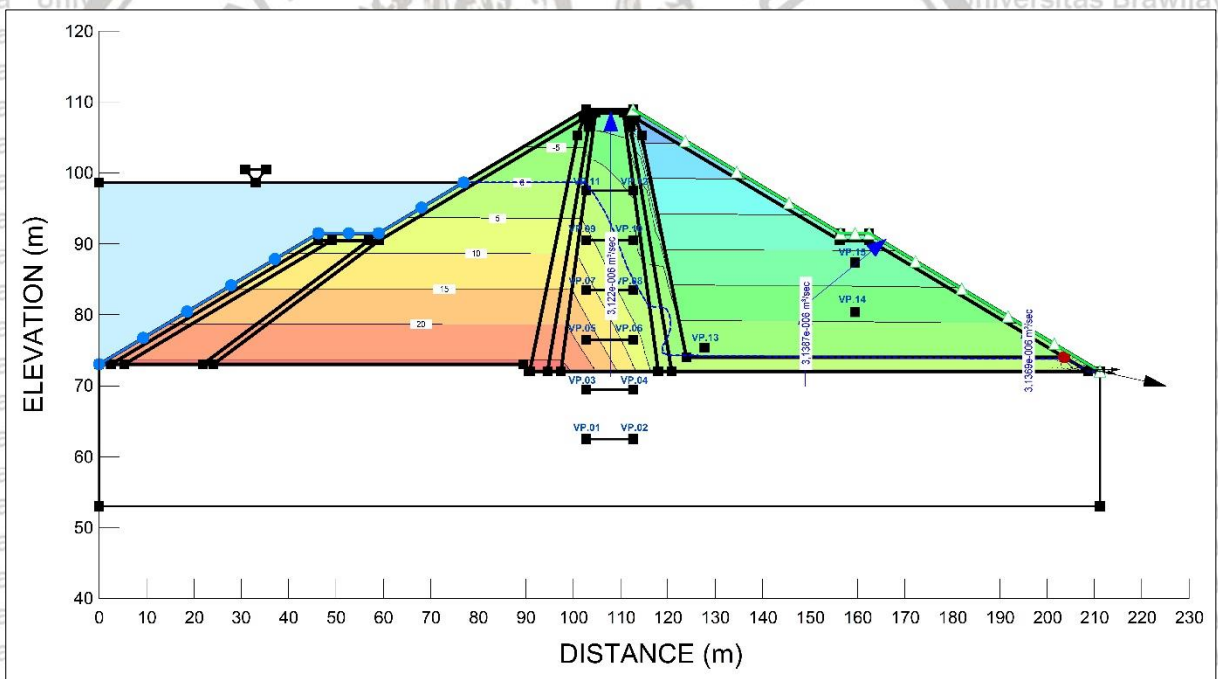


Gambar L2b.9. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Apr 2020)

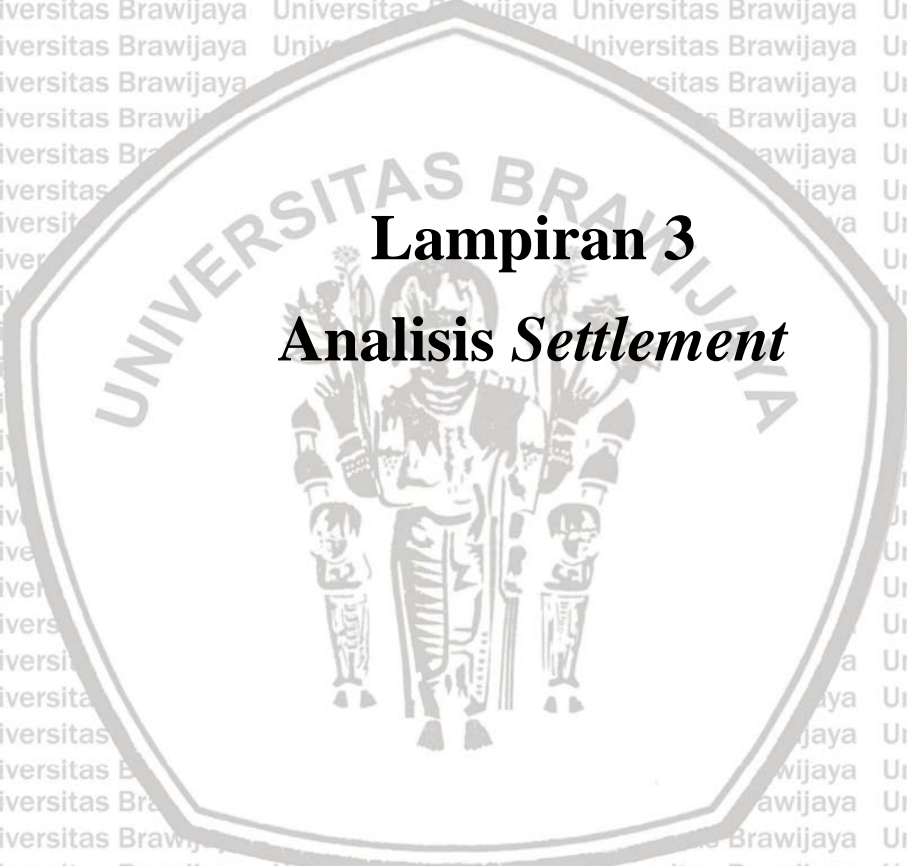




Gambar L2b.10. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (30 Sep 2020)



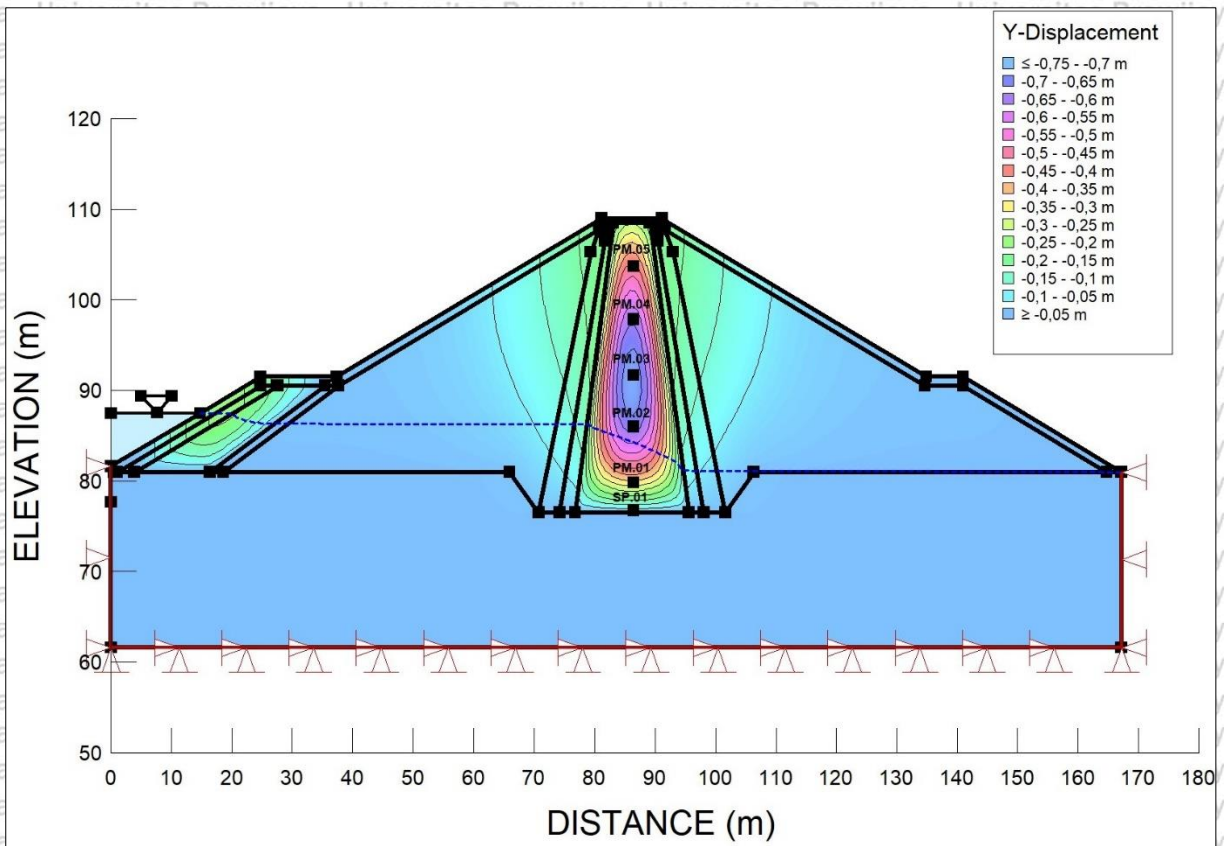
Gambar L2b.11. Rembesan (Flux) Penampang MD.16 STA 0+420 (31 Des 2020)



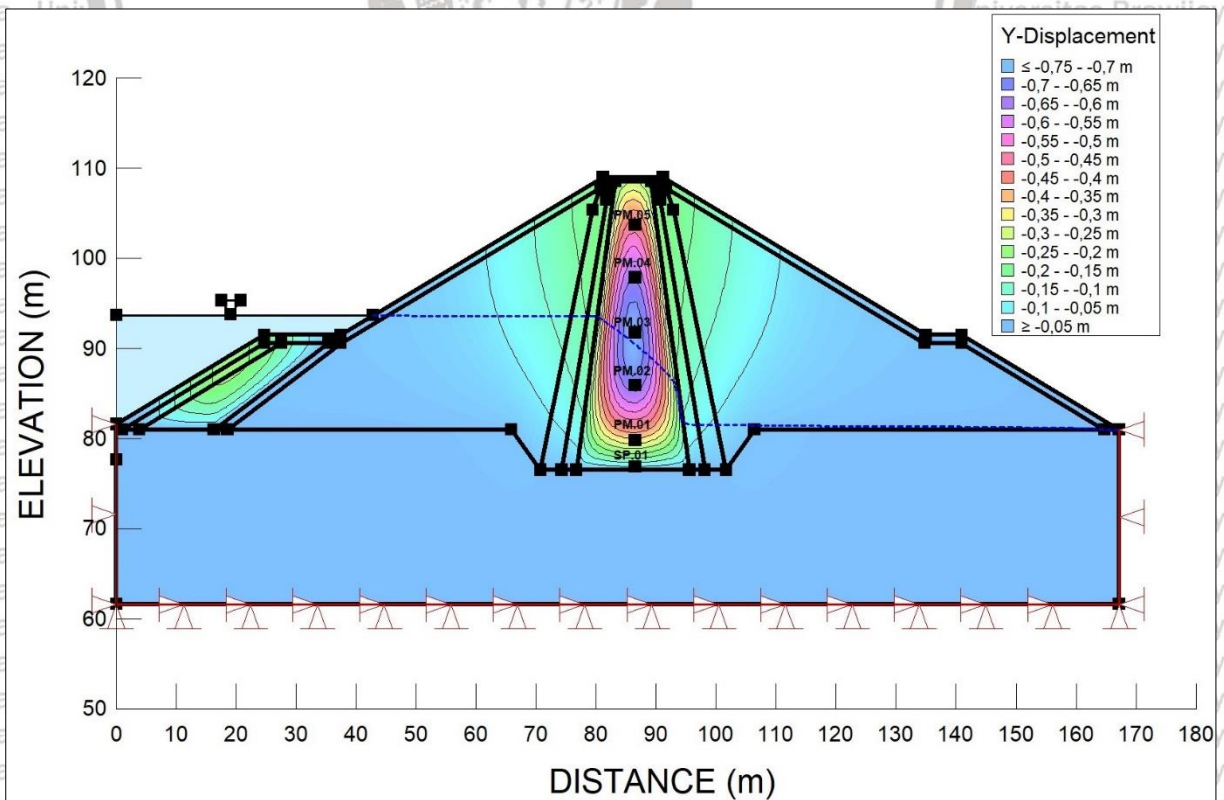
# Lampiran 3

## *Analisis Settlement*

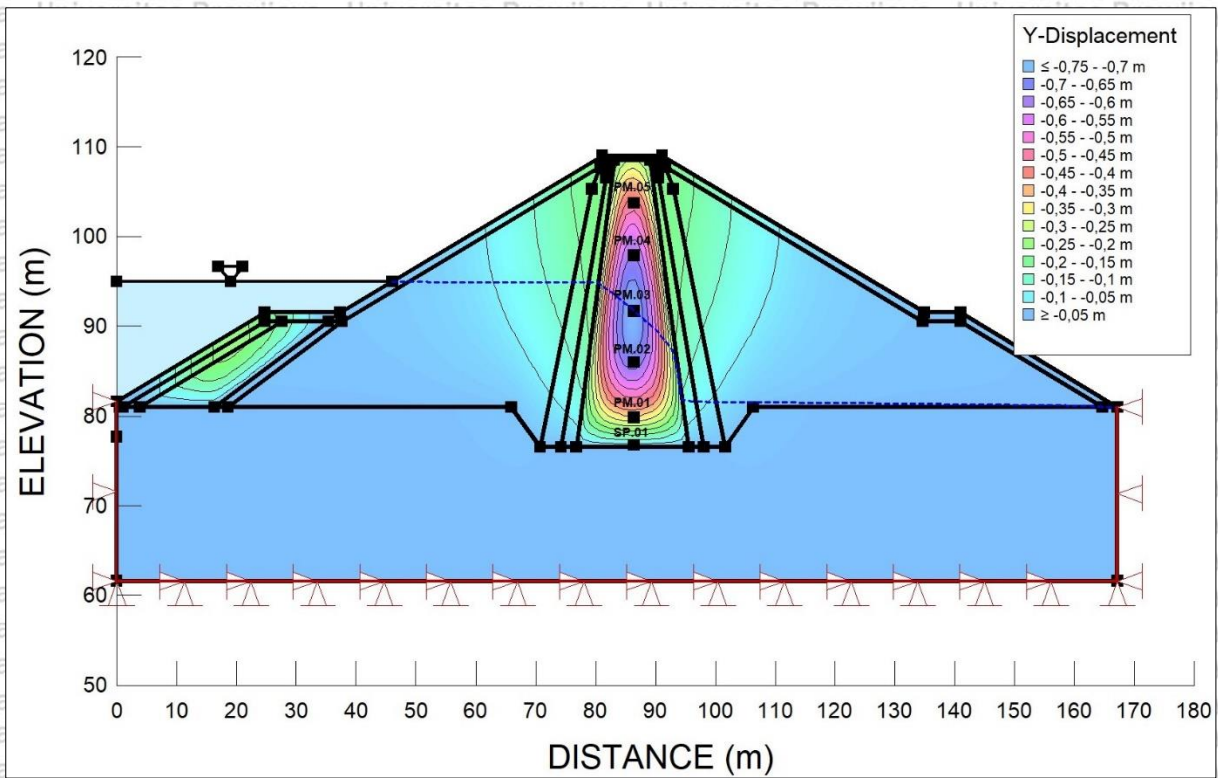




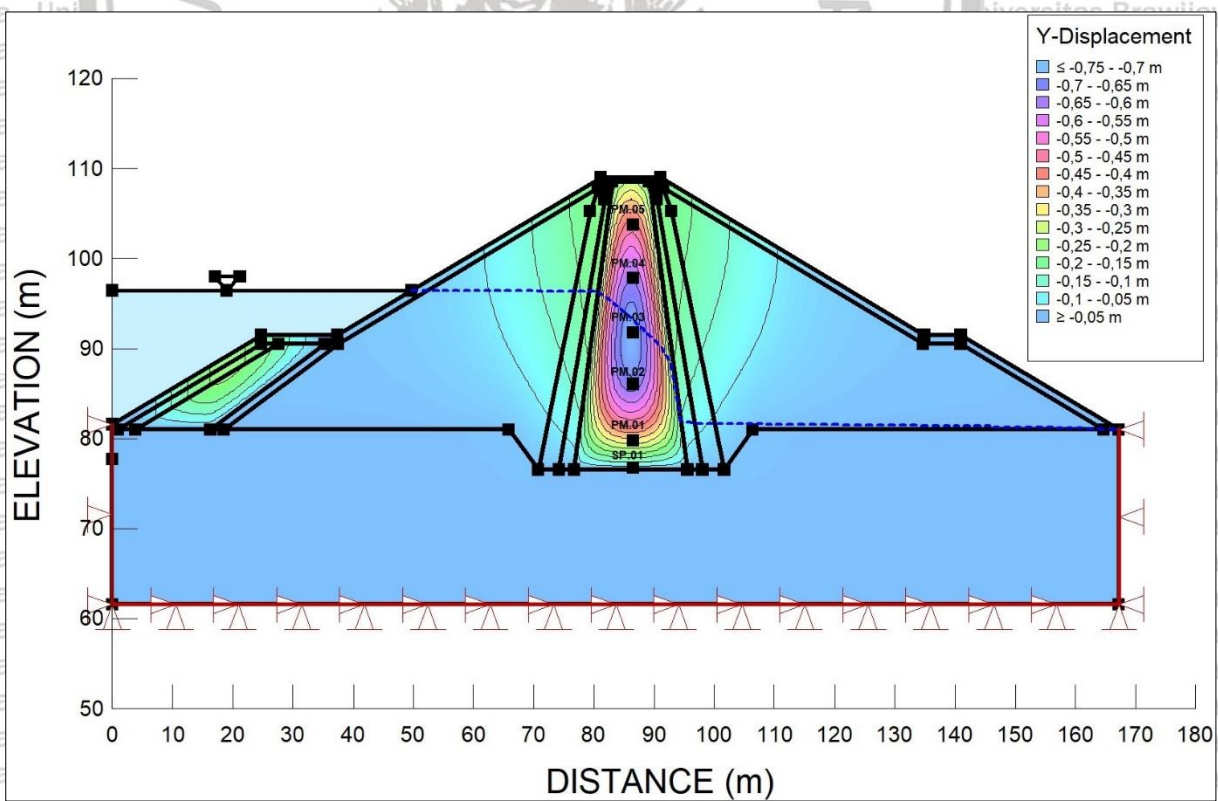
Gambar L3a.1. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (31 Jan 2018)*



Gambar L3a.2. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (28 Feb 2018)*

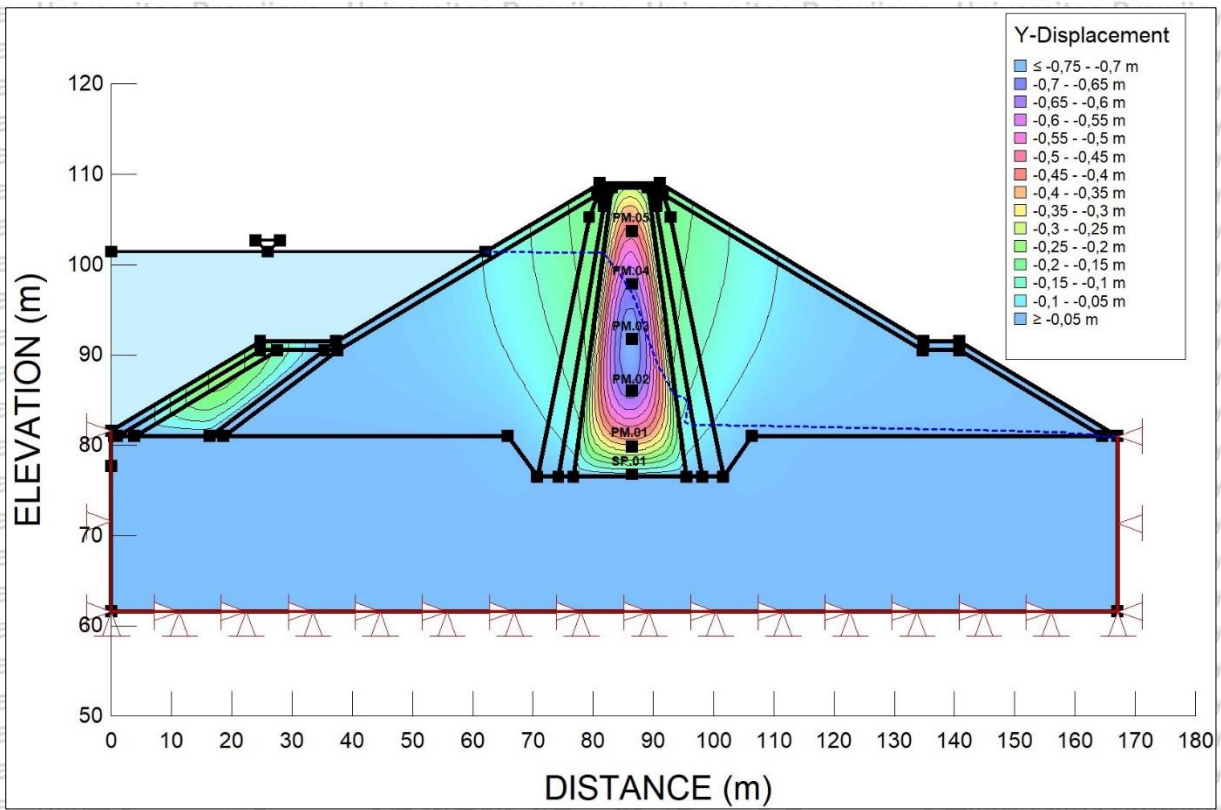


Gambar L3a.3. *Settlement* Penampang MD.11 STA 0+320 (30 Apr 2018)

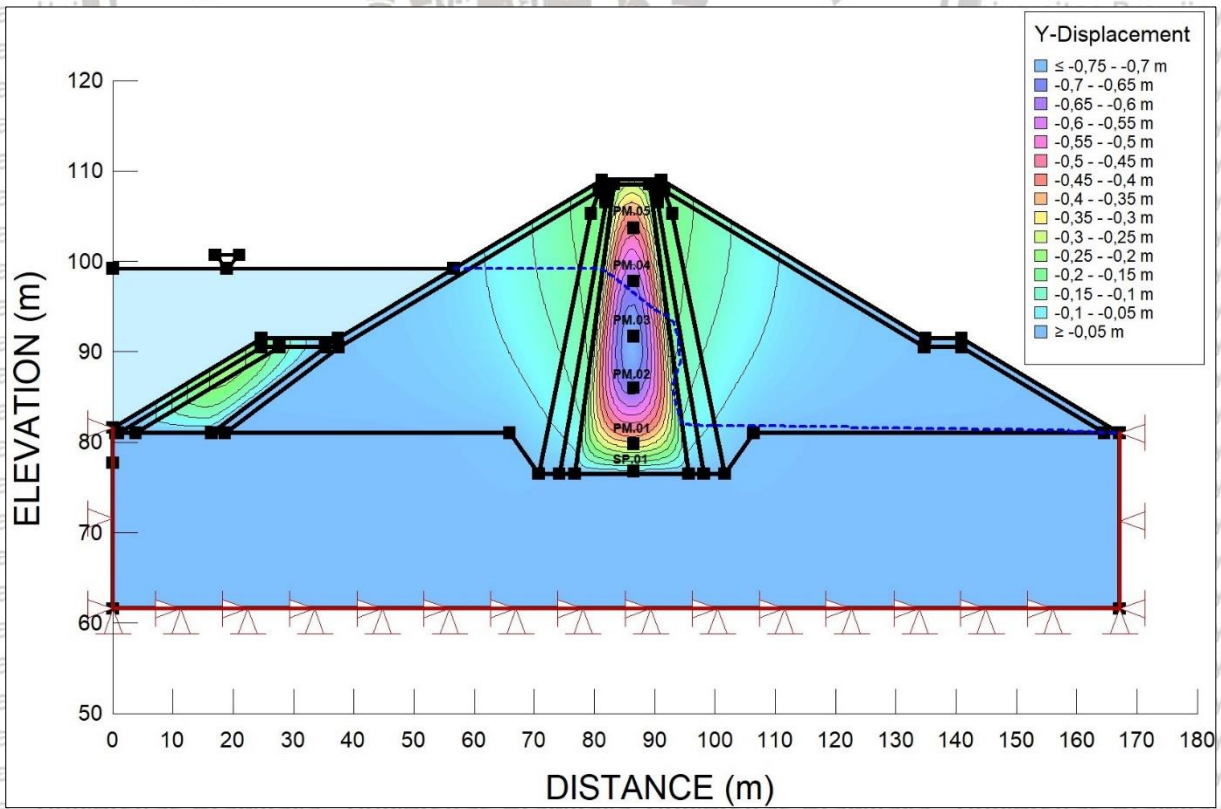


Gambar L3a.4. *Settlement* Penampang MD.11 STA 0+320 (31 Jan 2019)

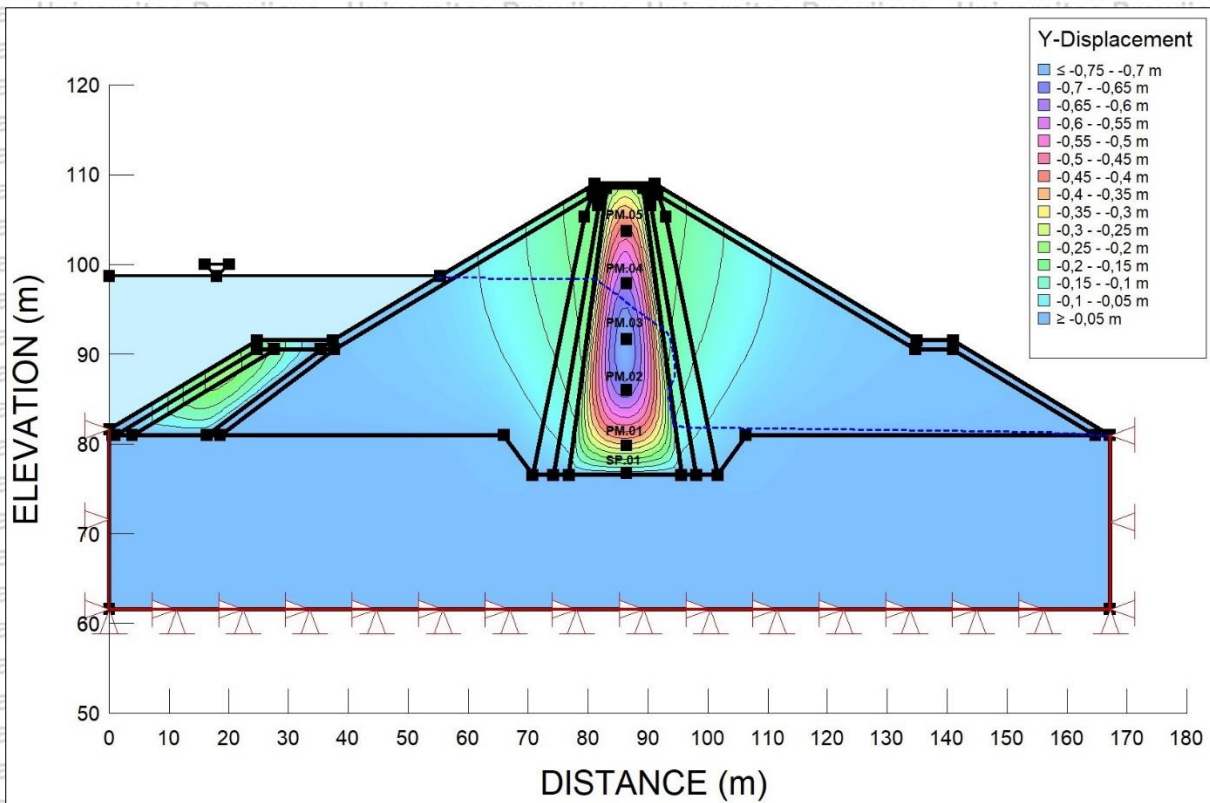




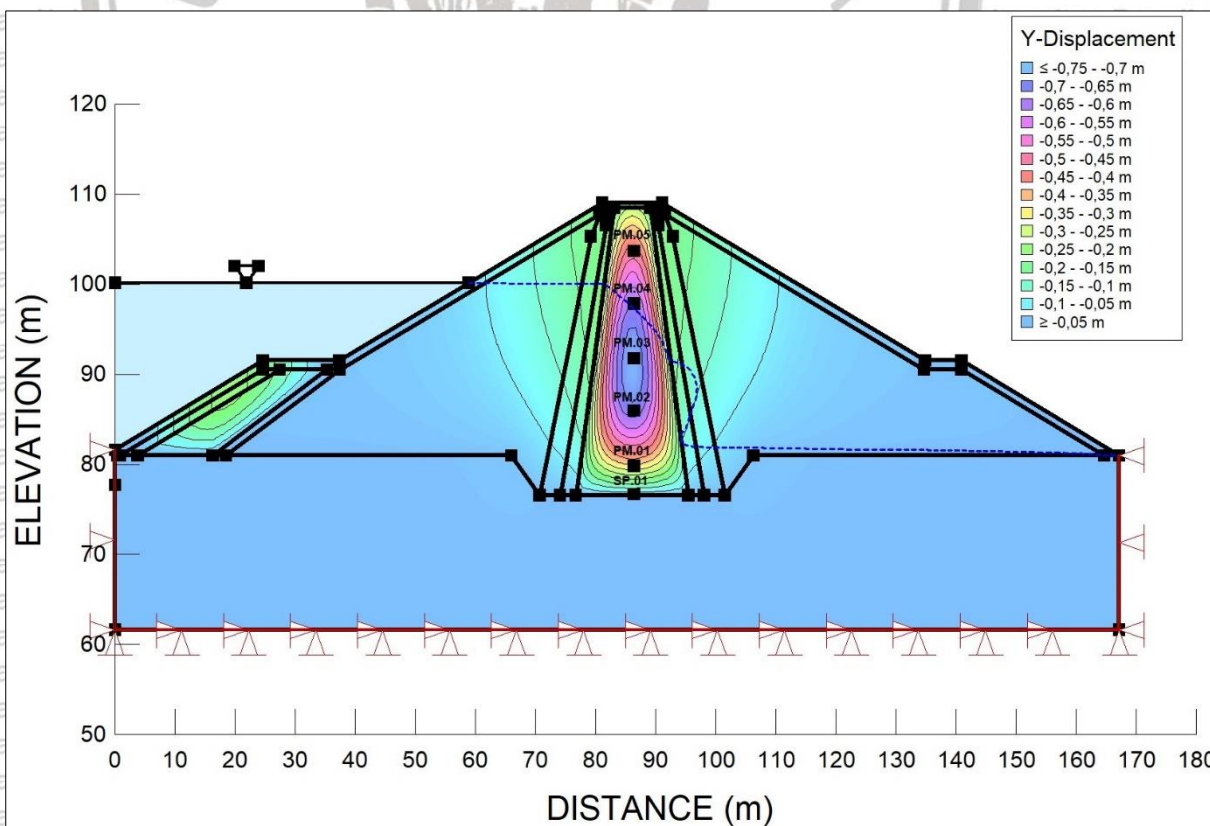
Gambar L3a.5. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (30 Apr 2019)*



Gambar L3a.6. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (30 Sep 2019)*

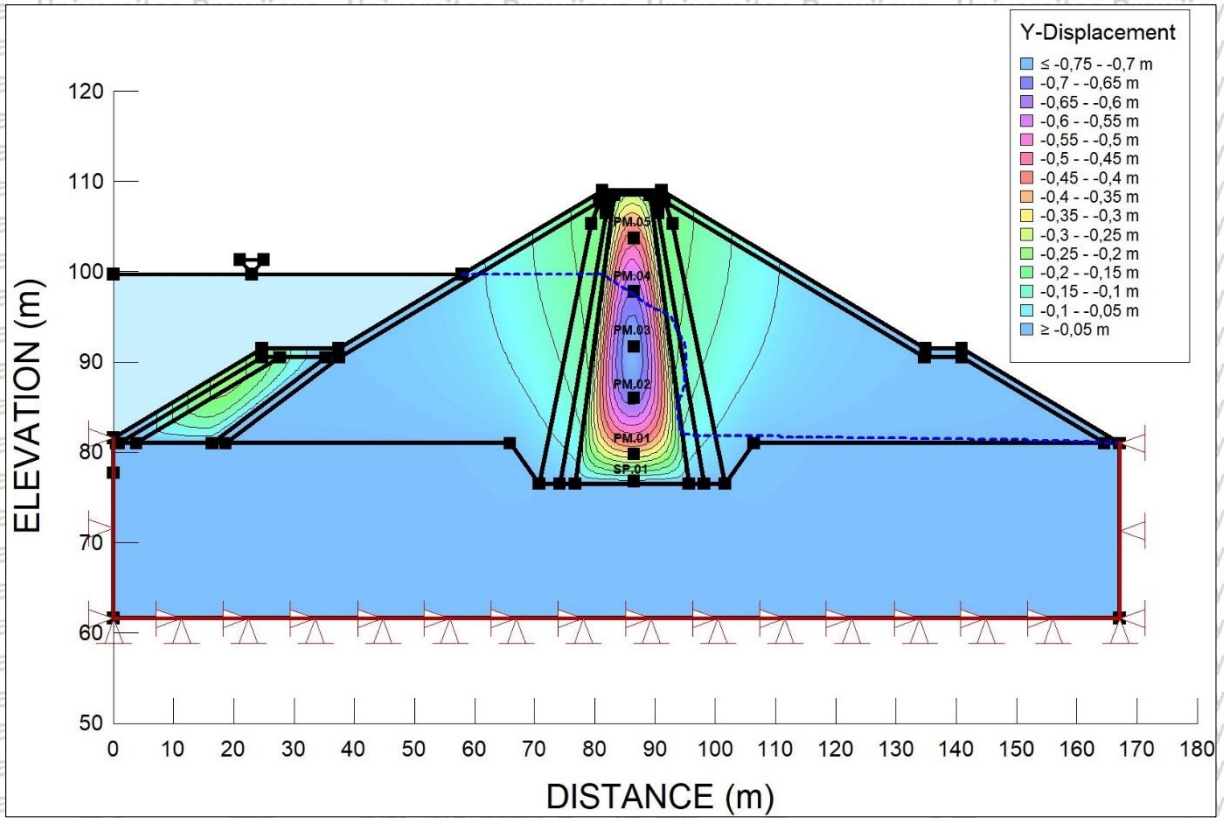


Gambar L3a.7. *Settlement* Penampang MD.11 STA 0+320 (31 Des 2019)

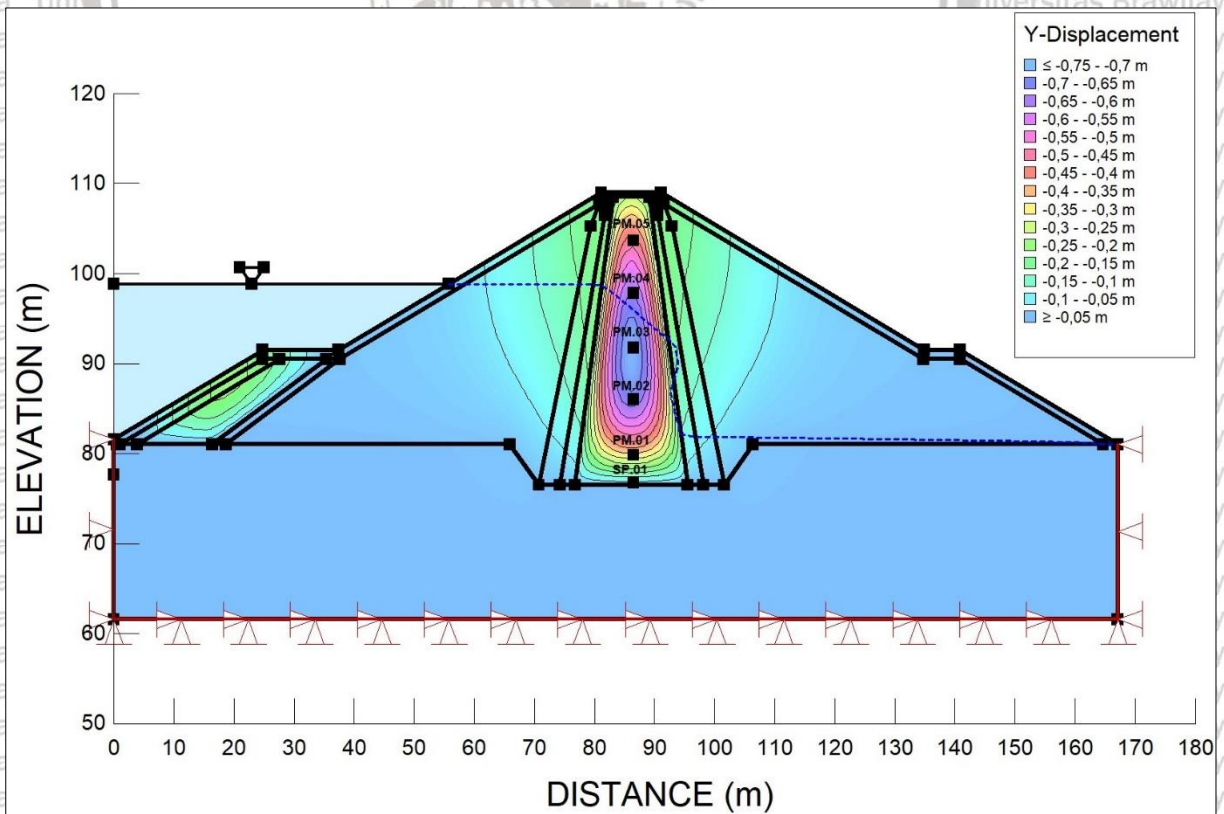


Gambar L3a.8. *Settlement* Penampang MD.11 STA 0+320 (29 Feb 2020)

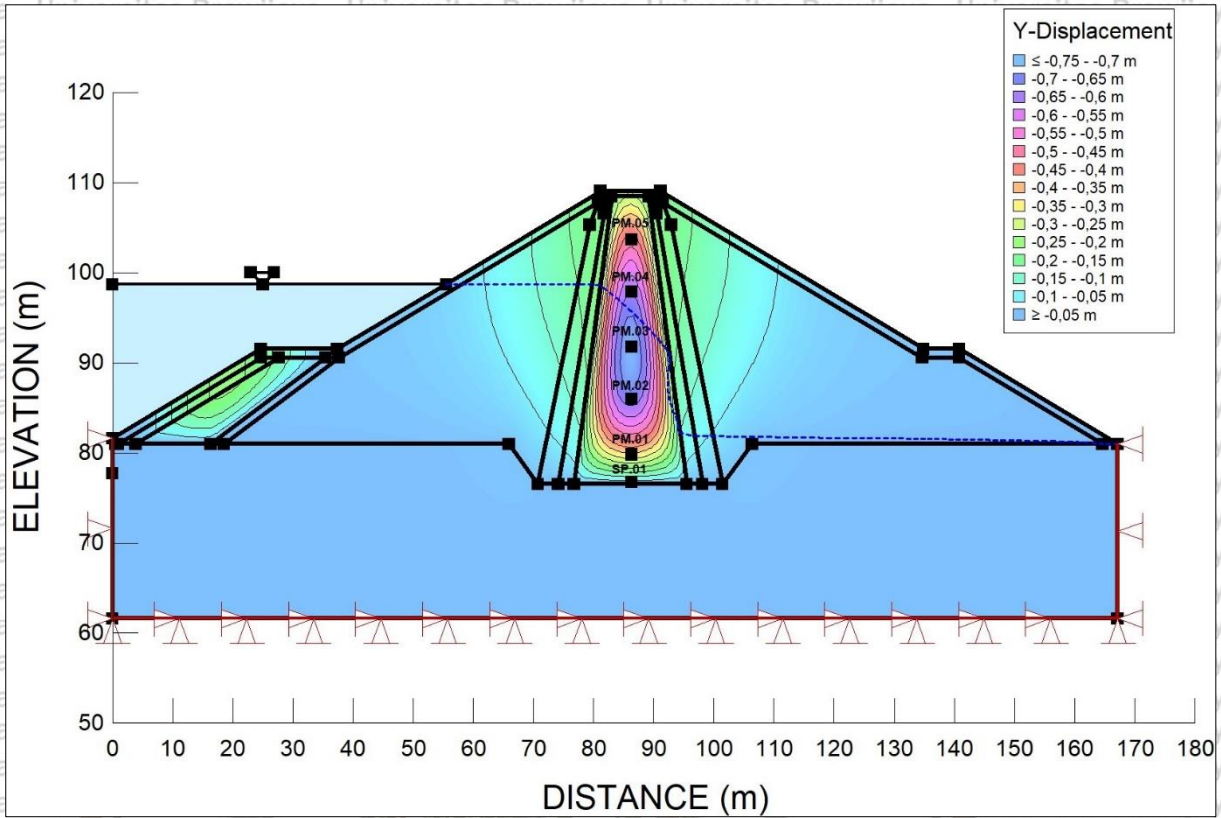




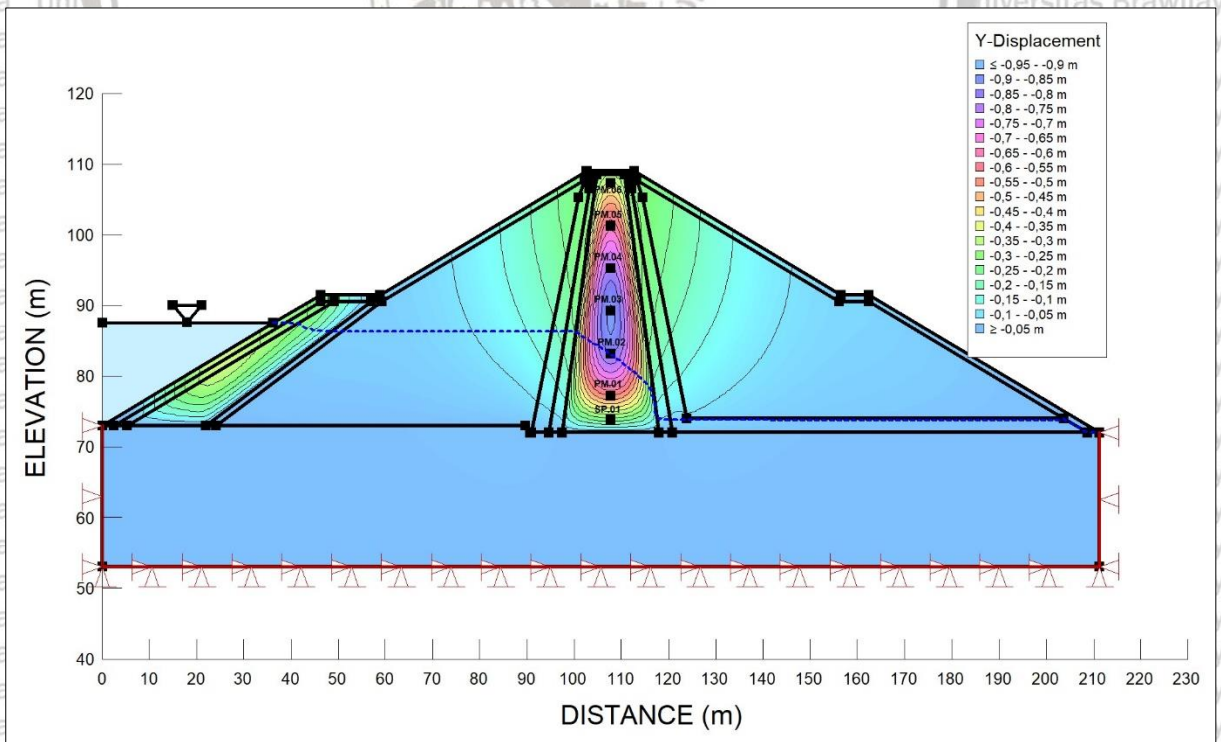
Gambar L3a.9. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (30 Apr 2020)*



Gambar L3a.10. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (30 Sep 2020)*

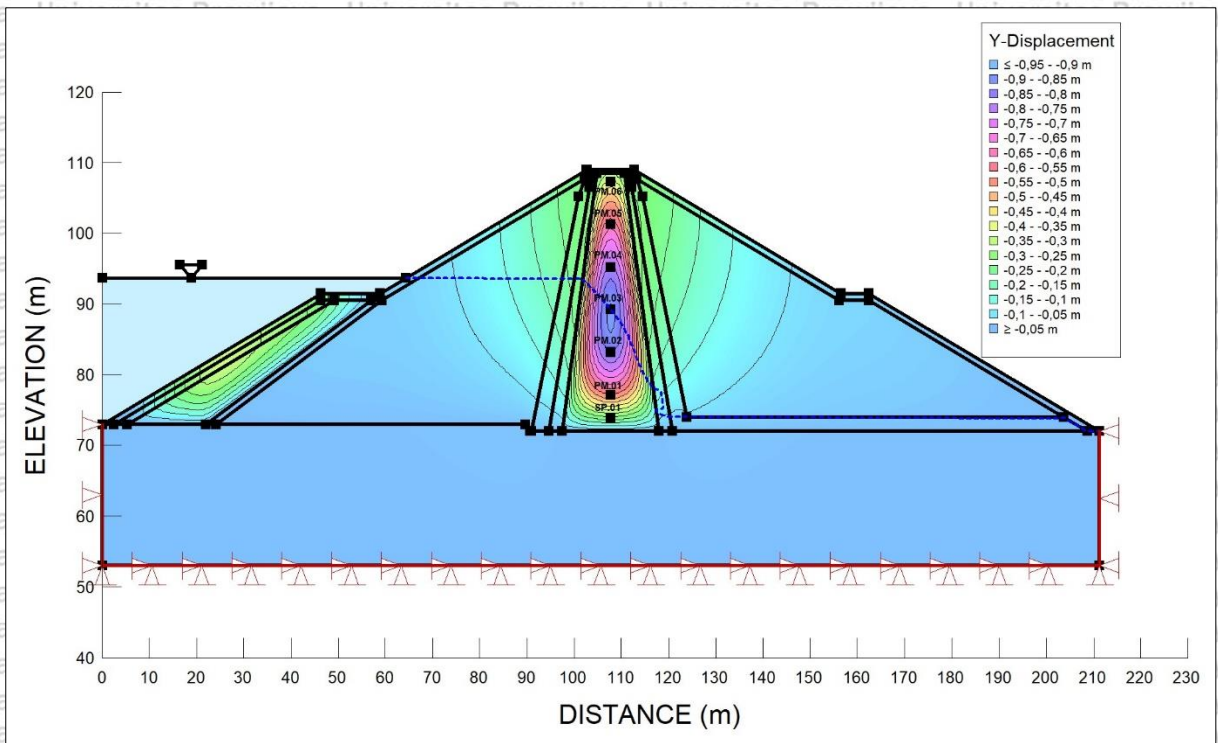


Gambar L3a.11. *Settlement Penampang MD.11 STA 0+320 (31 Des 2020)*

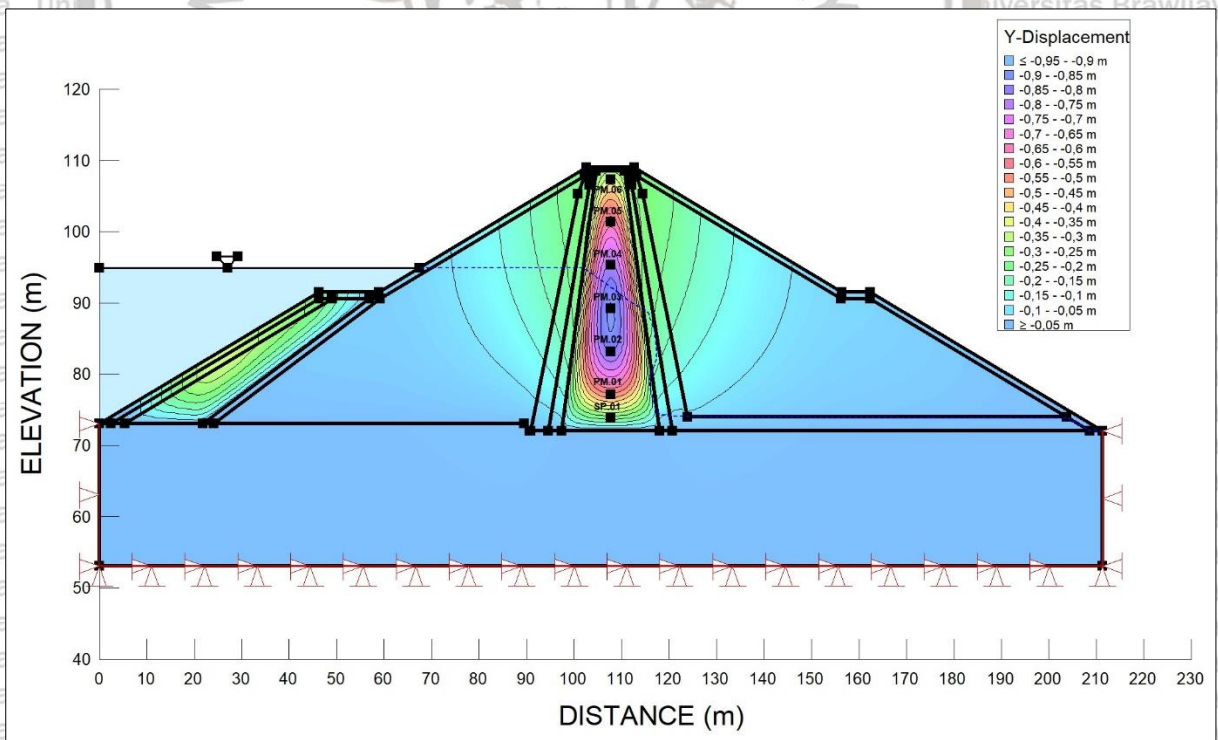


Gambar L3b.1. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (31 Jan 2018)*

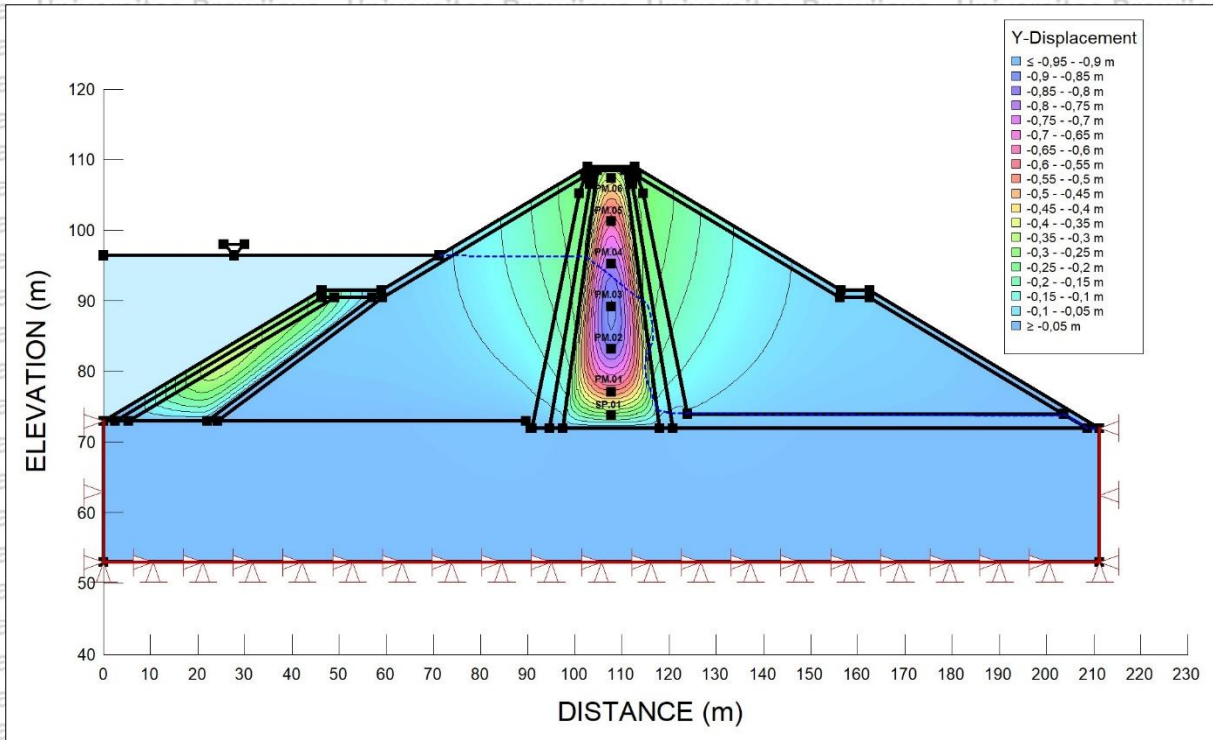




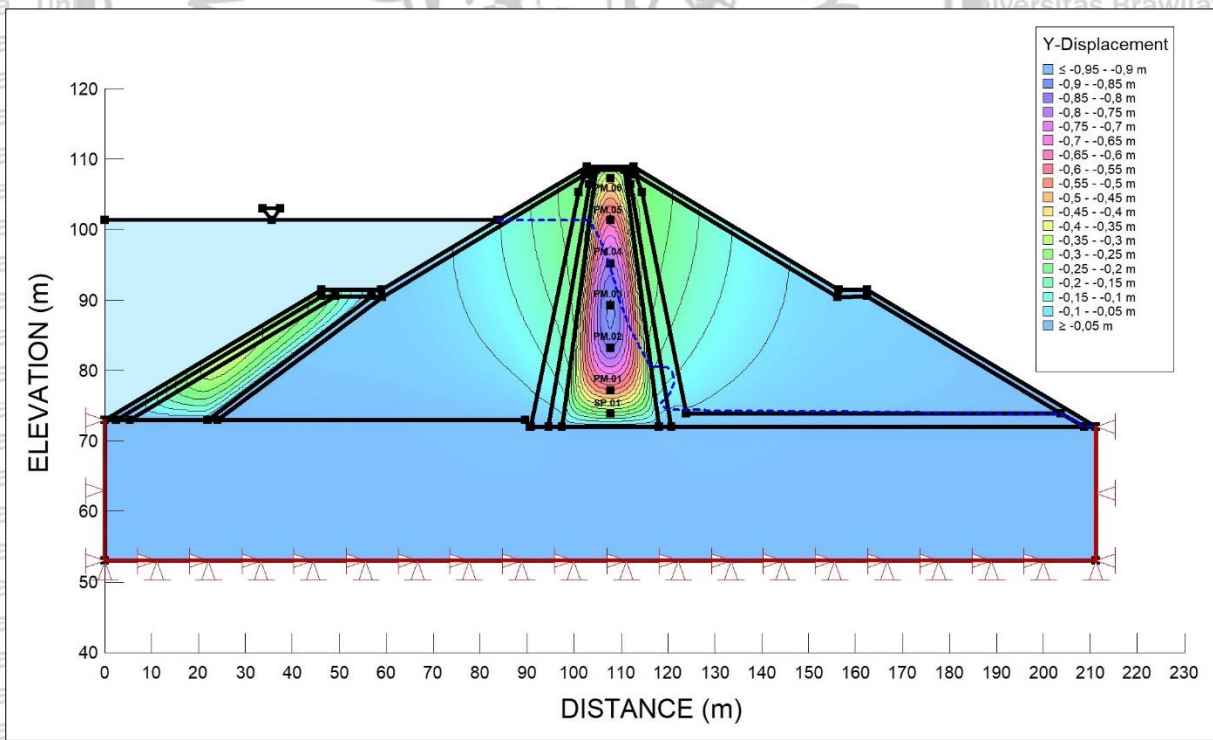
Gambar L3b.2. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (28 Feb 2018)*



Gambar L3b.3. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (30 Apr 2018)*

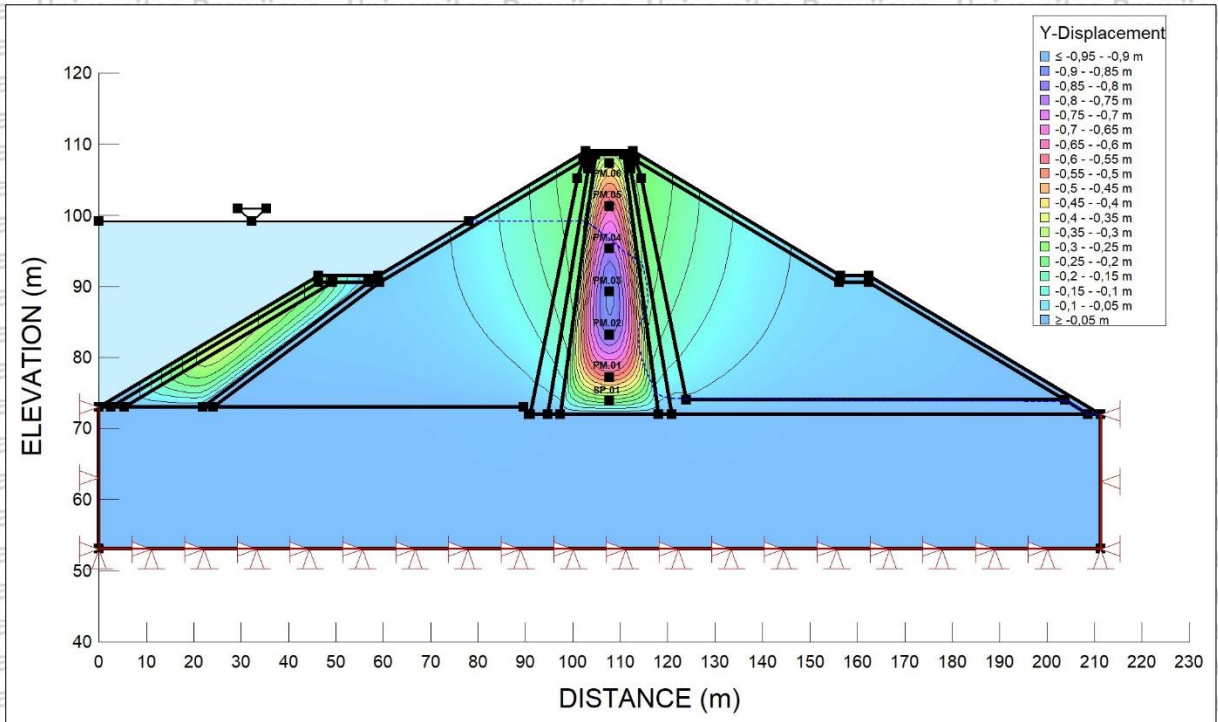


Gambar L3b.4. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (31 Jan 2019)*

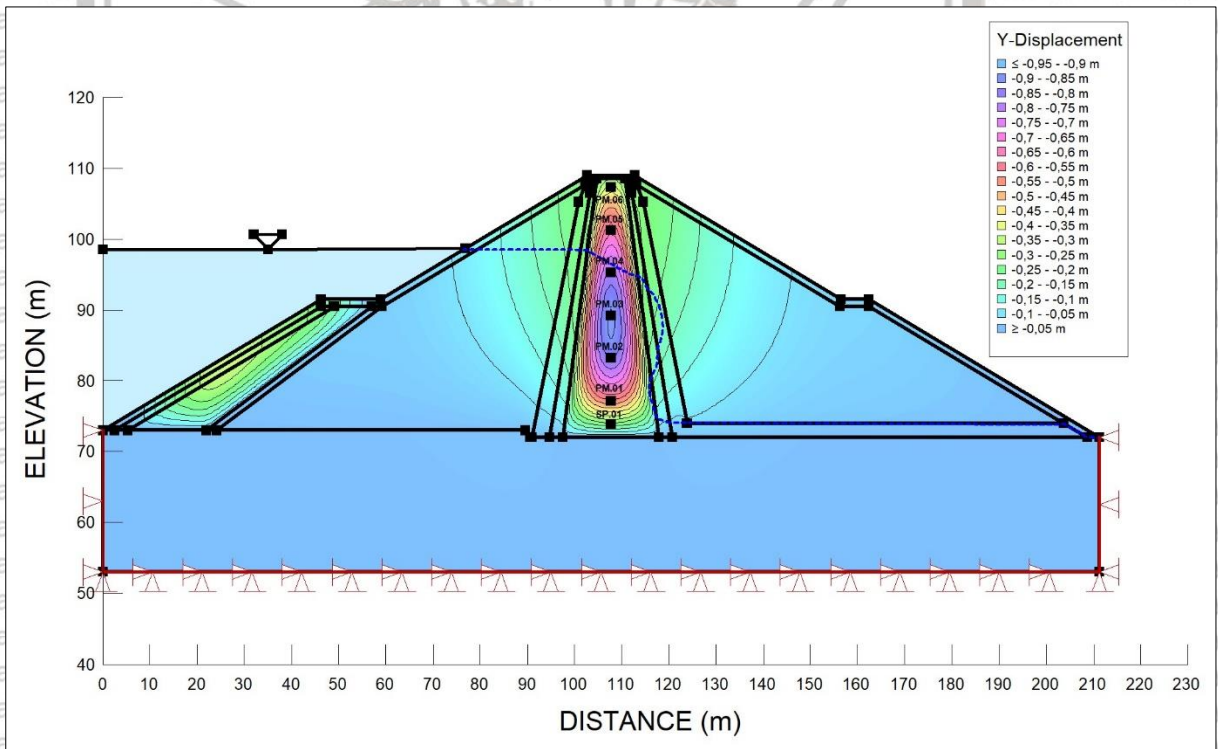


Gambar L3b.5. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (30 Apr 2019)*

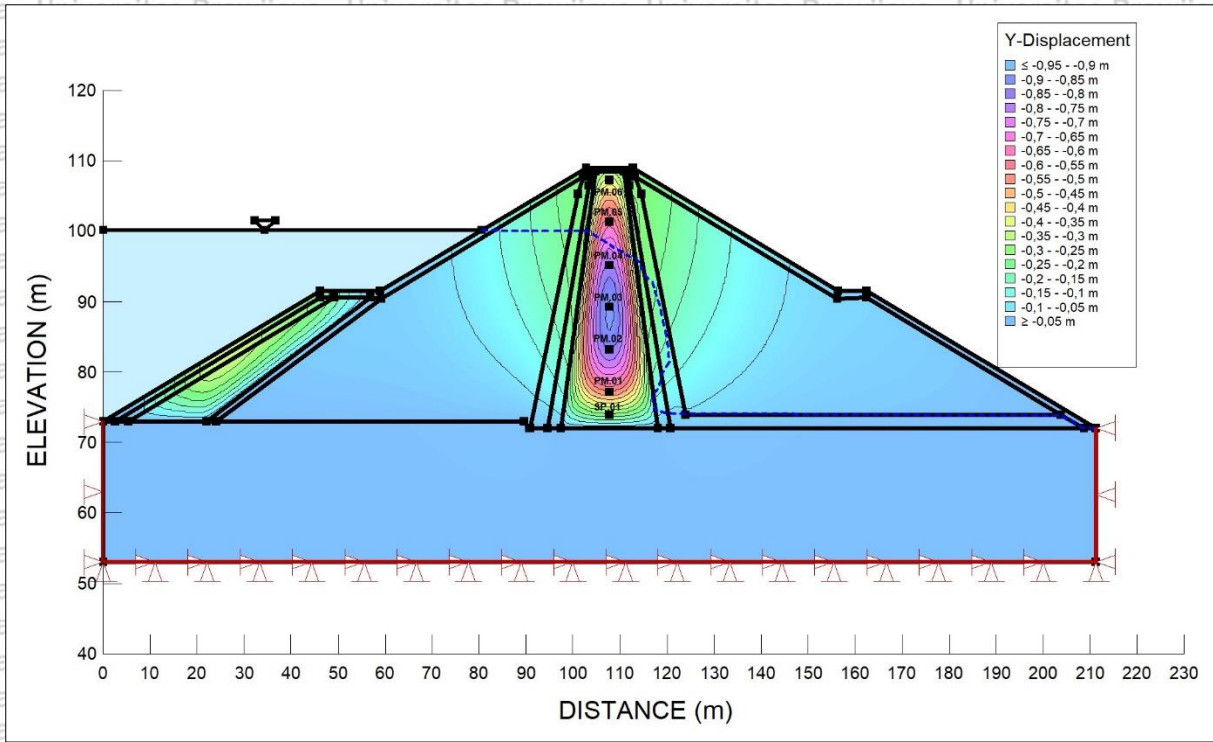




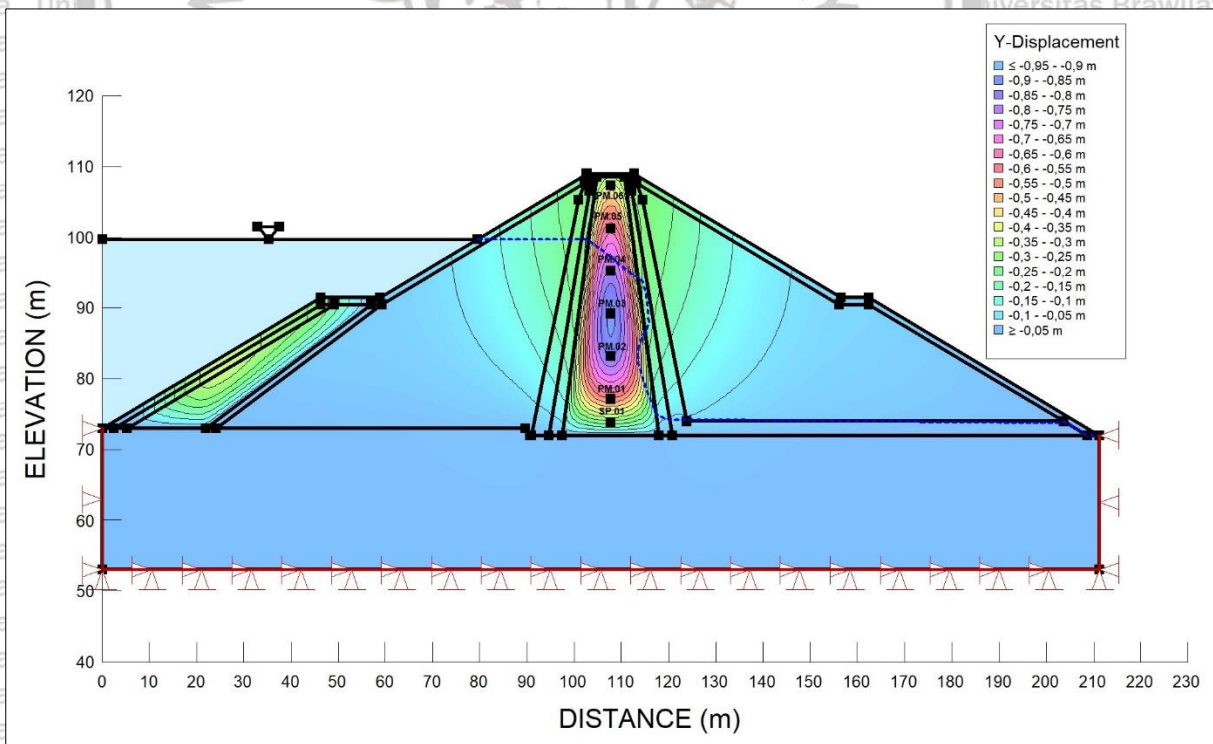
Gambar L3b.6. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (30 Sep 2019)*



Gambar L3b.7. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (31 Des 2019)*

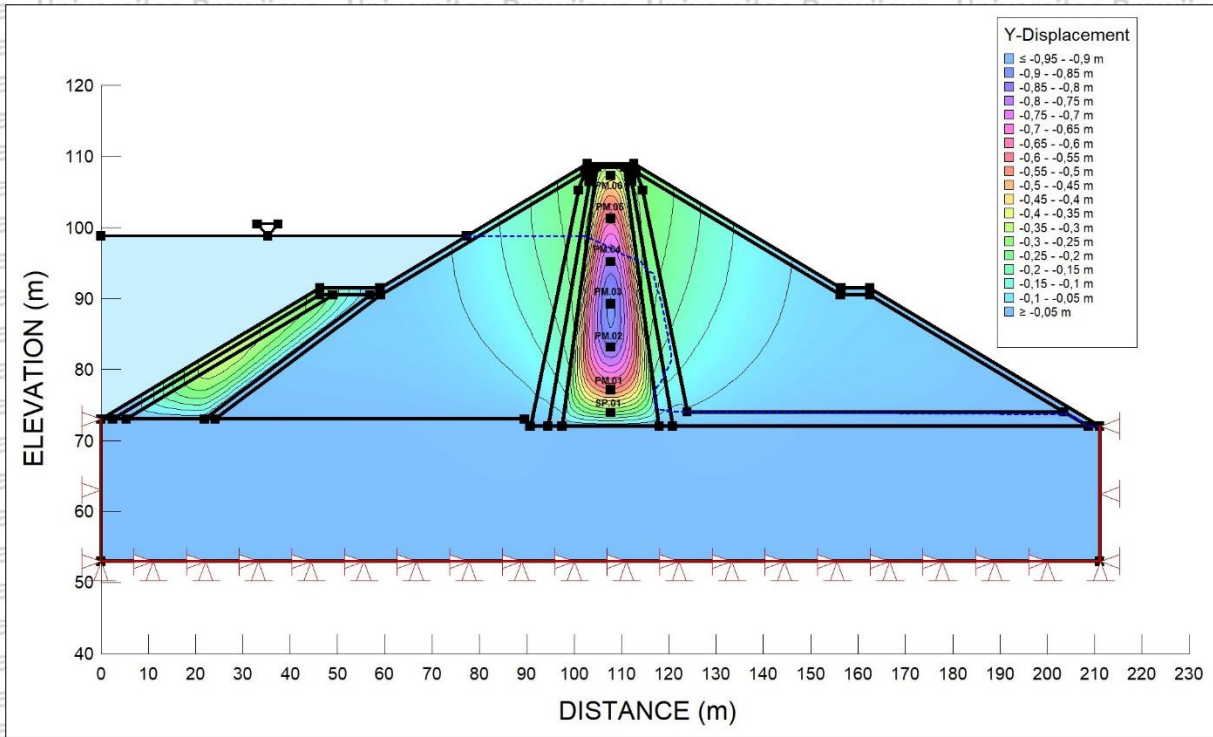


Gambar L3b.8. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (29 Feb 2020)*

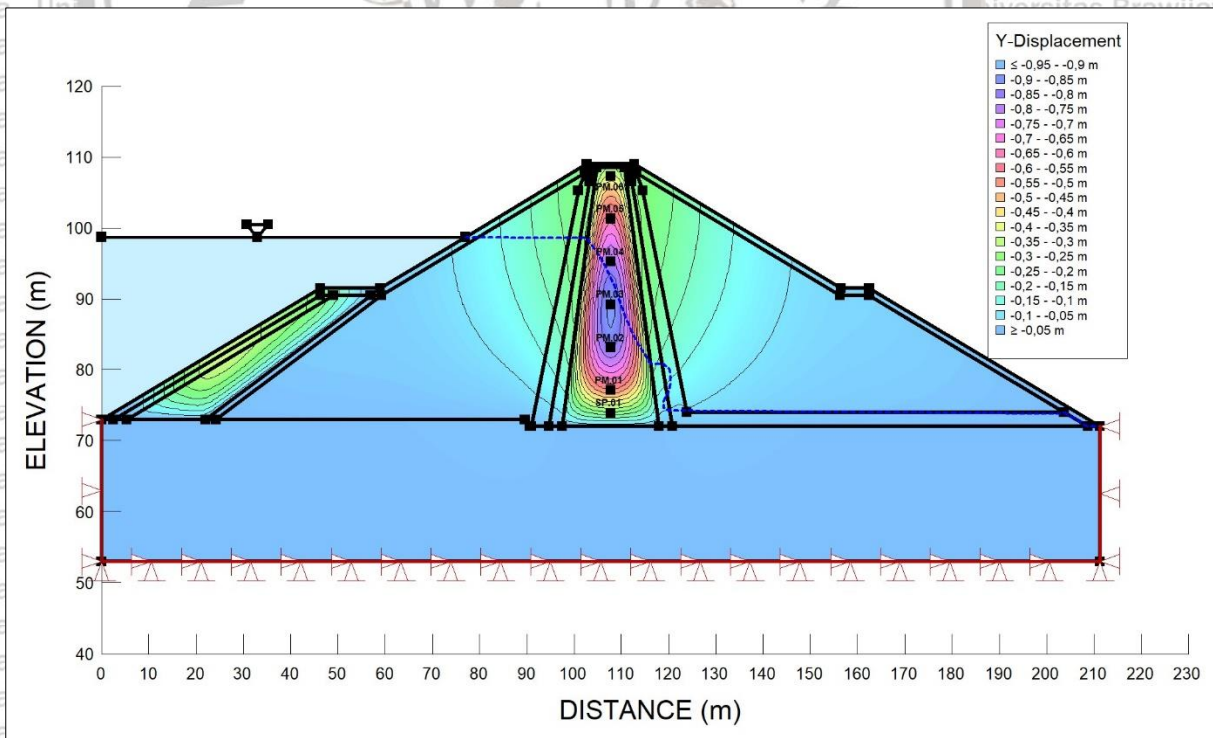


Gambar L3b.9. *Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (30 Apr 2020)*





Gambar L3b.10. Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (30 Sep 2020)



Gambar L3b.11. Settlement Penampang MD.17 STA 0+443,4 (31 Des 2020)