ANALISIS STABILITAS FONDASI MESIN PEMBANGKIT HYDRO PADA SUNGAI BAWAH TANAH ZONA KARST

¹Sulha, ²Ahmad Rifa'i, ³Umran Sarita

Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Halo Oleo, Kendari, Indonesia

Dosen Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, Indonesia

E-mail: sulha.kendari@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas fondasi mesin pembangkit listrik *hydro* pada sungai bawah tanah zona karst di Goa Seropan, menggunakan metode elemen hingga model *plan-strain*. Pendekatan analisis dilakukan pada tampang fondasi dengan menggunakan 4 model geometri. Material properti di lokasi konstruksi diambil dari hasil penelitian dan uji laboratorium IWRM Goa Seropan dari tim teknis UGM. Input geometri diperoleh dari data pengukuran lapangan yang disederhanakan, sedangkan input parameter tanah, batuan dan beton diperoleh dari data sekunder. Analisis model yakni beban statis dan dinamis menggunakan *software* PLAXIS v8.2, yang divalidasi berdasarkan perhitungan manual. Hasil simulasi numeris menunjukkan penambahan *bored pile* 0,20 meter pada sistem fondasi pembangkit hydro-power mampu melawan tegangan yang terjadi di tanah dasar akibat beban gempa dengan faktor aman sebesar 2,01. Sistem fondasi pada model geometri I, dengan dimensi pelat horisontal sebesar 0,40 meter, dinding vertikal sebesar 0,30 meter, dan *bored pile* sebesar 0,20 meter, cukup aman dan stabil terhadap beban statik maupun dinamik. Selisih *displacement* vertikal maksimum dua titik fondasi pada model geometri I akibat akumulasi pembebanan menyebabkan *angular distortion* sebesar 0,2159 cm (1/1112) masih relatif kecil dari *angular distortion* izin (1/750). Simpangan horisontal maksimum fondasi dan bangunan yang terjadi akibat beban gempa 355,4g adalah sebesar 0,379%, masih relatif aman jika ditinjau terhadap simpangan izin sebesar 1,54%. *Software* PLAXIS terbukti mampu memodelkan perilaku dinding goa dan struktur yang memikul beban statik dan dinamik dengan cukup baik.

Kata Kunci: *PLAXIS, pondasi, model, plain-strain, sungai*

Abstract

The analysis on the stability of the hydropower machine foundation on the underground river in the karst zone. This study aims to analyze the stability of the hydro power machine foundation on the underground river karst zones in Goa Seropan, using the finite element method model of the *plan-strain*. The approach on the analysis is performed on the area of the foundation using 4-proposed geometry models. The material properties at the construction site are obtained from the results of the research and the laboratory testing of IWRM at Goa Seropan from the technical team of UGM. The geometry input is derived from a simplified measurement data, while the input parameters of soil, rock and concrete are obtained from a secondary data. The model analysis on the static and dynamic loads is using the PLAXIS software v8.2, being validated to manual calculations. The numerical simulation results show the addition of a 0.20 meter-bored pile foundation system on the hydropower plant is able to resist the pressure occurring in the sub-grade due to earthquake load with the safety factor of 2.01. The foundation system of the geometry model 1, by a 0.40 meter horizontal plate with 0.30 meter-vertical wall, and the 0.2 meter bored pile, is quite safe and stable against the static and dynamic loads. The maximum difference on the vertical displacement on two points according to the model foundation on the geometry model I due to accumulation of the angular loading caused by the distortion of 0.2159 cm (1/1112), is still relatively smaller than the angular distortion allowance (1/750). The maximum horizontal deviation on the foundation and the building caused by the earthquake load 355,4g (0.379%) is still relatively safe if evaluated against the permission deviation (1.54%). The PLAXIS software has proven pretty well to model the behavior of the cave walls and the structures with the static and dynamic loads.

Keywords: *PLAXIS, foundation, model, plain-strain, river*

1. Pendahuluan

Kondisi topografi dan geologi Kabupaten Gunung Kidul merupakan pegunungan karst dan memiliki akuifer air tanah yang sangat dalam. Hal ini menyebabkan masyarakat kesulitan dalam memenuhi kebutuhan air bersih. Potensi sumber daya air di kabupaten ini cukup besar khususnya di daerah karst yang berupa aliran air yang berada pada sungai bawah tanah Goa Seropan. Pemanfaatan air bawah tanah Goa Seropan selain untuk bahan baku air minum juga dapat dimanfaatkan sebagai penggerak turbin yang akan menghasilkan sumber energi guna melayani kebutuhan listrik pompa dalam mengangkat air bawah tanah ke permukaan. Perencanaan lokasi dan type konstruksi sistem fondasi menjadi inti permasalahan untuk mengatasi kekurangan air bersih yang dihadapi sekarang ini maupun yang akan datang.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian adalah untuk menganalisis sifat teknis batuan dan stabilitas sistem fondasi mesin yang terletak di atas tanah zona karst. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang perencanaan sistem fondasi mesin pembangkit listrik dan mengetahui stabilitas sistem fondasi terhadap beban statis maupun dinamis yang terletak di atas tanah karst.

2. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

Tinjauan Pustaka

Keruntuhan

Kriteria keruntuhan berdasarkan Hoek (2002) memperhatikan aspek tegangan tekan batuan dari uji UCS (MPa), tegangan tarik dari uji *point load* (MPa), rasio tegangan tekan dan tegangan tarik, reduksi dari nilai m_i , konstanta massa batuan, indeks tegangan geologi berdasarkan susunan rekahan dan kondisi permukaan, dan faktor gangguan pada saat pelaksanaan penggalian. Pedoman perkiraan nilai GSI dan D dapat didasarkan kepada Hoek (2002). Analisis pendekatan dengan *software RocLab* untuk mengetahui kekuatan geser batuan dapat berdasarkan pada kriteria Hoek (2002).

Sifat keteknikan massa batuan dapat diperoleh dari klasifikasi massa batuan. Klasifikasi bertujuan untuk memperkirakan kekuatan massa batuan sesuai jenis dan kelas batuan serta sistem pendukung permanen yang akan dipakai. Untuk

memperkirakan massa batuan, dapat digunakan klasifikasi batuan dengan menggunakan kriteria RMR. Ada enam parameter dasar yang digunakan pada sistem RMR (Bieniawski, 1989), yaitu uji kekuatan batuan intak (berdasarkan *point load strength index* atau *uniaxial compressive strength*, *Rock Quality Designation* (RQD)), spasi bidang diskontinu, kondisi bidang diskontinu, kondisi air tanah dan orientasi bidang diskontinu.

Getaran

Selain beban statis, sistem fondasi memikul beban getaran yang mengakibatkan pergeseran pada sumbu Z, X, Y dan perputaran pada sumbu Z, X, Y maupun kombinasi dari keduanya. Menurut Suhendro (2000) untuk bangunan geser, getaran yang lebih besar pengaruhnya adalah getaran arah horisontal. Apriyono, (2009) telah menganalisis stabilitas terowongan menggunakan data percepatan di lokasi berbeda dari data USGS dengan pendekatan percepatan batuan dasar puncak (PGA) yang sesuai dengan lokasi dalam penelitian ini.

Faktor Aman

Dasar penentuan faktor aman dapat dilihat pada Hardiyatmo (2010). Untuk menganalisa faktor aman keruntuhan dengan menggunakan PLAXIS dapat menggunakan metode *Phi-c reduction* yang pada prinsipnya mengacu pada kriteria *Coulomb*.

Defleksi dan Resonansi

Defleksi horisontal merupakan perpindahan yang diperbesar yang dihitung akibat gaya gempa. Amplitudo horisontal yang terjadi akibat getaran dengan frekuensi mesin tertentu sebaiknya terletak pada zona A atau B. Amplitudo vertikal maksimum akibat getaran dengan frekuensi mesin 1500 RPM adalah (0,004 – 0,006) cm (Arya, 1979).

Resonansi terjadi jika jika rasio frekuensi operasi mesin dan frekuensi alami struktur (β) mendekati atau sama dengan satu yakni pada kondisi $0,8 \geq \beta \leq 1,2$, jika $\beta \leq 0,8$ atau $\beta \geq 1,2$ maka tidak akan terjadi resonansi (Arya, 1979)). Menurut Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup, bahwa tingkat getaran mekanik sebaiknya masuk dalam kategori tidak mengganggu.

Perancangan Fondasi

Perencanaan pelat fondasi kotak diasumsikan sebagai balok yang memikul gaya momen lentur. Menurut Priyosulistiyono (2010), bila luas tulangan $a < a_b$ (luas tulangan berimbang), maka tulangan yang terpasang menghasilkan penulangan liat. Jika $a > a_b$, maka akan menghasilkan penulangan getas sehingga kemampuan penampang dibatasi sampai pada $a \leq 75\% a_b$.

Landasan Teori

Stabilitas Fondasi Mesin

Teori daya dukung *ultimate* telah dipublikasikan oleh Das (1993), merupakan fungsi berat isi massa batuan (kN/m^3), lebar fondasi (m), kedalaman fondasi di bawah muka tanah (m), dan sudut gesek dalam massa batuan ($^\circ$).

Kapasitas Dukung Statis dan Dinamik dapat dirumuskan sebagai berikut (Arya, 1979)

$$\sigma \pm P_{dyn} < 0,75 q_{all} \quad (1)$$

$$P_{dyn} = \frac{P_v}{B.H} + \frac{M_{Tr}}{W_x} \quad (2)$$

Dimana P_v adalah gaya vertikal dinamik yang transfer (kN) ($T_r \cdot P_{0z}$), M_{Tr} adalah momen yang ditransfer ke tanah dasar ($kN.m$), yang merupakan fungsi dari $P_v(s)$ dan $P_H(L)$. W_x adalah momen lawan penampang (m^3), B adalah lebar fondasi (m), H adalah panjang fondasi (m).

Penyelesaian Metode Elemen Hingga PLAXIS

Langkah awal penyelesaian secara numeris berbasis metode elemen hingga dalam PLAXIS, kemudian dilanjutkan dengan penentuan *aproximate function*-nya dan *displacement* arah u_x dan u_y , matriks kekakuan dan tahap solusi (Brinkgrave, 2002).

Analisis Dinamis

Persamaan dasar untuk gerakan yang bergantung terhadap waktu dari suatu massa yang dikenai beban dinamis adalah sebagai berikut (Das, 1993)

$$\underline{M} \cdot \ddot{\underline{u}} + \underline{C} \cdot \dot{\underline{u}} + \underline{K} \cdot \underline{u} = \underline{F} \quad (3)$$

dengan, $\underline{M}$ adalah matriks massa, $\underline{C}$ adalah matriks redaman, $\ddot{\underline{u}}$ adalah matriks percepatan, $\dot{\underline{u}}$ adalah matriks kecepatan, $\underline{u}$ adalah matriks perpindahan, dan $\underline{F}$ adalah vektor beban.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di sekitar Gua Seropan, peta lokasi penelitian dan rencana pembangunan fondasi disajikan pada Gambar 1. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat tulis, alat hitung, komputer dan alat cetak printer. Bahan yang digunakan dalam analisis adalah data sekunder hasil uji laboratorium IWRM Goa Seropan dari Tim Teknis UGM. Tahapan penelitian dalam bentuk bagan alir penelitian disajikan pada Gambar 2.

Gambar 1. (a) Lokasi penelitian (b) Rencana pembangunan fondasi (Rifai, 2011)

Gambar 2. Bagan alir penelitian.

4. Hasil dan Pembahasan

Data Input PLAXIS

Properties Batuan dan Beton

Dari hasil penelitian dan pengujian material Goa Seropan di Laboratorium Fakultas Teknik UGM oleh (Rifai, 2011) kemudian pendekatan dengan *software RocLab*, diperoleh nilai kekuatan geser batuan yakni, nilai kohesi (c), sudut gesek dalam, dan modulus Elastis (E_m). Tabel 1 memperlihatkan perbandingan data material masukan PLAXIS yang digunakan pada perencanaan bendung sungai bawah tanah di Goa Bribin (Handoko, 2008) dan Goa Seropan.

Tabel 1. Data material input PLAXIS

No	Parameter	Simbol	Nilai yang digunakan di		Satuan
			Goa Bribin	Goa Seropan	
Lapisan Batuan					
1	Model material	-	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	-
2	Jenis perilaku material	-	Tak terdrainase	Tak terdrainase	-
3	Berat isi batuan di atas garis freatik	γ_{unsat}	23,799	18,371	kN/m ³
4	Berat isi batuan di bawah garis freatik	γ_{sat}	24,97	19,281	kN/m ³
5	Permeabilitas arah horizontal	k_x	0,000174787	0,00046108	m/det
6	Permeabilitas arah vertikal	k_y	0,000174787	0,00046108	m/det
7	Modulus Young	E_{ref}	4.000.000	210.320	kN/m ²
8	Angka Poisson	ν	0,33	0,25	-
9	Kohesi	c_{ref}	225	158	kN/m ²
10	Sudut Geser	ϕ	34,59	35	°
11	Sudut Geser dinamis ($\phi - 2$)°	ϕ_{din}	-	33	°
12	Sudut Dilatasi	ψ	17	3	°
13	Faktor reduksi kuat geser antarmuka	R_{inter}	0,75	0,52	-
Beton Fondasi					
1	Model material	-	Linier Elastis	Pelat	-
2	Jenis perilaku material	-	Tidak berpori	Elastis	-
3	Berat isi beton	γ_{unsat}	24	24	kN/m ³
4	Modulus Young	E_{ref}	30.000.000	29.700.000	kN/m ²
5	Angka Poisson	ν	0,2	0,2	-
Beton Pengisi					
1	Model material	-	-	Linier Elastis	-
2	Jenis perilaku material	-	-	Tidak berpori	-
3	Berat isi beton	γ_{unsat}	-	22	kN/m ³
4	Modulus Young	E_{ref}	-	25.700.000	kN/m ²
5	Angka Poisson	ν	-	0,2	-

Data Input Beton Fondasi Kotak dan Penyangga

Pada tahap awal simulasi, dimensi fondasi yang digunakan adalah Model Geometri I. Simulasi selanjutnya dilakukan dengan variasi dimensi fondasi sesuai dengan Gambar 3.

Klasifikasi massa batuan STA 15 adalah sedang (*fair rock*), sehingga metode perkuatan yang sesuai dengan pedoman dari Bieniawski (1989), berupa *rock bolt* dengan kedalaman 4 m dan jarak rata-rata 1,5-2 m, tebal *shotcrete* digunakan 70 mm untuk seluruh permukaan dinding goa area konstruksi fondasi. Rekapitulasi data input PLAXIS masing-masing model geometri disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi parameter konstruksi fondasi tiap model geometri

Elemen Konstruksi Fondasi	diameter/tebal (m)	Parameter			Ket.
		EA (kN)	EI (kNm ²)	w (kN/m/m)	
Bored pile	0,20	932580	0,613	0,15072	G1
	0,25	1458482,14	2,345	0,236	G2,G3
	0,30	2100214,29	7,00143	0,33943	G4
Plat hor. kotak	0,40	28512000	380160	9,6	G1,G2,G4
	0,45	32076000	541282,5	10,8	G3
Plat vert. kotak	0,30	37422000	55010340	30,24	G1,G3,G4
	0,35	43659000	64178730	35,28	G2
Fondasi langsung	0,20	16038000	53460	4,8	G1,G2,G3,G4
Pelat Lantai	0,12	16038000	19245,6	2,88	G1,G2,G3,G4
Pelat Atap	0,30	40095000	300712,5	7,2	G1,G2,G3,G4
shotcrete	0,07	33082000	13508,576	1,68	G1,G2,G3,G4
anchor	0,02	4,71e+4	$L_s = 2,00$ m		G1,G2,G3,G4

Gambar 3. Dimensi fondasi dan posisi mesin

Data Topografi Goa Seropan

Hasil pengukuran topografi berupa *layout* dan potongan melintang desain awal fondasi yang akan dianalisis, disajikan pada gambar 4. Pemodelan yang digunakan berupa *plane strain*, sebagai non-terowongan dengan jari-jari yang tidak beraturan dan berbentuk oval. Kondisi eksisting Goa Seropan dimodelkan seperti pada Gambar 5.

Gambar 4. Pemodelan kondisi eksisting Goa Seropan.

Gambar 5. Profil melintang, dimensi dan perletakan fondasi *hydropower plant*

Perhitungan Manual Amplitudo Getaran

Idealisasi Beban Dinamik Fondasi Mesin

Idealisasi kombinasi pembebanan teranlasi dan rotasi sesuai dengan Gambar 6 dan Gambar 7. Gaya dinamis yang bekerja akibat beban getaran turbin ($P_{0\ pat}$) adalah 2,08 kN, sedangkan akibat pompa ($P_{0\ pump}$) adalah 1,246 kN, sehingga gaya total (P_0) adalah 3,326 kN.

Gambar 6. Idealisasi kombinasi beban vertikal dan rotasi.

Gambar 7. Idealisasi kombinasi beban horisontal dan rotasi

Hasil Perhitungan Manual Amplitudo

Dengan menggunakan persamaan gerak kombinasi translasi dan rotasi Irsyam (2008), nilai hasil perhitungan amplitudo getaran vertikal dan horisontal masing-masing sebesar $2.554 \cdot 10^{-6}$ rad/s dan 1.8310^{-6} rad/s.

Validasi

Validasi dilakukan khusus pada tahapan pembebanan dinamik terhadap data amplitudo getaran teredam setelah mesin dioperasikan. Jika

nilai yang dihasilkan dari simulasi numeris pada interval waktu tertentu telah mendekati hasil perhitungan secara manual, maka nilai *displacement* yang diperoleh sudah realistis. Perbandingan hasil perhitungan manual dan analisis PLAXIS sebagai validasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Perbandingan hasil hitungan *displacement* secara manual dan analisis PLAXIS

Kondisi Pembebanan Dinamis	Displ.	Amplitudo Getaran Mesin (m)		Total Displac. (m)	Total Displ.Perhitungan PLAXIS (m)
		PAT	Pump		
Vertikal	Translasi	3,271E-6	1,698E-6	4,969E-6	4,990E-6
	Rotasi	1,443E-6	1,112E-6	2,554E-6	
Horisontal	Translasi	4,466E-6	1,137E-6	5,604E-6	5,690E-6
	Rotasi	1,445E-6	3,909E-7	1,836E-6	

Selanjutnya data pembebanan dinamik gempa yang digunakan, diambil pada lokasi berbeda dari USGS dengan pendekatan PGA (di lokasi penelitian yakni 0,3-0,4g). Adapun data beban gempa seperti yang disajikan pada Gambar 8.

Gambar 8. Spektrum gempa dengan PGA 0,355g (USGS).

Simulasi Lanjutan dan Pembahasan

Simulasi berdasarkan perubahan dimensi difokuskan pada total *displacement* yang terjadi serta nilai angka aman yang diberikan terhadap beban yang diterapkan pada kondisi struktur tanpa *bored pile* atau menggunakan *bored pile*. Hasil

simulasi disajikan bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 9 dan 10.

Gambar 9. Hubungan kenaikan total *displacement* dinding goa tiap tahapan pembebanan.

Gambar 10. Hubungan angka aman keruntuhan geser dinding goa pada tiap tahapan pembebanan.

Syarat angka aman minimum untuk fondasi yang harus dipenuhi menurut Wyllie (2005) adalah 2 sampai 3, sehingga direkomendasikan penggunaan *bored pile*. Berdasarkan tinjauan efisiensi ukuran fondasi dengan angka aman yang cukup, maka Model Geometri I (G1) lebih menguntungkan.

Pengaruh Fluktuasi Muka Air pada G1

Terdapat 3 variasi pengaturan muka air tanah yang ditinjau, yaitu muka air normal setinggi 0.92 meter, muka air banjir setinggi 1,92 meter dan muka air banjir maksimum (ekstrim) setinggi 17,72 meter. Hubungan kenaikan total *displacement* dan angka aman terhadap tahapan konstruksi dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12. Berdasarkan Gambar 11 dan 12 kenaikan muka air tidak akan mempengaruhi keruntuhan dinding goa.

Gambar 11. Hubungan total *displacement* terhadap fluktuasi muka air sungai.

Gambar 12. Hubungan angka aman terhadap fluktuasi muka air sungai.

Tegangan Prinsipal Dinding Goa

Tegangan prinsipal yang terjadi pada dinding goa untuk masing-masing kondisi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Tegangan prinsipal dinding goa

Tahapan Konstruksi	Tegangan prinsipal (10 ³ kN/ m)	
	Tanpa bored pile	Dengan bored pile
Eksisting Goa	-5,50	-
Struting awal	-5,50	-
Galian fondasi	-6,01	-
Galian alternatif	-6,01	-
Struting lanj. + shotcrete	-5,99	-
Kons. Fondasi + inst. mesin	-6,00	-
Kons. Bangunan	-6,04	-6,04
Vertikal dinamis	-6,04	-6,04
Horisontal dinamis	-5,97	-5,97
Gempa 173,5g	-6,02	-6,02
Gempa 335,4g	-6,26	-5,76

Penggunaan *bored pile* pada tahap pembebanan gempa 355,4g menghasilkan penurunan nilai tegangan disekitar dinding terowongan sebesar

0,50 kPa (7,99%). Hal ini disebabkan karena *bored pile* dapat melawan tegangan tanah di dasar dinding goa.

Kapasitas Dukung Tanah Dasar

Perkiraan daya dukung batuan berdasarkan sudut gesek internal, ϕ sebesar (30-40)°, UCS batuan intak sebesar 4000 kPa (Look, 2007). Menurut Day (2006), batuan sedimen dan foliasi mempunyai kapasitas dukung izin (q_{all}) sebesar 4000 psf (191,6 kPa). Berdasarkan nilai RQD sebesar 53, kapasitas dukung izin (q_{all}) adalah 6 Mpa = 6000 kPa (Geotechnical Engineering Office, 2006). Menurut Soetojo (2009), berdasarkan keruntuhan geser umum nilai $q_{all} = 884,446$ kPa. Digunakan q_{all} terkecil = 191,6 kPa.

Kapasitas dukung statis ditentukan oleh (Soetojo, 2009)

$$\frac{W_f}{W_m} > 5 \quad (4)$$

Dari data di atas, maka

$$\frac{435,12}{11,933} > 5 \Rightarrow 36 (> 5) \text{ sehingga Aman}$$

$$\sigma = \frac{W_{total}}{A} < 0,5q_{all} \quad (5)$$

$$\frac{520,79}{2,4 \times 3,5} > 95,8 \Rightarrow 62 (< 95,85) \text{ (Aman)}$$

Kapasitas dukung statis dan dinamis ditentukan oleh (Soetojo,2009)

$$\sigma \pm P_{dyn} < 0,75 q_{all} \quad (6)$$

dari data di atas,

$$62 \pm 6,326 < 0,75 q_{all}$$

Sehingga (68,326 < 143,7) kPa (Aman).

Kondisi Batas Dinamik

Kriteria getaran akibat amplitudo horisontal termasuk dalam kategori B, sedangkan kriteria getaran berdasarkan amplitudo vertikal dalam kategori hampir tidak dirasakan oleh manusia (menurut Irsyam, 2008). Sesuai KEP-49 / MENLH / 11 /1996, kondisi pengoperasian masuk dalam kategori tidak mengganggu. Nilai rasio frekuensi masing-masing mesin terhadap frekuensi sistem fondasi (β_{pump}) sebesar 1,978 dan (β_{PAT}) sebesar 1,398, maka resonansi tidak mungkin terjadi. Hal

ini berarti bahwa sistem fondasi memenuhi kriteria desain terhadap beban dinamis.

Penurunan Fondasi (*Angular Distortion*)

Permasalahan penurunan pada fondasi menjadi sangat penting apabila terdapat selisih penurunan antara dua titik fondasi yang berdekatan yang menyebabkan distorsi sudut. Potensi penurunan fondasi yang sangat berpengaruh dan sensitif terhadap pengoperasian mesin berada pada balok EF. Berdasarkan hasil simulasi numeris, distorsi sudut yang terjadi dari kondisi tahapan pembebanan dapat dilihat pada Gambar 13.

Gambar 13. Penurunan pelat fondasi EF

Hasil penjumlahan dari kondisi pembebanan di atas adalah 0,2159 cm. Distorsi sudut yang terjadi akibat kondisi pembebanan = 1/1112. Syarat penurunan maksimum fondasi menurut Day (2006) adalah sebesar 1/750, sehingga sistem fondasi mesin cukup aman terhadap penurunan yang tidak seragam.

Displacement Horizontal Fondasi dan Bangunan

Displacement horizontal sangat dipengaruhi oleh beban gempa 355,4g yang ditentukan berdasarkan perhitungan *story drift* dari deformasi struktur sesuai dengan Gambar 14. Hasil perhitungan rasio penyimpangan horizontal maksimum struktur terjadi pada dinding vertikal fondasi (0,379%). Berdasarkan nilai simpangan izin horizontal menurut SNI 03-1726-2010 yakni sebesar 1,54%, maka sistem fondasi cukup stabil terhadap displacement horizontal.

Stabilitas Internal Fondasi

Tampang fondasi direncanakan sedemikian rupa sehingga pelat mampu menahan gaya luar terutama momen lentur.

Gambar 14. Displacement horizontal fondasi dan bangunan akibat kondisi pembebanan.

Kekuatan Rock-Bolt

F terbesar pada beban gempa 355,4g adalah 479,153 kN.

$$F = F_{\max} \times \text{jarak antar rock bolt} \quad (9)$$

$$= 479,153 \times 2 (=958,306 \text{ kN})$$

$$Q_{ijin} = Q_r / SF \quad (10)$$

$$= 1039,321 \text{ kN}$$

Nilai ini masih lebih besar apabila dibandingkan dengan $F_{\max}$ yang terjadi (958,306 kN), sehingga rock bolt aman terhadap keruntuhan batuan. Kapasitas tarik yang terjadi adalah ($T_u = 3,18.10^{15}$ kPa) dan tegangan tarik ijin terjadi adalah ($T_i = 1,06.10^{15}$ kPa), sehingga rock bolt aman terhadap keruntuhan material rock bolt.

5. Kesimpulan dan Saran

Lokasi penelitian tergolong dalam kategori *fair rock* dengan metode perkuatan masuk ke dalam kelompok III, yaitu rock bolt panjang 4 m, jarak antar rock bolt 2 m dan shotcrete tebal 70 mm.

Software PLAXIS v.8.2 mampu memodelkan perilaku dinding goa dan struktur yang memikul beban dinamik mesin maupun gempa dengan cukup baik, walaupun harus dilakukan penyederhanaan model untuk menyesuaikan keterbatasan program.

Bored pile dengan dimensi 0,20 meter lebih menguntungkan dan memenuhi angka aman kriteria keruntuhan geser massa batuan dibandingkan dengan dimensi 0,25 meter dan 0,30 meter.

Simpangan horisontal maksimum konstruksi terjadi pada dinding vertikal fondasi (sebesar 0,379%). Berdasarkan simpangan izin horisontal menurut SNI 03-1726-2010 yang sebesar 1,54%, sehingga konstruksi sesuai Model Geometri I cukup aman dan stabil terhadap beban statik maupun dinamik serta aman terhadap keruntuhan dinding batuan.

Dari penelitian ini, dapat diberikan beberapa saran untuk kelanjutan penelitian maupun pelaksanaan konstruksi di lapangan, yang berupa diperlukan data yang lebih lengkap untuk perencanaan, diperlukan penelitian lebih lanjut dengan memperhitungkan faktor diskontinuitas batuan pada pemodelan numeris dan diperlukan untuk dikembangkan penelitian dengan menggunakan pemodelan 3 dimensi untuk memperoleh *displacement* dan gaya dalam struktur fondasi yang lebih mendekati kenyataan.

Daftar Pustaka

- Apriyono, A., 2009, *Analisis Stabilitas Terowongan Tinjauan Terhadap Pengaruh Variasi Beban Gempa Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Tesis S-2 Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Asroni, A., 2010, *Kolom Fondasi & Balok T Beton Bertulang*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Arya, S.C., O'Neill, M.W. and Pincus, G., 1979, *Design of Structures and Foundation for Vibrating Machines*, Gulf Publishing Company Book Division, Houston, London, Paris, Tokyo.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley and Sons. New York.
- Brinkgrave, R.J.B., 2002, *Reference Manual V.8*, Manual Plaxis, A.A Balkema.
- Das, Braja M., 1993, *Principle of Soil Dynamics*, PWS-KENT Publishing Company, Boston.
- Day, R.W., 2006, *Foundation Engineering Handbook*, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Handoko, L., 2008, *Analisis Numeris Bendung Sungai Bawah Tanah pada Batuan Karst dalam Tinjauan Geoteknik*, Skripsi S-1, Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., 2010, *Analisis dan Perancangan Fondasi*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Hoek, E., 2002, *Hoek-Brown Failure Criterion, Program "RocLab"*, <http://www.rockscience.com>. 27 Maret 2013.
- Irsyam, M., Sahadewa, A. dan Darjanto, H., 2008, *Dinamika Tanah dan Fondasi Mesin*, ITB, Bandung.
- Look, B.G., 2007, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Table*, Taylor & Francis Group, London, United Kingdom.
- Menteri Negara Lingkungan Hidup, 1996, *Baku Tingkat Getaran Menteri Negara Lingkungan Hidup*, Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor: KEP-49/MENLH/11/1996, Tanggal 25 November 1996.
- Priyosulistiyono, H., 2010, *Struktur Beton Bertulang I*, Biro Penerbit, Yogyakarta.
- Rifa'i, A., 2011, *Survey dan Uji Laboratorium Mekanika Tanah Pengembangan Sungai Bawah Tanah Seropan Tahap I di Kabupaten Gunung Kidul*, Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Laboratorium Mekanika Tanah, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- SNI 03-1726-2010, 2010, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Departemen Pekerjaan Umum.
- Soetojo, M., 2009, *Teknik Pondasi pada Lapisan Batuan*, ITS Press, Surabaya.
- Suhendro, B., 2000a, *Analisis dinamik struktur*, Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wyllie, D.C. and Mah, C.W., 2005, *Rock Slope Engineering*, Spon Press Taylor & Francis Group, London and New York.