

PENGARUH RENCANA PENINGKATAN VOLUME TAMPUNGAN TERHADAP STABILITAS TUBUH BENDUNGAN KEDUNG OMBO

Gerald Guntur Pandapotan Siregar^{1,*}

¹Balai Besar Wilayah Citanduy, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 46300, Indonesia

*e-mail: gerald.siregar@pu.go.id

Abstract: The strategy to meet the water demands of Semarang and Demak Regencies involves enhancing the storage capacity of the Kedung Ombo Dam. This augmentation will inevitably alter the typical water level, thereby affecting the stability of the dam structure as it bears a greater load. Furthermore, the Kedung Ombo Dam, which is nearly 32 years old, necessitates re-evaluation since it lacks the full benefit of contemporary design methods. This study is confined to examining the slope stability, both static and pseudostatic, at a steady state flow, with the highest normal water level elevation (elevation +92.00) as the focal point. The slope stability analysis was conducted via the finite element method using the Slope/W in Geo-Studio software. The outcome of the static slope stability analysis indicates that the safety factor of the Kedung Ombo Dam body remains above the minimum allowable safety factor. In the pseudostatic analysis, the safety factor during the Operating Basic Earthquake (OBE) remains above the minimum allowable safety factor. However, during the Maximum Design Earthquake (MDE), the safety factor demonstrates a value that is lower than the minimum allowable safety factor. Nevertheless, the analysis of fixed displacement or permanent deformation reveals that the maximum settlement that occurs during the MDE earthquake does not exceed 50% of the available freeboard.

Keywords: Kedung Ombo Dam, safety factor, slope stability

Abstrak: Rencana pemenuhan kebutuhan air di Kabupaten Semarang dan Demak dilakukan dengan peningkatan volume tampungan pada Waduk Kedung Ombo. Meningkatnya volume tampungan tentunya akan merubah elevasi muka air normal dimana ini akan berdampak terhadap stabilitas tubuh bendungan mengingat beban yang diterima menjadi lebih besar. Selain itu umur Bendungan Kedung Ombo yang sudah mencapai hampir 32 tahun perlu di evaluasi ulang mengingat bangunan ini tidak memiliki keuntungan penuh dari metode desain modern. Penelitian ini dibatasi pada analisis stabilitas lereng baik statik maupun pseudostatik pada aliran *steady state* dimana elevasi yang ditinjau adalah elevasi muka air normal tertinggi (el-evasi +92.00). Pemodelan analisis stabilitas lereng dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan Software Geo-Studio yaitu Slope/W. Hasil analisis stabilitas lereng statik menunjukkan faktor keamanan tubuh Bendungan Kedung Ombo masih di atas faktor keamanan minimum yang diijinkan. Pada analisis pseudostatik, faktor keamanan saat gempa OBE (gempa dasar operasi) masih di atas faktor keamanan minimum yang diijinkan. Lain hal nya pada gempa MDE (gempa desain maksimum), faktor keamanan menunjukkan nilai yang kurang dari faktor keamanan minimum yang diijinkan. Namun dari analisis alihan tetap atau deformasi permanen, penurunan maksimal yang terjadi saat gempa MDE tidak lebih dari 50% tinggi jagaan yang tersedia. Hal ini menunjukkan bahwa Tubuh Bendungan Kedung Ombo masih aman ditinjau dari stabilitas lerengnya baik pada kondisi statik maupun pseudostatik.

Kata kunci: : bendungan kedung ombo, faktor keamanan, stabilitas lereng

PENDAHULUAN

Waduk Kedungombo merupakan tampungan air yang terbentuk dengan dibangunnya Bendungan Kedungombo. Bendungan Kedungombo berlokasi pada pertemuan Sungai Uter dan Sungai Serang yang terletak di Dukuh Kedungombo Desa Ngrambat, Kecamatan Geyer,

Kabupaten Grobogan, Propinsi Jawa Tengah. Pembangunan Bendungan Kedungombo merupakan salah satu realisasi dari upaya konservasi air dari potensi Sungai Uter dan Sungai Serang yang dikembangkan untuk irigasi, pengendalian banjir, pembangkit tenaga listrik, penyediaan air baku, pariwisata, pengembangan perikanan dan lain – lain (BBWS Pemali Juana, 2012).

Pada tahun 2018-2019 Pemerintah Jepang yang diwakili oleh Ministry of Land, Infra-structure, Transport and Tourism (MLIT) melakukan studi pendahuluan (MLIT, 2020) terkait pemenuhan kebutuhan air yang semakin meningkat di Kabupaten Semarang dan Demak. Usaha pemenuhan kebutuhan air ini dilakukan dengan meningkatkan volume tampungan pada Waduk Kedung Ombo. Peningkatan volume tampungan ini berasal dari Kali Bancak yang disuplesi ke Waduk Kedung Ombo melalui kanal buatan. Konsep peningkatan volume tampungan berdasarkan studi yang dilakukan oleh MLIT adalah dengan meninggikan mercu pelimpah (upgradng) menggunakan flap gates tanpa meninggikan tubuh bendungan. Peninggian mercu pelimpah ini akan meningkatkan elevasi muka air normal setinggi 2 (dua) meter yang semula berada pada elevasi +90.00 menjadi elevasi +92.00. Perubahan elevasi muka air normal ini tentunya akan berdampak terhadap stabilitas tubuh bendungan mengingat beban yang diterima menjadi lebih besar. Selain itu umur Bendungan Kedung Ombo yang sudah mencapai hampir 32 tahun perlu di evaluasi ulang mengingat bangunan ini tidak memiliki keuntungan penuh dari metode desain modern (Duncan et al., 2014). Berdasarkan permasalahan tersebut maka stabilitas lereng tubuh bendungan akibat perubahan elevasi muka air normal akan dianalisis dalam penelitian ini.

Stabilitas, dalam pengertian yang lebih sederhana, mengacu pada kemampuan suatu lereng untuk menahan gaya gerak yang cenderung memindahkan material pada struktur lereng tersebut (Williams & Boomer, 2013). Kekuatan tanah adalah ketahanan terhadap deformasi massa yang dikembangkan dari kombinasi penggulungan partikel dan penghancuran dan dikurangi oleh tekanan pori yang ada atau berkembang selama pergerakan partikel. Ketahanan terhadap deformasi ini adalah kekuatan geser tanah yang merupakan ketahanan massa tanah terhadap gaya geser (Bowles, 1997). Penentuan parameter kuat geser sangat penting dalam analisis stabilitas lereng karena akan menentukan kekuatan bidang gelincir (Chakraborty, 2018).

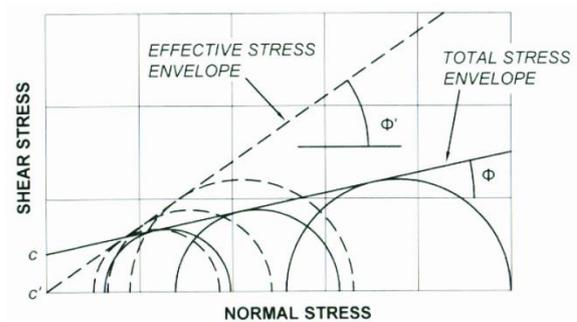
Kuat geser suatu tanah merupakan fungsi dari kohesi tanah (c), sudut geser dalam tanah (ϕ), dan tegangan normal (σ). Kuat geser (S) dinyatakan oleh Hukum Kekuatan Mohr-Coulomb (Terzaghi, 1963) sebagai Persamaan (1) sampai Persamaan (3) berikut:

$$S_u = c + \sigma \tan \phi \text{ untuk tegangan total} \quad (1)$$

$$S_d = c' + \sigma' \tan \phi' \text{ untuk tegangan efektif} \quad (2)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

Dimana c dan c' adalah kohesi dan ϕ dan ϕ' adalah sudut tahanan geser tanah. Konstanta c tergantung pada tipe tanah dan kandungan air di dalamnya. Pasir dan kerikil memiliki nilai kohesi yang lebih rendah dari tanah atau mendekati dan bahkan sama dengan nol; sedangkan ϕ mendekati atau sama dengan nol untuk lempung kedap kohesif jenuh (Look, 2007). Gambar 1 memperlihatkan kekuatan geser yang dikembangkan dari lingkaran Mohr untuk tegangan total dan efektif (United States Society on Dams, 2007).

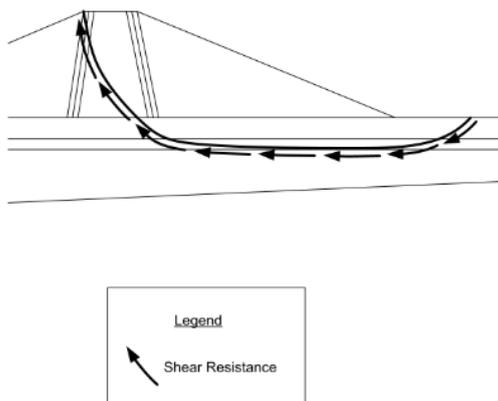


Gambar 1. Kuat Geser Pada Tegangan Total dan Efektif

Ada korelasi kuat antara kejadian keruntuhan lereng tubuh bendungan dan penggunaan material berbutir halus/ sangat plastis pada bendungan. Tekanan pori berlebih sering berkembang selama masa konstruksi yang cepat pada zona berbutir halus, yang mengakibatkan berkurangnya kekuatan geser dan kondisi yang berpotensi tidak stabil selama atau tidak lama setelah konstruksi. Studi awal menunjukkan bahwa korelasi antara jenis material dan kerentanan terhadap longsor cukup kuat dibandingkan faktor lainnya, termasuk kecuraman lereng, metode konstruksi, dan aktivitas waduk. Untuk alasan keselamatan dan ekonomi, bendungan zonal yang terdiri dari inti kedap air di bagian tengah atau miring yang diapit oleh bahan lolos air dengan kekuatan material yang lebih tinggi, harus selalu dibangun di daerah yang memiliki beragam jenis tanah (Redda, 2016).

Metode Kesetimbangan Batas adalah salah satu metode analisis stabilitas yang paling populer. Dalam metode analisis ini, bidang gelincir yang stabilitasnya sedang dievaluasi,

dibagi menjadi beberapa irisan, dan tegangan normal yang bekerja pada dasar setiap irisan ditentukan untuk mendapatkan kekuatan geser yang diinginkan (Abramson et al., 2001). Semua metode ini didasarkan pada perbandingan gaya, momen, atau tegangan yang menahan pergerakan massa yang dapat menyebabkan gerakan tidak stabil. Asumsi berturut-turut dalam metode kesetimbangan batas dibuat mulai dari bidang kegagalan potensial sampai permukaan yang paling kritis ditemukan.



Gambar 2. Lereng dan Bidang Kegagalan Potensial

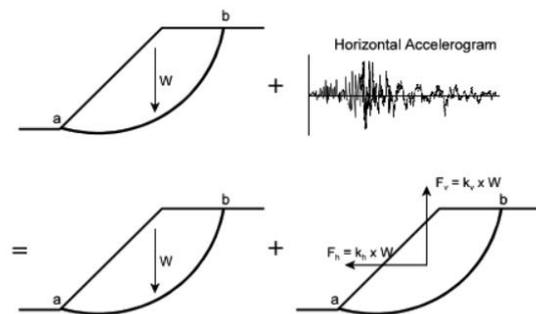
Gambar 2 menunjukkan massa longsor potensial yang ditentukan oleh bidang kegagalan potensial. Jika ketahanan geser tanah di sepanjang bidang runtuh melebihi yang diperlukan untuk memberikan kesetimbangan, maka massanya stabil. Hasil dari analisis adalah faktor keamanan, tegangan normal dan tegangan geser yang bekerja sepanjang bidang longsor, dan tegangan geser dan tegangan normal yang bekerja sepanjang batas antara potongan elemen. Faktor keamanan didefinisikan sebagai rasio kekuatan geser terhadap tegangan geser (atau ukuran ekuivalen lainnya) yang diperlukan untuk kesetimbangan. Hasil analisis biasanya dinyatakan dalam faktor keamanan (FK), yang dinyatakan dalam Persamaan (4) berikut:

$$FK = \frac{\text{Kuat geser (shear strength)}}{\text{Tegangan geser (shear stress)}} = \frac{S}{\tau} \quad (4)$$

Dimana jika $FK \geq 1$ maka massa dinyatakan stabil atau aman.

Evaluasi stabilitas lereng pada struktur hidrolik di bawah pembebanan gempa dapat dilakukan dengan metode pseudostatik (koefisien seismik dengan simbol k_h dan k_v) (Ebeling & Morrison, 1993). Pada daerah rawan gempa, koefisien pseudostatik (seismik) horizontal dan

vertikal (k_h dan k_v), masing-masing digunakan untuk menghitung gaya horizontal dan vertikal yang disebabkan oleh potensi gempa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (Melo & Sharma, 2004). Gaya-gaya ini ditambahkan pada perhitungan kesetimbangan batas keseluruhan untuk setiap irisan yang menyusun bidang gelincir.



Gambar 3. Pendekatan Analisis Pseudostatik

Jika tidak ada tanah yang menunjukkan tekanan pori berlebih akibat guncangan, dan kekuatan geser *undrained* digabungkan, faktor keamanan pseudostatik yang lebih besar dari 1.0 adalah bukti yang sangat kuat bahwa tidak terjadi kerusakan bendungan akibat gempa bumi (FERC, 2006; FEMA, 2005). Standar perhitungan metode pseudostatik di Indonesia sendiri dapat mengacu pada Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Urugan Tahun 2008 (Departemen Pekerjaan Umum, 2008).

METODE PENELITIAN

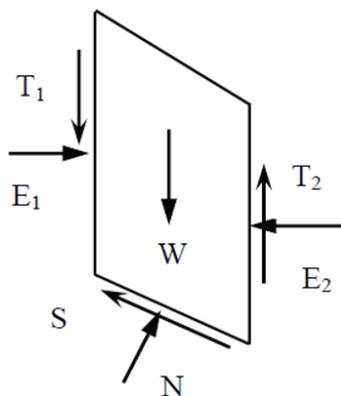
Pemodelan analisis stabilitas lereng pada penelitian ini menggunakan Software GEO-STUDIO yaitu Slope/W. Slope/W adalah perangkat lunak kesetimbangan batas modern yang memungkinkan untuk menangani kompleksitas dalam analisis. Program Slope/W akan menghitung tegangan geser bidang kegagalan sesuai dengan kekuatan geser untuk menentukan faktor keamanan. Bidang kegagalan yang di uji dengan FK terendah dianggap sebagai bidang gelincir pengatur atau kritis.

Karena dalam penelitian ini kondisi pembebanan adalah *steady state*, maka percobaan bidang kegagalan hanya ditinjau pada bagian *downstream* tubuh bendungan dan parameter material yang digunakan menggunakan tegangan efektif. Besarnya nilai tegangan efektif dipengaruhi oleh tekanan air

pori sehingga elemen tekanan air pori atau kontur rembesan harus dianalisis terlebih dahulu (Wulandari, et al., 2018). Nilai tekanan air pori pada bendungan yang sudah beroperasi dapat diperoleh dari pembacaan instrumentasi piezometer. Penggambaran kontur rembesan dilakukan dalam bentuk pressure head dan dalam satuan kPa dimana semua bacaan piezometer dihubungkan.

Nilai koefisien gempa yang digunakan untuk analisis stabilitas lereng pseudostatik ditentukan berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian PUPR, 2017) dan Pedoman Analisis Dinamik Bendungan Urugan Tahun 2008 (Departemen Pekerjaan Umum, 2008). Parameter Mohr-Coulomb c (kohesi) dan ϕ (phi) diambil berdasarkan Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Bendungan Kedung Ombo (BBWS Pemali Juana, 1989) dan referensi dari Look (2007) untuk menggambarkan sifat material dalam kaitannya dengan kekuatan tanah (Tabel 1–5).

Metode kesetimbangan batas yang digunakan dalam analisis stabilitas lereng pada penelitian ini adalah Metode *Morgenstern – Price* (M-P) dimana metode ini merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya – gaya normal dan momen yang bekerja pada tiap irisan dari bidang longsor (Rahman & Al Mamun, 2016). Gaya – gaya yang bekerja pada bidang irisan kelongsoran M-P dapat dilihat pada Gambar 4 dimana N adalah Gaya Normal, T_1 dan T_2 adalah gaya gesek yang bekerja di tepi irisan dan W adalah gaya akibat beban.



Gambar 4. Metode analisis stabilitas lereng Morgenstern-Price (M-P)

Tabel 1. Parameter Material Zona 1

Parameter	Data uji	dimensi	Input model
c'	22-40	kPa	35
ϕ'	21-33	degree	25
γ_{sat}	21,670	kN/m ³	21.670
γ_{dry}	18,771	kN/m ³	18.771
k	0,003x10 ⁻⁸ - 0,14x10 ⁻⁸	m/s	0.0715x10 ⁻⁹

Tabel 2. Parameter Material Zona 2

Parameter	Data uji	dimensi	Input model
c'	0-132	kPa	0
ϕ'	13.3-36.2	degree	25
γ_{sat}	19.29	kN/m ³	19.29
γ_{dry}	15.09	kN/m ³	15.09
k	5.2x10 ⁻⁵	m/s	10 ⁻⁵

Tabel 3. Parameter Material Zona 3

Parameter	Data uji	dimensi	Input model
c'	0	kPa	0
ϕ'	35.5-39.0	degree	35
γ_{sat}	19.29	kN/m ³	19
γ_{dry}	15.09	kN/m ³	15
k	5.5x10 ⁻⁵	m/s	5x10 ⁻⁵

Tabel 4. Parameter Material Zona 4

Parameter	Data uji	dimensi	Input model
c'	0-132	kPa	0
ϕ'	13.3-36.2	degree	35
γ_{sat}	19.29	kN/m ³	19.29
γ_{dry}	15.09	kN/m ³	15.09
k	10 ⁻⁵	m/s	10 ⁻⁵

Tabel 5. Parameter Material Pondasi

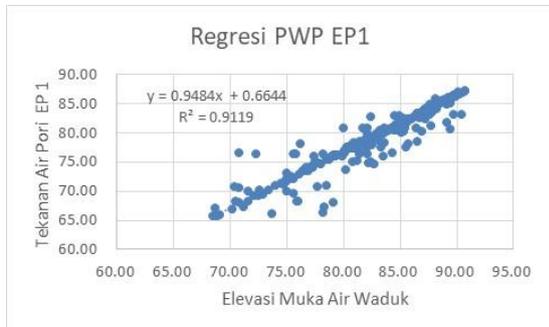
Parameter	Data uji	dimensi	Input model
k	3.5x10 ⁻⁷ - 23x10 ⁻⁷	m/s	13x10 ⁻⁷

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis kontur rembesan

Karena piezometer yang ditinjau dalam tubuh bendungan cukup banyak, maka proses perhitungan yang ditampilkan hanya 1 buah piezometer yaitu EP 1. Data pembacaan piezometer yang masuk dalam proses perhitungan mulai dari tahun 2003 – 2020

termasuk pembacaan muka air waduk. Langkah selanjutnya adalah membuat grafik hubungan antara tekanan air pori berdasarkan bacaan piezometer dan elevasi muka air waduk (Gambar 5).



Gambar 5. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 1

Penggambaran kontur dilakukan dalam bentuk pressure head dan dalam satuan kPa. Grafik pada Gambar 5 menunjukkan regresi linear dan persamaan yang dihitung yaitu elevasi tampungan pada sumbu "x" dan nilai tekanan air pori (meter) pada sumbu "y". Untuk piezometer lain dilakukan metode yang sama seperti pada EP 1. Persamaan regresi tersebut kemudian digunakan untuk memperkirakan (ekstrapolasi) tekanan air pori pada El.+92.00 (MAN). Data yang sifatnya anomali dan error tidak diikutsertakan dalam proses ekstrapolasi.

Dengan memperhatikan persamaan regresi linear pada Gambar 5, maka nilai tekanan air pori (y) pada El.+92.00 (MAN) dapat diketahui menggunakan persamaan $y = 0.9484x + 0.6644$. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai tekanan air pori pada El.+92.00 = 87.91 meter. Oleh karena penggambaran kontur dilakukan dalam bentuk *pressure head* dan dalam satuan kPa, maka nilai tekanan air pori yang masih dalam satuan meter harus dikonversi ke dalam satuan kPa. Dibutuhkan nilai *zero frequency*, *gauge factor* dan *gauge elevation* pada masing-masing piezometer yang ditinjau agar dapat mengkonversi satuan meter menjadi kPa. Dengan persamaan $U/S \text{ water level} = ((\text{zero frequency} - \text{frequency}) \times \text{gauge factor}) / 9.81 + \text{gauge elevation}$ dan untuk mengkonversi ke satuan kPa dengan menggunakan persamaan $kPa = (\text{zero frequency} - \text{frequency}) \times \text{gauge factor}$, maka didapat nilai tekanan air pori EP1 pada El.+92.00 = 550 kPa dengan nilai *zero frequency* = 9.178, *gauge factor* = 0.153 dan *gauge elevation* = 31.891 meter.

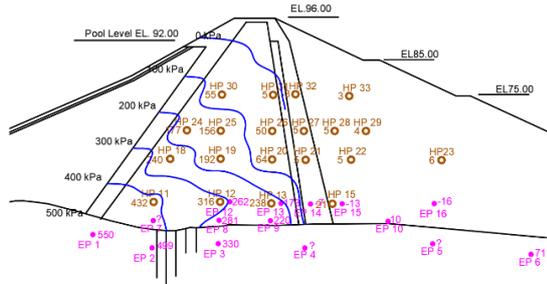
Hasil ekstrapolasi semua piezometer pada EL.+92.00 dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai Tekanan Air Pori pada Setiap Titik Piezometer

Kode Alat	Persamaan Hubungan Elevasi (m) vs Pressure (kPa) pada kondisi Head (kPa)	Pressure Head <i>steady state</i>
EP1	$y = 0.9484x + 0.6644$	550
EP2	$y = 0.7791x + 11.7340$	499
EP3	$y = 0.4753x + 22.846$	330
EP6	$y = 0.0147x + 38.859$	71
EP8	$y = 0.2266x + 45.642$	281
EP9	$y = 0.0695x + 54.722$	220
EP10	$y = 0.0049x + 38.102$	10
EP12	$y = 0.2669x + 49.585$	262
EP13	$y = 0.1408x + 51.844$	173
EP14	$y = 0.0204x + 44.617$	-7
EP15	$y = 0.0227x + 43.337$	-13
EP16	$y = -0.0069x + 45.949$	-16
HP11	$y = 7.5845x - 265.86$	432
HP12	$y = 3.0493x + 34.913$	316
HP13	$y = 1.5706x + 92.966$	238
HP15	21	21
HP18	$y = 2.9498x - 31.244$	240
HP19	$y = 1.2484x + 77.116$	192
HP20	$y = 0.1557x + 49.882$	64
HP21	5	5
HP22	5	5
HP23	6	6
HP24	$y = 1.7628x + 14.735$	177
HP25	$y = 0.9126x + 72.281$	156
HP26	$y = 0.2349x + 36.866$	50
HP27	$y = 0.1446x - 7.8697$	5
HP28	$y = 0.1305x - 7.4539$	5
HP29	$y = 0.1549x - 9.8353$	4
HP30	55	55
HP31	5	5
HP32	-3	-3
HP33	3	3

Penggambaran kontur rembesan dapat dilihat pada Gambar 6 dimana semua bacaan piezometer dihubungkan. Pada gambar tersebut tampak beberapa piezometer yang tidak berfungsi (EP4, EP5, EP7, EP11, HP14, HP16, HP17) dan tidak menghasilkan data sehingga tidak masuk ke dalam proses regresi linear. Beberapa piezometer menunjukkan bacaan yang negatif. Hal ini terjadi kemungkinan karena tekanan air pori negatif berkembang di luar permukaan bebas karena kapilaritas yang mengarah pada perkembangan hisapan tanah (*soil suction*).

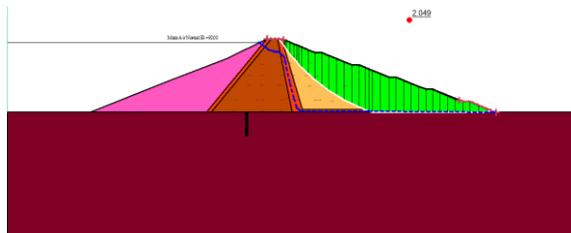
Kemungkinan lain adalah piezometer yang tidak pernah dikalibrasi yang dapat menyebabkan pembacaan tidak akurat karena jebakan udara dan akumulasi gas di ujung tip piezometer. Kontur rembesan ini selanjutnya di input ke dalam Program Slope/W sebagai dasar perhitungan stabilitas lereng baik statik maupun pseudo-statik.



Gambar 6. Kontur rembesan pada tubuh Bendungan Kedung Ombo pada kondisi *steady state* (El. +92.00)

Analisis stabilitas lereng statik

Analisis stabilitas lereng statik pada penelitian ini dilakukan pada kondisi *steady state* (EL. +92.00). Untuk operasi jangka panjang, permukaan preatik dalam tubuh bendungan telah tersedia (Gambar 6) dan menjadi dasar permukaan kritis lereng *downstream*. Simulasi stabilitas lereng statik menggunakan program Slope/W dengan kondisi garis freatik berdasarkan Gambar 6 dan parameter material yang digunakan sesuai Tabel 1 – Tabel 5 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Faktor Keamanan Minimum Pada EL.+92.00 (Muka Air Normal)

Hasil simulasi menunjukkan bahwa faktor keamanan minimum pada kondisi *steady state* sebesar 2.049. Nilai ini cukup besar mengingat bidang gelincir pada kedua kondisi tersebut tidak memotong garis freatik dan Bendungan Kedung Ombo adalah tipe bendungan urugan batu dimana material batu lebih aman terhadap longsor. Nilai faktor keamanan minimum hasil

analisis sebesar 2.049 lebih besar dari faktor keamanan minimum yang diijinkan pada kondisi *steady state* yaitu 1.5 (United States Society on Dams, 2007). Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas lereng pada Bendungan Kedung Ombo pada kondisi *steady state* masih aman.

Analisis stabilitas lereng pseudostatik

Analisis koefisien gempa yang digunakan untuk evaluasi stabilitas lereng pseudostatik Bendungan Kedung Ombo mengacu kepada Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian PUPR, 2017). Perlu ditentukan terlebih dahulu dahulu kelas risikonya dalam menentukan beban gempa desain. Perhitungan Kelas Risiko Bendungan Kedung Ombo mengacu kepada “Pedoman Konstruksi dan Bangunan Sipil, Analisis Dinamik Bendungan Urugan, SK DirJen SDA No. 27/KPTS/D/2008 Tanggal 31 Januari 2008 (Departemen Pekerjaan Umum, 2008). Hasil perhitungan Kelas Risiko Bendungan Kedung Ombo disajikan pada Tabel 7.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kelas risiko Bendungan Kedung Ombo termasuk “Kelas Risiko IV (ekstrim). Berdasarkan hal tersebut maka analisis stabilitas lereng harus dilakukan dengan 2 (dua) tingkat beban gempa, yaitu:

- Persyaratan tanpa kerusakan pada gempa periode ulang $T=100$ tahun (gempa OBE), dengan Faktor Keamanan (FK) minimum $\geq 1,20$ sesuai dengan kriteria yang berlaku. Pada gempa OBE, bendungan tidak mengalami kerusakan yang serius, dan masih tetap beroperasi, serta tidak diperlukan pekerjaan perbaikan yang menyeluruh.
- Persyaratan tanpa kerusakan pada gempa periode ulang $T=10.000$ tahun (gempa MDE) dengan $FK \geq 1$. Jika tidak dipenuhi, maka harus dilakukan analisis dinamik untuk menghitung alihan tetap, dimana alihan tetap harus lebih kecil dari 50% tinggi jagaan. Pada gempa MDE, bendungan harus mampu menahan gempa desain MDE tanpa keruntuhan atau diperkenankan ada kerusakan dengan alihan tetap tidak melampaui 50% dari tinggi jagaan.

Tabel 7. Perhitungan Kelas Risiko Bendungan Kedung Ombo

No.	Pengaruh Risiko	Kriteria Angka Bobot				Dimensi KDO	Faktor Risiko	Bobot
		Ekstrim	Tinggi	Moderat	Rendah			
1.	Kapasitas waduk (10 ⁶ m ³) Bobot	>100 (6)	100 – 1.25 (4)	1.00 – 0.125 (2)	<0.125 (0)	1000	FR _k	6
2.	Tinggi bendungan (m) Bobot	> 45 (6)	45 - 50 (4)	30 - 15 (2)	< 15 (0)	61	FR _k	6
3.	Kebutuhan evakuasi (jumlah orang) Bobot	> 1000 (12)	1000 - 100 (8)	100 - 1 (4)	0 (0)	> 1000	FR _e	12
4.	Tingkat kerusakan di hilir Bobot	Sangat tinggi (12)	Tinggi (10)	Agak Tinggi (8)	Moderat (4)	12	FR _h	12
							Fr _{tot}	36
							Kelas Risiko	IV (Ekstrim)

Percepatan puncak gempa di batuan dasar berdasarkan Peta Gempa Indonesia 2017 ditentukan dengan memplot koordinat lokasi Bendungan Kedung Ombo LS dan BT (Lintang Selatan = 7° 15' 33" dan Bujur Timur = 110° 50' 18") pada peta percepatan puncak di batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 10 tahun (atau probabilitas 100 tahun) untuk gempa OBE, dan pada peta percepatan puncak di batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 1% dalam 100 tahun (atau probabilitas 10.000 tahun) untuk gempa MDE. Untuk gempa periode ulang 100 tahun (OBE), dari peta terlihat lokasi Bendungan Kedung Ombo terletak di antara kontur 0.05g dan 0.1g. Dengan mempertimbangkan kondisi terburuk maka diambil nilai tertinggi sehingga diperoleh besarnya PGA di Bendungan Kedung Ombo untuk periode ulang 100 tahun (OBE) adalah 0.1g. Untuk gempa periode ulang 10.000 tahun (Gempa MDE) dari peta terlihat lokasi Bendungan Kedung Ombo terletak di antara kontur 0.7g dan kontur 0.8g. Dengan mempertimbangkan kondisi terburuk maka diambil nilai tertinggi sehingga diperoleh besarnya PGA di Bendungan Kedung Ombo untuk periode ulang 10.000 tahun (MDE) adalah 0.8g.

Percepatan puncak gempa di permukaan tanah diperoleh dengan menggunakan Persamaan (5) berikut:

$$PSA = F_{PGA} \times PGA \quad (5)$$

dimana: PSA = percepatan puncak gempa di permukaan tanah, yang berdasarkan klasifikasi site, F_{PGA} = faktor amplifikasi tanah, PGA = percepatan puncak gempa di batuan dasar. Jenis batuan pada pondasi Bendungan Kedung Ombo adalah termasuk "Batuan", sehingga $F_{PGA} = 1.00$ (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004).

Perhitungan koefisien gempa desain untuk analisis stabilitas lereng bendungan dilakukan dengan cara koefisien gempa termodifikasi, dimana dalam metode analisis ini, koefisien gempa desain untuk tubuh bendungan urugan adalah merupakan fungsi dari kedalaman yang dihitung dengan Persamaan (6) dan (7) berikut:

$$k_o = \alpha_2 \times k_h \quad (6)$$

$$k_h = PSA / g \quad (7)$$

dimana k_o = koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah, α_2 = koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan (0.5), dan k_h = koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang T.

Dari persamaan 6 dan 7 didapatkan nilai $k_h = 0.10$ dan $k_o = 0.05$ untuk gempa OBE, sedangkan untuk gempa MDE didapatkan nilai nilai $k_h = 0.80$ dan $k_o = 0.40$.

Untuk analisis stabilitas lereng bendungan, koefisien gempa pada kedalaman "y" dari puncak bendungan adalah berbeda-beda karena efek "cambuk", dimana semakin tinggi

tempat yang ditinjau guncangan gempa akan semakin besar. Koefisien gempa pada kedalaman y dari puncak bendungan dihitung dengan Persamaan (8) dan (9) berikut:

$$\text{Untuk } 0 < y/H \leq 0.4: \\ k_s = k_o \times (2.5 - 1.85 \times (y/H)) \quad (8)$$

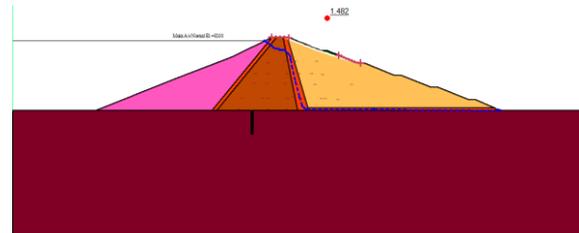
$$\text{Untuk } 0.4 < y/H \leq 1.0: \\ k_s = k_o \times (2.0 - 0.60 \times (y/H)) \quad (9)$$

dimana: k_s = koefisien gempa pada kedalaman y m dari puncak bendungan, k_o = koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah, y = kedalaman dari puncak bendungan (m) dan H = tinggi bendungan (m).

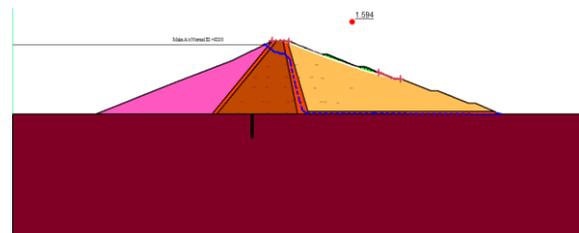
Analisis stabilitas lereng bendungan ditinjau pada $y/H = 0.25; 0.50; 0.75$ dan 1.00 , dan diperhitungkan adanya koefisien gempa vertikal (k_v) yang besarnya antara 50 % ~ 65 % dari koefisien gempa horisontal (k_s). Dalam studi ini diambil $k_v = 0.50 \times k_s$. Perhitungan percepatan gempa desain untuk periode ulang 100 tahun (Gempa OBE), dan 10.000 tahun (Gempa MDE) dengan cara koefisien gempa termodifikasi disajikan pada Tabel 8. Nilai percepatan gempa tersebut kemudian dimasukkan ke dalam program Slope/W dengan parameter-parameter yang sama pada analisis stabilitas lereng statik. Faktor keamanan minimum dari hasil analisis stabilitas lereng pseudostatik pada beban gempa OBE dan MDE menggunakan Slope/W dapat dilihat pada Gambar 8 – 15. Rekapitulasi angka keamanan dengan gempa OBE dan MDE dari hasil analisis stabilitas lereng pseudostatik pada kondisi *steady state* menggunakan Slope/W disajikan dalam Tabel 9.

Hasil analisis menunjukkan bahwa pada beban gempa kala ulang 100 tahun atau OBE nilai faktor keamanan (FK) minimum di atas 1.1.

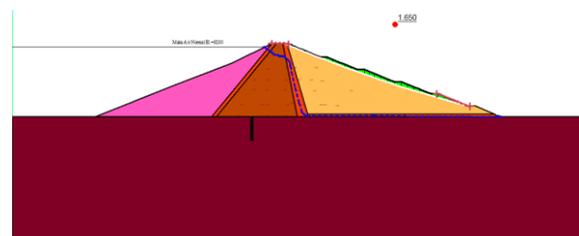
Berbeda dengan kondisi pada beban gempa kala ulang 10.000 tahun atau MDE dimana faktor keamanan (FK) minimum 1. Apabila syarat tidak terpenuhi atau FK min < 1 maka sesuai Pedoman Konstruksi dan Bangunan Sipil, Analisis Dinamik Bendungan Urugan (Departemen Pekerjaan Umum, 2008) harus dilakukan analisis alihan tetap dengan respon dinamik simplifikasi atau respon dinamik satu.



Gambar 8. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa OBE $y/H = 0.25$



Gambar 9. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa OBE $y/H = 0.50$



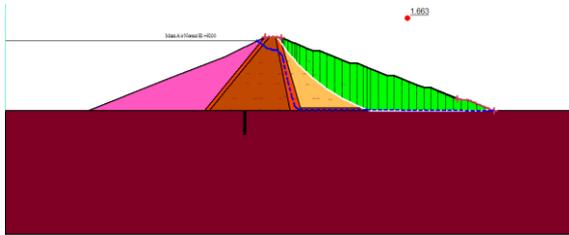
Gambar 10. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa OBE $y/H = 0.75$

Tabel 8. Perhitungan Kelas Risiko Bendungan Kedung Ombo

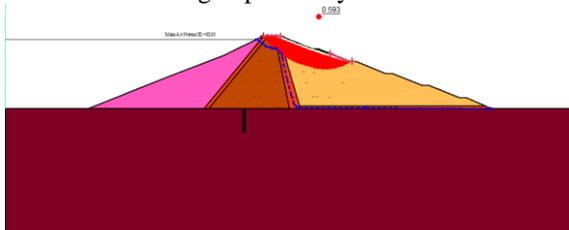
Periode Ulang T (tahun)	PGA (g)	F_{PGA}	PSA (g)	k_h	k_o	k_s pada y/H			
						0.25	0.5	0.75	1.00
100 (OBE)	0.1	1.0	0.1	0.1	0.05	0.102	0.078	0.070	0.051
10000 (MDE)	0.8	1.0	0.8	0.8	0.40	0.815	0.680	0.560	0.408

Tabel 8. Lanjutan

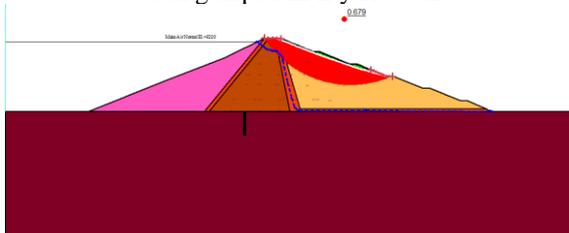
Periode Ulang T (tahun)	PGA (g)	F_{PGA}	PSA (g)	k_h	k_o	K_v pada y/H			
						0.25	0.5	0.75	1.00
100 (OBE)	0.1	1.0	0.1	0.1	0.05	0.051	0.043	0.039	0.035
10000 (MDE)	0.8	1.0	0.8	0.8	0.40	0.408	0.340	0.310	0.280



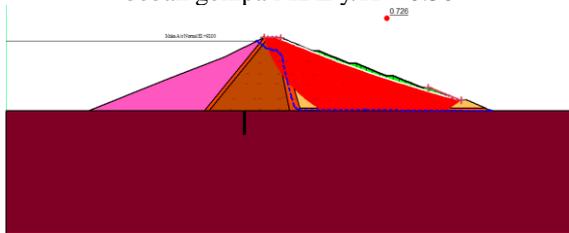
Gambar 11. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa OBE $y/H = 1.00$



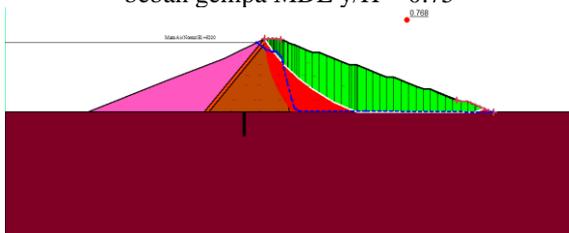
Gambar 12. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa MDE $y/H = 0.25$



Gambar 13. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa MDE $y/H = 0.50$



Gambar 14. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa MDE $y/H = 0.75$



Gambar 15. FK minimum pada kondisi MAN dan beban gempa MDE $y/H = 1.00$

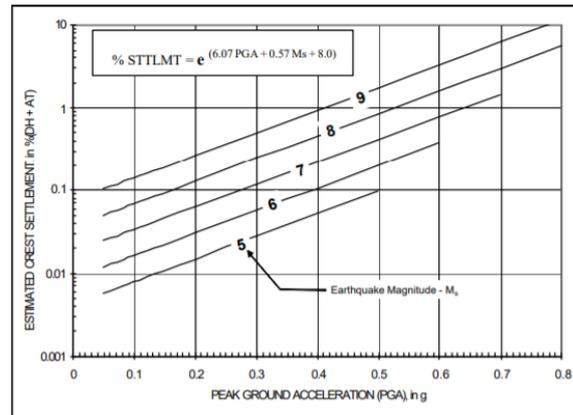
Tabel 9. Rekapitulasi Faktor Keamanan Minimum

Kondisi	Faktor Keamanan Minimum			
	0.25	0.5	0.75	1.00
OBE	1.482	1.594	1.650	1.663
MDE	0.593	0.679	0.726	0.768

Metode yang digunakan dalam analisis alihan tetap menggunakan Metode Swaisgood (Swaisgood, 2003). Langkah-langkah

perhitungan dalam menggunakan metode ini adalah menggunakan parameter nilai PGA yang didapatkan berdasarkan Peta Gempa Tahun 2017. Nilai PGA yang didapatkan selanjutnya di *plotting* pada grafik (Gambar 16) untuk masing-masing kondisi atau menggunakan Persamaan (10) berikut:

$$\% \text{ settlement} = e^{(6.07PGA + 0.57M_s - 8.0)} \quad (10)$$



Gambar 16. Grafik untuk estimasi penurunan puncak bendungan (Swaisgood, 2003)

dimana % settlement = jumlah penurunan puncak bendungan (dalam meter) dibagi dengan tinggi bendungan ditambah tebal aluvium (dalam meter) dikali 100, PGA = percepatan tanah horizontal puncak batuan pondasi (dalam g) yang tercatat atau diperkirakan di lokasi bendungan, dan M = magnitudo gempa (dalam skala gelombang permukaan: M_s).

Skala gelombang permukaan (M_s) dapat dicari dengan mengkonversi skala gelombang momen (M_w) (Tauladani et al., 2015) menggunakan Persamaan (11) berikut:

$$M_w = (0.99 \times M_s) + 0.08 \quad (11)$$

Untuk mengetahui nilai M_w pada Bendungan Kedung Ombo, Partono et al. (2019) dalam penelitiannya melakukan analisis terkait bahaya seismik. Dari analisis tersebut, didapatkan nilai M_w pada 26 segmen sesar. Dari ke 26 segmen sesar tersebut, Purwodadi yang menjadi lokasi Bendungan Kedung Ombo memiliki nilai M_w sebesar 6.5.

Nilai M_w tersebut kemudian dikonversi menggunakan Persamaan (11) untuk mendapatkan nilai M_s . Dari hasil perhitungan didapatkan nilai $M_s = 6.49$. Apabila nilai M_s dan GPA sudah diketahui maka perhitungan alihan tetap dapat dihitung menggunakan Persamaan 10 atau grafik pada Gambar 16. Hasil perhitungan alihan tetap

menggunakan Metode Swaisgood dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Perhitungan alihan tetap menggunakan Metode *Swaisgood*

Kondisi	PGA	Penurunan (%)	Penurunan (m)
OBE	0.1	0.025	0.015
MDE	0.8	1.737	1.060

Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan terbesar yaitu 1.060 meter <3.00 meter (50% tinggi jagaan muka air normal). Hal ini menunjukkan stabilitas Bendungan Kedung Ombo masih memenuhi syarat keamanan stabilitas akibat gempa *Operating Basis Earthquake* (OBE) dan *Maximum Design Earthquake* (MDE).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng akibat peningkatan muka air normal pada kondisi *steady state*, nilai faktor keamanan (FK) minimum masih di atas faktor keamanan (FK) minimum yang diijinkan. Pada analisis statik atau tanpa menggunakan koefisien gempa, nilai faktor keamanan (FK) minimum cukup besar mengingat bidang gelincir yang terjadi tidak ada yang memotong garis fretatik. Selain itu tipe Bendungan Kedung Ombo yang termasuk bendungan urugan batu juga mendukung stabilitas tubuh bendungan karena material batu lebih stabil terhadap longsor. Pada analisis stabilitas lereng pseudostatik pada kondisi OBE, nilai faktor keamanan (FK) minimum masih di atas faktor keamanan (FK) minimum yang diijinkan. Lain hal nya pada kondisi MDE dimana faktor keamanan (FK) minimum yang terjadi semuanya di bawah faktor keamanan (FK) minimum yang diijinkan. Bendungan Kedung Ombo masih dalam kategori aman karena faktor keamanan minimum masih diatas faktor keamanan yang diijinkan. Namun dari hasil analisis alihan tetap (deformasi permanen), penurunan yang terjadi masih di bawah 50% dari tinggi jagaan eksisting sehingga pada kondisi MDE tubuh bendungan masih aman ditinjau dari stabilitas lereng.

DAFTAR PUSTAKA

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2001). *Slope Stability and Stabilization Methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

- Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian PUPR. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017* (1st ed.). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- BBWS Pemali Juana. (1989a). *Kedung Ombo Dam Project Construction Supervision - Completion Report*. BBWS Pemali Juana, Semarang.
- BBWS Pemali Juana. (2012). *Laporan Akhir Inspeksi Besar Waduk Kedung Ombo*. BBWS Pemali Juana, Semarang.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). MC Graw Hill Companies, Inc. https://doi.org/10.1007/978-1-349-13729-9_26.
- Chakraborty, S. (2018). *A Comprehensive Seismic Response and Slope Stability Analysis Framework for Evaluating The Stability of Hydraulic-Fill Dams* (Issue August). The University of Texas at Arlington.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2004). *Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa*.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2008). *Analisis Dinamik Bendungan Urugan*. Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Ebeling, R. M., & Morrison Jr, E. E. (1993). *The seismic design of waterfront retaining structures*. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Information Technology Lab.
- FERC. (2006). *Embankment Dams. In Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydro-power Projects* (Issue September, p. 90). Federal Energy Regulatory Commission.
- FEMA. (2005). *Federal Guidelines for Dam Safety - Earthquake Analyses and Design of Dams* (Issue May). FEMA.
- Melo, C., & Sharma, S. (2004). Seismic Coefficients for Pseudostatic Slope Analysis. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, 369, 15.
- MLIT. (2020). *Proposal on Upgrading Kedung Ombo Dam (KDO Dam)*. The Ministry of Land, Infrastructure and Tourism, Japan.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength dan Slope Stability* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Geo-Slope. (2012). *Stability Modeling with Slope/W* (Issue June). GEO-SLOPE International, Ltd.

- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. Taylor & Francis/Balkema.
- Partono, W., Irsyam, M., Sengara, I. W., & Asrurifak, M. (2019). Seismic Microzonation of Semarang, Indonesia, based on Probabilistic and Deterministic Combination Analysis. *GEOMATE Journal*, 16(57), 176-182.
- Rahman, F. I., & Al Mamun, M. A. (2016). *Evaluation the Stability of Slope of Rajshahi City Protection Embankment under Seismic Load*. Rajshahi University of Engineering & Technology.
- Redda, H. (2016). *Evaluation of Embankment Dam Failure and Remedial Measure (Case Study of Gomit Dam in Amhara Region)*. Addis Ababa University.
- Swaisgood, J. R. (2003, February). Embankment dam deformations caused by earthquakes. In *Pacific conference on earthquake engineering* (Vol. 14).
- Terzaghi, V. K. (1963). The Shearing Resistance of Saturated Soils and the Angle between the Planes of Shear. *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 54–56.
- Tauladani, R., Ismail, N., & Sugianto, D. (2015). Kajian Seismisitas dan Periode Ulang Gempa Bumi di Aceh. *Jurnal Ilmu Kebencanaan (JIKA) Pascasarjana Universitas Syiah Kuala*, 2, 44–50.
- United States Society on Dams. (2007). *Strength of Materials for Embankment Dams* (Issue February).
- Williams, J., & Boomer, J. (2013). Embankment Dam Slope Stability 101. *Western Dam Engineering*, 1(3), 2–6.
- Wulandari, P.S., & Tjandra, D. (2018). Analisis Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Stabilitas Lereng Waduk Menggunakan Program Plaxis 2D. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 24(2), 113-121.