

PENGARUH TEKANAN ANGKAT TERHADAP KEAMANAN BENDUNGAN BETON GRAVITY

Djoko Mudjihardjo

Pusat Litbang Sumber Daya Air, Jl. Ir. H. Juanda 193, Bandung
E-mail: d_mudjihardjo99@yahoo.com

Diterima: 6 Januari 2010; Disetujui: 21 April 2010

ABSTRAK

Tidak terkontrol dan tingginya tekanan angkat yang bekerja pada fondasi bendungan beton graviti, dalam hal ini adalah Bendungan PLTA Garung, Wonosobo, Jawa Tengah yang selesai dibangun pada tahun 1980, mengakibatkan turunnya faktor keamanan stabilitas bendungan, sehingga muka air waduk tidak pernah dinaikkan pada level muka air normal. Berdasarkan hasil penyelidikan geoteknik sebelum bendungan dibangun, lapisan fondasi bendungan didominasi oleh breksi vulkanik yang porous mempunyai koefisien kelulusan air pada orde antara 10^{-4} - 10^{-2} cm/s. Perbaikan fondasi telah dilakukan dengan gouting tirai untuk mengurangi rembesan, disamping membuat fondasi dari blok beton yang cukup tebal untuk melawan tingginya tekanan angkat tersebut. Untuk memantau tekanan angkat tersebut, telah ditanam satu deret pisometer hidraulik pada lapisan fondasi tersebut. Berdasarkan hasil pembacaan pisometer-pisometer sebelum mengalami kerusakan pada tahun 1998, tekanan angkat yang bekerja di bawah fondasi ternyata lebih tinggi dari tekanan angkat yang digunakan dalam perhitungan desain, pada hal kondisi muka air waduk masih 3 m di bawah elevasi muka air normal. Rembesan yang melalui samping tumpuan (side seepage) dan kurang berfungsinya grouting tirai diperkirakan menjadi penyebab tingginya tekanan angkat tersebut. Dengan mempertimbangkan aspek keamanannya, maka bendungan Garung tersebut tidak pernah dioperasikan sampai elevasi muka air normal yang mengakibatkan produk tenaga listrik kurang optimal. Pelajaran yang dapat ditarik dari kasus bendungan Garung ini adalah tipe dan metoda perbaikan fondasi dari suatu bendungan harus mempertimbangkan ketersediaan material timbunan dan geologi fondasinya. Grouting tirai bukan satu-satunya metoda perbaikan fondasi yang sesuai, bila lapisan fondasinya sangat porous.

Kata kunci: Breksi vulkanik, porous, pisometer, tekanan angkat, rembesan.

ABSTRACT

Excessive uplift pressure acting on the foundation of a concrete gravity dam and uncontrolled condition of Garung (Power Plant) gravity dam, located at Wonosobo, Central Java province, operated since 1980, affected its stability in such way that the reservoir was operated below the normal water level. The geotechnical investigation carried out before construction indicated that the foundation of the dam is dominated by porous volcanic breccia with permeability coefficient of the order of 10^{-4} to 10^{-2} cm/s. The foundation was treated by curtain grouting to reduce seepage and concrete blocks to reduce high uplift pressures. In order to monitor the uplift pressures, a number of hydraulic piezometers were installed in the foundation of dam. The data read before the 1998 damage, showed that uplift pressures were higher than the design values, whereas actually reservoir elevation showed an elevation of 1.196 m or 3 m below the normal elevation. Side seepage from both abutments and low effectiveness of grouting may have been the cause of these high uplift pressures. The case of Garung Dam indicated that consideration is to be given to the availability of materials and geological condition of foundation. Curtain grouting is not always satisfying for very porous foundation layers.

Keywords: Volcanic breccia, porous, piezometer, uplift pressures, seepage .

PENDAHULUAN

Bendungan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Garung yang juga disebut sebagai Bendungan Menjer merupakan bendungan tipe beton graviti (gravity concrete dam) yang mempunyai manfaat serba guna (multi-purpose dam) dengan fungsi utama sebagai PLTA. Bendungan Garung tersebut mempunyai luas daerah tangkapan hujan sebesar 2,43 dengan debit air rata-rata yang masuk ke Bendungan Menjer sebesar $2,66 \text{ m}^3/\text{s}$.

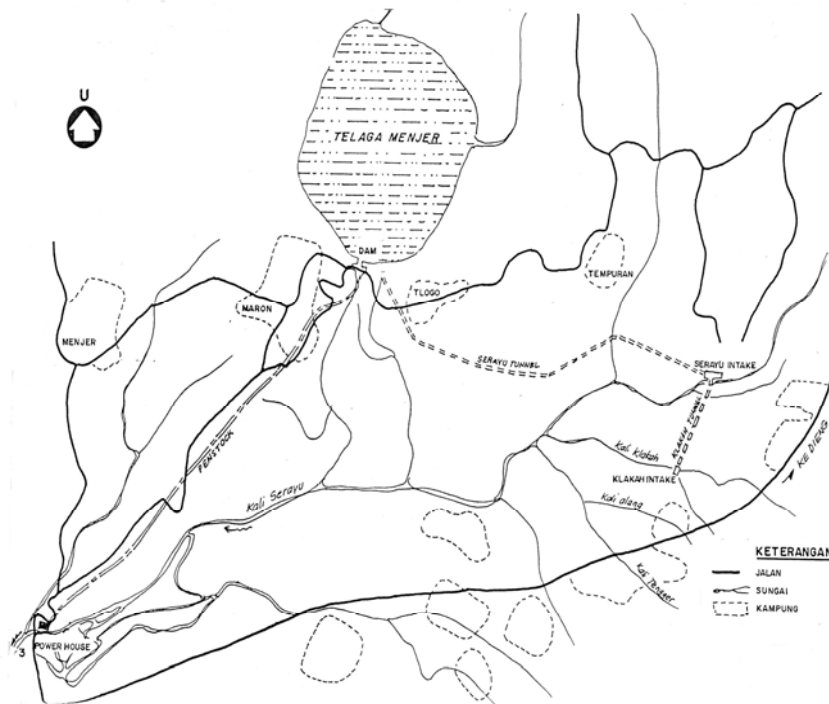
Waduk Menjer tersebut memiliki luas genangan 0,67 dengan elevasi muka air normal +1.199,00 m, elevasi muka air terendah +1.174,00 m dan volume tampungan 27.000.000 . Secara keseluruhan Bendungan Garung ini mampu menghasilkan tenaga listrik rata-rata 42.000,00 MWH per tahun.

Air waduk yang dimanfaatkan untuk PLTA berasal dari telaga Menjer dengan cara membuat bendung di bagian hilirnya, namun curah hujan yang jatuh di daerah tangkapan air yang kemudian ditampung di dalam telaga Menjer ternyata tidak cukup, sehingga perlu ditambah air Sungai Serayu dan Sungai Klakah. Dari Bendung Klakah, air dialirkan ke Bendung Serayu yang selanjutnya dialirkan ke telaga Menjer melalui terowongan Serayu-Menjer. Pekerjaan pembuatan Bendung Klakah, terowongan Serayu-Menjer dan bangunan pengendap dilaksanakan sejak 1969 sampai 1973.

Bangunan utama dimulai pengerjaannya pada tahun 1978 meliputi pembangunan bendungan Garung/Menjer, bendung pengatur Wanganaji (afterbay weir) disamping menyempurnakan pembangunan Bendung Klakah, bangunan pengendap Serayu dan terowongan Serayu-Menjer. Pelaksanaan pembangunan Bendungan Garung tersebut selesai pada awal tahun 1980-an.

Sejak awal, Bendungan Garung ini tidak pernah dioperasikan secara maksimal, yakni level muka air waduk tidak pernah dinaikkan sampai elevasi normal +1.199,0 m dan dijaga hanya sampai pada elevasi +1.196,0 m, karena kekhawatiran terhadap keamanan bendungannya. Untuk memantau perilaku Bendungan Garung, telah dipasang sejumlah instrumen, yakni alat pengukur tekanan ke atas (uplift pressure), alat pengukur muka air tanah dan alat pengukur rembesan. Untuk mengetahui kondisi keamanan bendungan, maka dilakukan penelitian terhadap perilaku tekanan angkat yang bekerja pada fondasi bendungan yang mempengaruhi stabilitas bendungan tersebut.

Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan kajian dan evaluasi terhadap data pengukuran instrumen serta meneliti pengaruhnya terhadap keamanan bendungan, terutama besaran tekanan angkat dan rembesan yang dapat membahayakan keamanan



Gambar 1 Lokasi bendungan beton graviti Garung (Sumber PT. Kwarsa Hexagon, 2007)

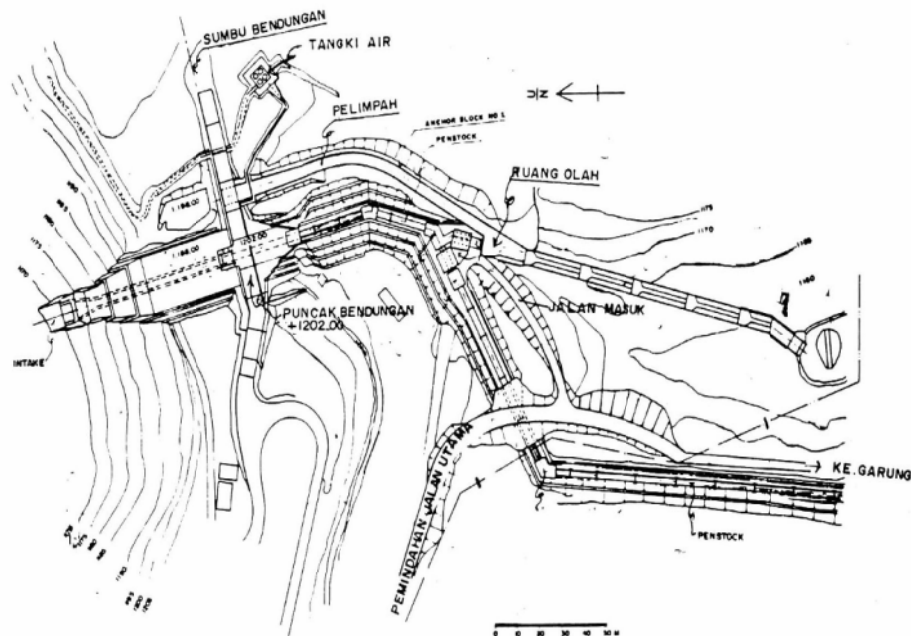
bendungan. Sedangkan sasarannya adalah menjamin tersedianya informasi mengenai kondisi terkini bendungan terhadap pengaruh dari tekanan angkat.

Lokasi penelitian adalah di Bendungan Garung yang terletak di Desa Maron, Kecamatan Garung, Kabupaten Wonosobo, Jawa Tengah, kurang lebih 8,0 km dari Kota Wonosobo ke arah dataran tinggi Dieng, Jawa Tengah, seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Tata letak bendungan dapat dilihat pada Gambar 2 dan potongan melintang bendungan pada Gambar 3. Sedangkan data teknik bendungan Garung dapat dilihat pada Tabel 1.

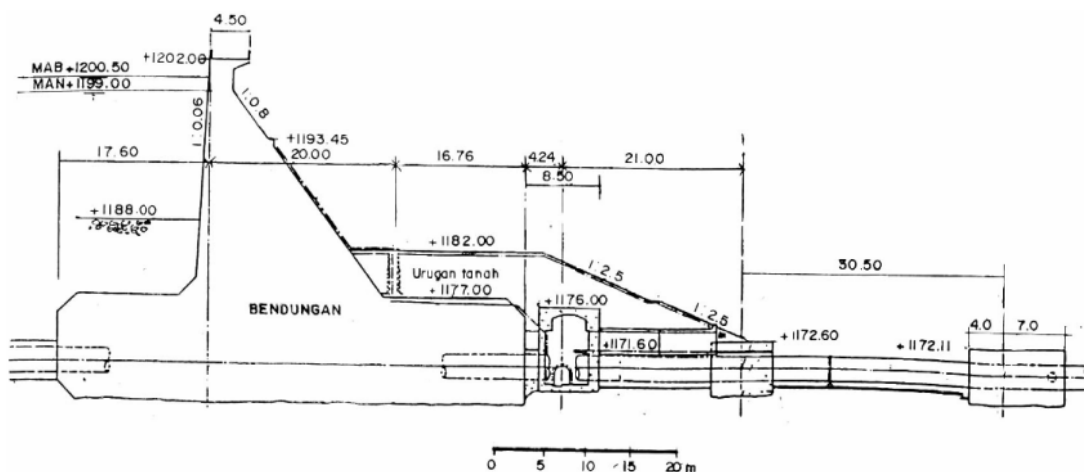
METODOLOGI

Metodologi penelitian yang digunakan adalah dengan cara melakukan pembacaan dan pengukuran instrumen, terutama instrumen pengukur besarnya tekanan angkat (uplift pressure) dan rembesan serta membuat grafik-grafik (plotting) hasil pembacaan guna melakukan kajian terhadap perilaku bendungan.

Data parameter tanah, kondisi lapisan fondasi dan parameter tanah, sebagai data sekunder, diperoleh dari hasil penyelidikan geoteknik saat tahap desain. Berdasarkan hasil kajian dan penelitian terhadap data primer dan data sekunder tersebut, kemudian dilakukan analisis dan kajian terhadap keamanan bendungannya.



Gambar 2 Tata letak bendungan beton graviti Garung (Sumber : PT. Indonesia Power, 2007)



Gambar 3 Penampang melintang bendungan beton graviti Garung (Sumber : PT. Indonesia Power, 2007)

Tabel 1 Data Teknis Bendungan Garung

ITEM	KETERANGAN	
HIDROLOGI		
- Luas Daerah Aliran Sungai	2,43	km ²
- Curah hujan tahunan rata-rata	3.800,00	mm
- Curah hujan harian maksimum (PMP)	800,00	mm
- Debit banjir rencana (Q100)	33,00	m ³ /s
- Elevasi Muka Air Normal (MAN)	+1.199,00	m
- Elevasi Muka Air Banjir (MAB)	+1.200,50	m
- Elevasi Muka Air Terendah (MAT)	+1.174,00	m
- Volume waduk pada Muka Air Normal	27,00 juta	m ³
- Volume waduk pada Muka Air Terendah	12,10 juta	m ³
- Luas waduk pada Muka Air Normal	67,00	Ha
TUBUH BENDUNGAN		
- Jenis	Beton graviti	
- Jenis pondasi	Lanau Pasiran	
- Tinggi dari pondasi	36,00	m
- Tinggi dari dasar sungai	34,00	m
- Panjang puncak	98,00	m
- Elevasi puncak	+1.202,00	m
- Volume timbunan	14.760,00	m ³
- Lebar puncak	4,50	m
- Kemiringan lereng hulu	1V : 0,06H	
- Kemiringan lereng hilir	1V : 0,80	
INSTRUMENTASI BENDUNGAN		
- Alat ukur rembesan (drain wells)	14	buah
- Alat ukur tekanan angkat (hydraulic piezometer)	4	unit
- Alat pengukur muka air tanah (Observation wells)	15	buah
- Alat pengukur curah hujan	2	buah
BANGUNAN PENGENDALI BANJIR		
- Jenis pelimpah	Ambang lebar (Weir)	
- Lebar pelimpah	6,00	m
- Panjang saluran luncur	128,00	m
- Elevasi mercu pelimpah	+1.199,00	m
- Kapasitas pelimpah	16,00	m ³ /s
BANGUNAN PENGELUARAN/ PELEPASAN		
- Jumlah	1	buah
- Kapasitas	13,00	m ³ /det
BANGUNAN PENGAMBILAN		
- Jenis bangunan pembawa	Saluran terbuka	
- Jumlah bangunan pembawa	1	buah
- Jenis tangki pendatar	No Surge-tank	
- Jenis pipa pesat	Pipa baja	
- Jumlah pipa pesat	1	buah
- Jenis guard valve	Butterfly	
- Diameter guard valve	2,60	m
- Jenis kontrol valve	Hollow Jet	
- Diameter kontrol valve	1,00	m

(Sumber : PT Indonesia Power, 2007)

KONDISI GEOLOGI

Geologi Regional

Bendungan PLTA Garung terletak di bagian paling hulu dari S. Serayu yang mengalir mulai dari Dataran Tinggi Dieng ke arah barat dan bermuara di Lautan Hindia di sebelah timur

Cilacap. Dataran Tinggi Dieng yang selanjutnya disebut Komplek Gunungapi Dieng-Batur yang berumur kuartar akhir, terdiri dari kerucut gunungapi, kawah dan fumarole dengan ketinggian mencapai +2.000,00 meter dari permukaan laut.

Danau Menjer merupakan danau kawah besar yang terbentuk dari aktivitas terakhir dari masa Holosen, yang berada di lereng tenggara G. Seroja (+2.275,0 m) yang merupakan gugusan paling selatan dari kompleks gunungapi tersebut.

Sungai Serayu mengalir ke arah lereng timur dan lereng selatan dari kompleks gunungapi ini dan sebagian mengalir ke arah lereng barat laut G. Sindoro. Aliran air sungai ke arah barat daya sangat dekat dengan Telaga Menjer, sedangkan yang mengalir ke arah barat setelah kota Wonosobo, memotong lereng gunungapi dengan membentuk alur yang dalam yang mengalir di sekitar lokasi Bendungan Garung.

Geologi daerah Bendungan Garung tersusun oleh lapisan batuan dengan urutan dari atas ke bawah, sebagai berikut:

- 1) Endapan Permukaan berupa endapan talus, endapan teras dan endapan sungai.
- 2) Lapisan Tuf Atas (Loam) berupa abu gunungapi, terdiri dari pasir dan lapili yang berasal dari aktivitas akhir dari G. Seroja dan G. Sindoro.
- 3) Breksi Gunungapi dan Tuf Lapili berupa breksi gunungapi yang tersusun oleh massa dasar pasir, lanau-lempungan dengan fragmen andesit. Endapan ini mempunyai tingkat sementasi lemah-moderat (lapisan Vb2, Vb1 dan Vb0 di lokasi bendungan serta Vb2 dan Vb di power station).
- 4) Tuf Lapili berupa abu gunungapi dan pasir, sebagian lanau dan lempungan, kadang-kadang berselingan dengan breksi gunungapi dan beberapa lapisan tuf.
- 5) Lava Andesite; berupa hasil erupsi dari aktivitas vulkanik masa lalu. Kadang-kadang berselingan dengan breksi gunungapi dan beberapa lapisan tuf dan sebagian telah menjadi breksi. Semua lapisan tersebut, kecuali lava andesit, adalah endapan dengan tingkat sementasi lemah sampai moderat.

Air artesis ditemukan pada lapisan tuf lapili, lava andesit dan sebagian breksi gunungapi. Sebagian besar dari breksi gunungapi secara komparatif kurang lolos air, yang berfungsi sebagai lapisan penahan. Di lokasi ini tidak ditemukan adanya struktur sesar yang berarti.

Geologi Bendungan

Fondasi bendungan tersusun oleh breksi gunungapi, tuf lapili, lava andesit dan endapan permukaan. Breksi gunungapi dipisahkan menjadi tiga lapisan sebagai berikut :

- 1) Vb0, adalah lapisan paling bawah dan berselingan dengan tuf lapili dan lava andesit, tersemen moderat, yang tersusun oleh lanau pasir, fragmen batuan andesit dan bongkah.
- 2) Vb1, menindih lapisan tuf lapili dan tersusun oleh lanau pasir, pasir, scoria, fragmen batuan andesit dan bongkah dengan tingkat sementasi lemah - moderat.
- 3) Vb2 adalah lapisan teratas dari breksi gunungapi dan tersusun oleh pasir lanau-lempungan, fragmen batuan andesit dan bongkah batu yang merupakan deposit dengan tingkat sementasi moderat.

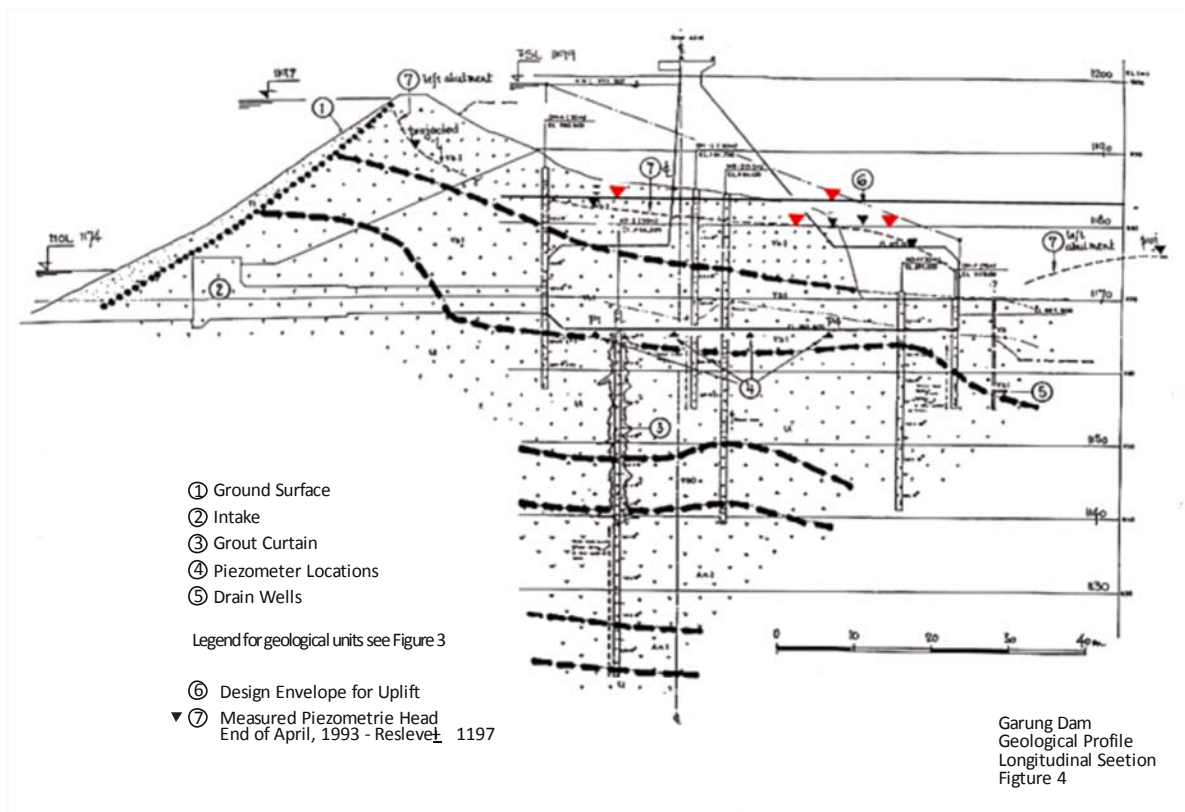
Lapisan tuf lapili (Lt) adalah deposit dengan tingkat sementasi lemah dan bersifat lepas yang tersusun oleh perselingan lapisan pasir, lempung pasir dan scoria. Lava andesit (An1 dan An2) tersebar di bawah lapisan tufa Lapili (Lt) dan breksi gunungapi (Vb0) dan kedalamannya sekitar 25 m dari dasar bendungan. Lava andesit umumnya berupa batuan keras dan segar.

Koefisien permeabilitas dari breksi gunungapi (Vb0 dan bagian bawah Vb1), tuf lapili (Lt) dan lava andesit (An1 dan An2) sebagian besar pada orde 10^{-4} sampai dengan 10^{-2} cm/s, dengan rata-rata pada orde 10^{-3} cm/s. Lapisan-lapisan tersebut mempunyai tingkat kelulusan air yang relatif tinggi.

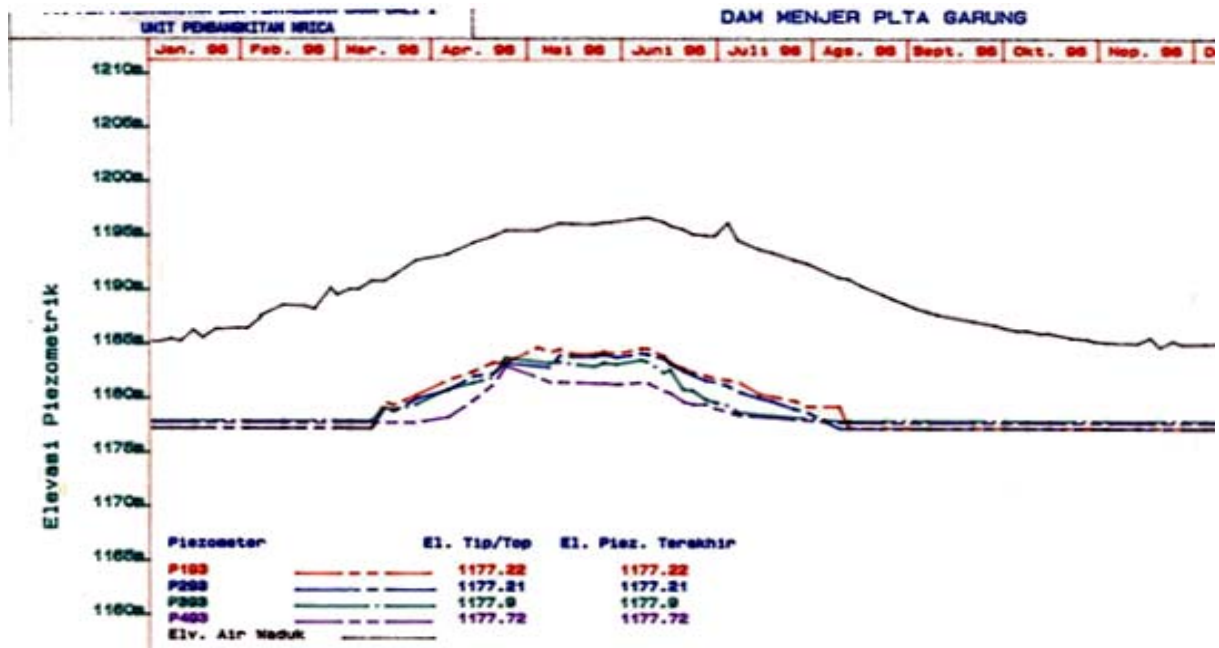
Tabel 2 Koefisien permeabilitas fondasi bendungan

Fondasi		Koefisien permeabilitas (cm/s)
Deposit Talus	(Tl)	Impervious, kecuali lapisan Scoria dan Loam
Loam	(Lm)	
Breksi Gunungapi	Vb2	Umumnya pada orde 10^{-5} sampai 10^{-4} , rata-rata 10^{-3}
	Vb1	Bagian Atas, pada orde 10^{-5} sampai 10^{-4} Bagian bawah, pada orde 10^{-4} sampai 10^{-3} Sebagian 10^{-2}
Tufa Lapili	(Lt)	Umumnya pada orde 10^{-4} sampai 10^{-3}
Breksi Gunungapi	(Vb0)	Sebagian 10^{-2}
Andesit	(An2)	Umumnya pada orde 10^{-3}
	(An1)	

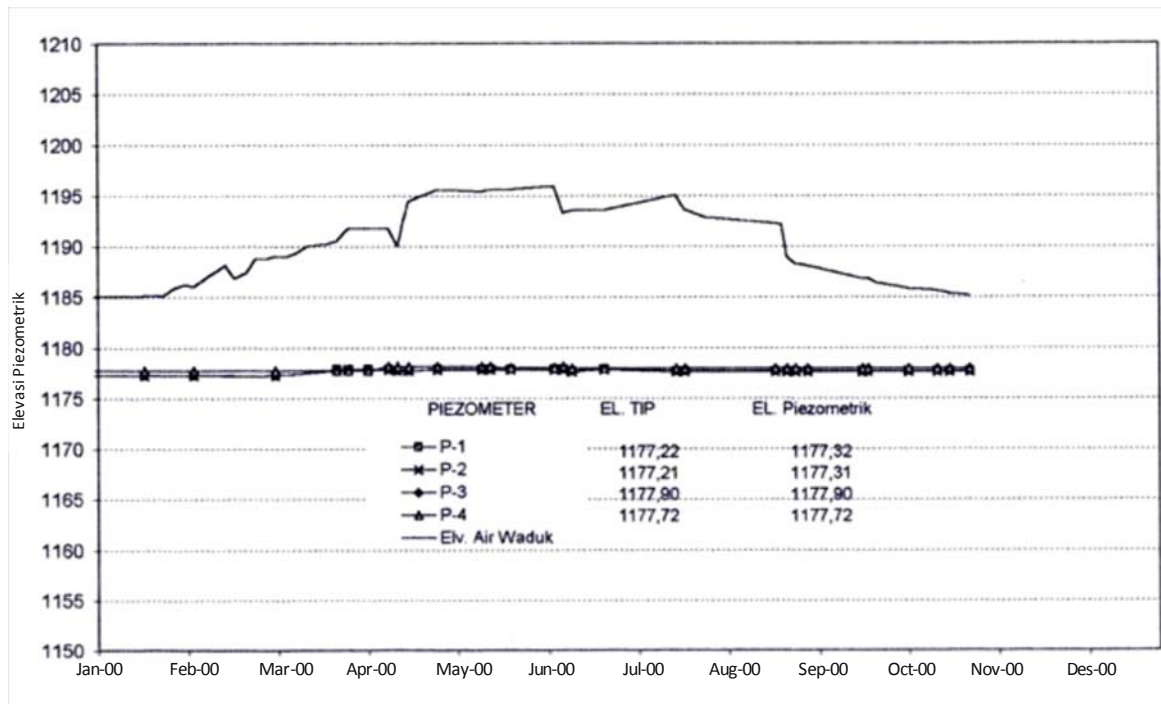
(Sumber : PT.Kwarsa Hexagon, 2007)



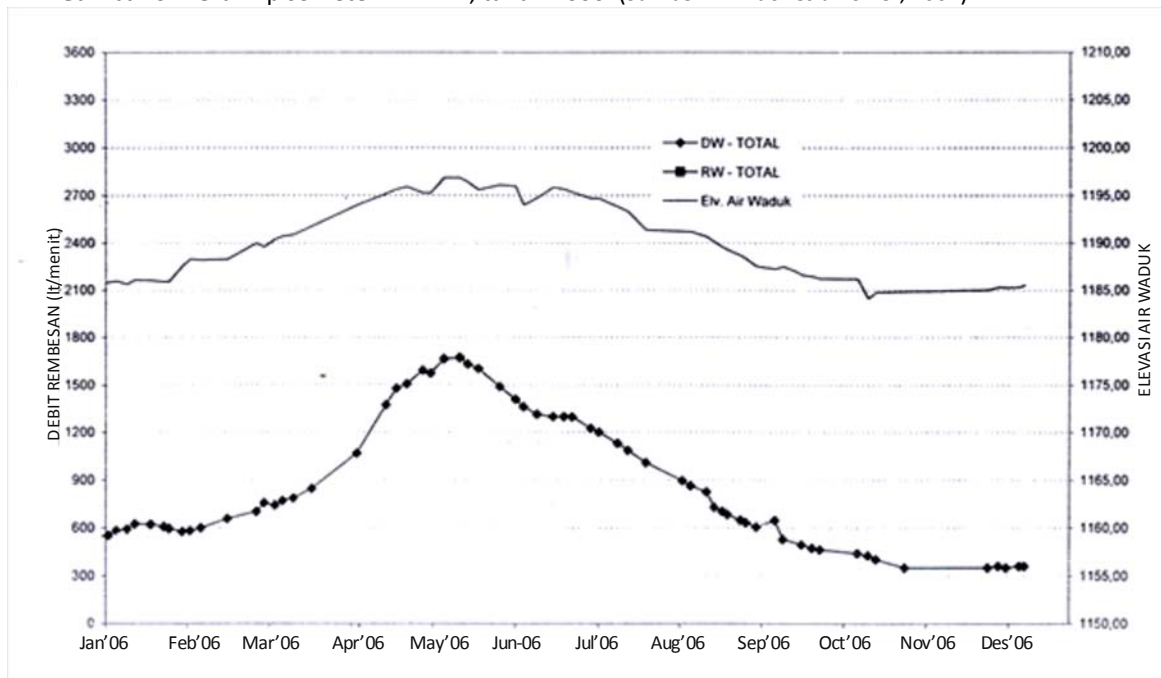
Gambar 4 Penampang melintang geologi dan lokasi pisometer di fondasi Bendungan Garung (Sumber : PT.Indonesia Power, 2007)



Gambar 5 Grafik pembacaan pisometer P 1 – P 4, tahun 1998 (Sumber PT.Indonesia Power, 2007)



Gambar 6 Grafik pisometer P1 – P 4, tahun 2000 (Sumber PT.Indonesia Power, 2007)



Gambar 7 Debit Rembesan Periode Januari – Desember 2006 (Sumber PT.Indonesia Power, 2007)

Tabel 3 Elevasi pisometer dan nilai jagaannya

Pisometer No	Nilai Jagaan (m)	El. Piso Tip (m)	El. Pisometrik (m)	3Muka Air Waduk (m)
P1	+1.185,0	+1.177,22	+1.183	- (Jan–Febr) dan (Okt–Des) +1.186,0 m.
P2	+1.184,0	+1.177,21	+1.182	- April–Agust) +1.192,50m.
P3	+1.182,0	+1.177,90	+1.182	- RWL tertinggi terjadi bulan April '05 –Jan '06, yakni +1.196,0m.
P4	+1.180,0	+1.177,72	+1.181	

(Sumber: PT Indonesia Power, 2007)

Koefisien permeabilitas (k) dari Vb2 dan bagian atas Vb1 adalah pada orde 10^{-5} sampai dengan 10^{-4} cm/s, bersifat semi kedap sampai dengan cukup kedap yang berfungsi sebagai lapisan penahan dari tekanan artesis. Karena tekanan artesis dapat mempengaruhi tingginya tekanan angkat, maka diperlukan upaya untuk meningkatkan faktor keamanan stabilitas bendungan. Koefisien permeabilitas fondasi bendungan tersebut disajikan pada Tabel 2.

Untuk mengurangi pengaruh tekanan angkat, telah dilakukan perbaikan fondasi dengan grouting tirai yang dilaksanakan pada sumbu bendungan menggunakan pola tiga baris dengan interval 1,0 m dan spasi 0,50 m (cukup rapat). Kedalaman lubang bervariasi mulai dari 5,00 m sampai 45,00 m dari dasar fondasi.

Efektifitas grouting ditentukan dengan pengujian air bertekanan yang dilakukan pada check hole setelah grouting selesai dilaksanakan. Hasilnya menunjukkan, bahwa setelah dilakukan grouting, sebagian besar hasil pengujian Lugeon (Lugeon test) menunjukkan nilai yang masih lebih kecil dari 50 Lu. Berarti koefisien permeabilitas (k) lapisan fondasi yang digrouting masih pada orde 10^{-5} sampai 10^{-4} cm/s. Tetapi nilai k pada bagian bawah lapisan Vb1 (breksi gunungapi) dan Lt (tuf lapili) rata-rata masih pada orde 10^{-3} cm/s.

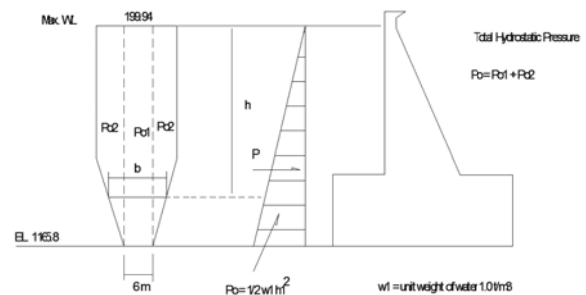
Penyerapan grouting (grout takes) pada Vb2 (breksi gunungapi) dan bagian tengah sampai lapisan atas Vb1 umumnya kurang dari 50 kg/5m atau 10 kg/m, tetapi pada beberapa bagian di bagian bawah lapisan Vb1 dan Lt, penyerapannya lebih dari 50 kg/m.

Disamping grouting tirai juga dilakukan grouting konsolidasi yang hasilnya menunjukkan bahwa nilai Lugeon setelah digrouting berkisar antara 10 - 50 Lu (sebelum grouting nilai Lugeon lebih dari 100 Lu). Pada umumnya, penyerapan grouting (grout takes) mendekati 100 kg/m.

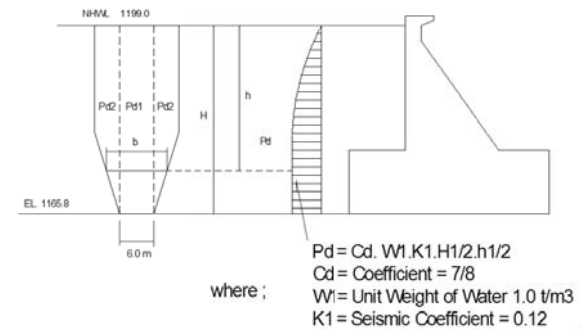
INSTRUMENTASI

Untuk mengetahui tekanan pisometer atau tekanan angkat yang bekerja pada fondasi bendungan, telah dipasang 4 pisometer tipe hidraulis, yakni P-1, P-2, P-3 dan P-4 (Gambar 4).

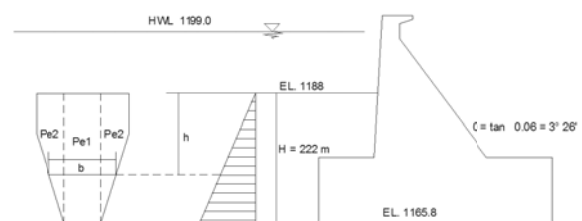
Hasil pengukuran selama periode tahun 1998 sampai dengan tahun 2006 menunjukkan bahwa pada tahun 1998 semua pisometer masih merespons kenaikan muka air waduk, namun pada tahun 2000 sampai saat ini telah mengalami gangguan (Gambar 5 dan 6). Elevasi mata pisometer dan nilai yang aman (jagaan) dapat dilihat pada Tabel 3.



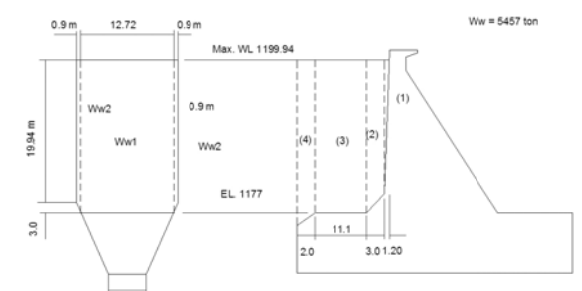
Gambar 8 Tekanan hidrostatik



Gambar 9 Tekanan hidrodinamik



Gambar 10 Diagram tekanan tanah



Gambar 11 Berat air di hulu

PEMBAHASAN

Untuk memperoleh manfaat yang optimal sebagai pembangkit tenaga listrik, air waduk Garung seharusnya dioperasikan sampai dengan elevasi normal +1.199,0 m. Namun, berdasarkan hasil pengukuran pisometer P.1, P.2, P.3 dan P.4, yang dipasang di bawah fondasi bendungan, pada saat muka air waduk baru mencapai elevasi +1.196,0 m atau masih 3 m di bawah elevasi

muka air normal, nilai tekanan angkat (uplift pressure) ternyata hampir mendekati batas nilai yang diijinkan (Gambar 5).

Berdasarkan hasil pengukuran pisometer P.1, P.2, P.3 dan P.4 tersebut, telah dilakukan simulasi tekanan angkat pada kondisi muka air waduk pada elevasi +1.1196 m yang selanjutnya dinaikkan ke elevasi +1.199 m.

Gaya-gaya yang bekerja pada bendungan beton graviti, adalah sebagai berikut :

- 1) Berat sendiri bendungan
- 2) Gaya-gaya luar, yakni :
 - a) Tekanan hidrostatik
 - b) Tekanan hidrodinamik
 - c) Berat air di bagian hulu
 - d) Berat tanah urugan hulu
 - e) Berat urugan hilir
 - f) Gaya seismik
 - g) Tekanan angkat
- 3) Gaya-gaya resultan

Perhitungan stabilitas dilakukan pada kondisi pembebanan luar biasa pada elevasi muka air waduk normal dengan gempa dasar operasi (OBE) dan kondisi pembebanan ekstrim pada elevasi muka air waduk normal dengan gempa maksimum boleh jadi (maximum credible earthquake, MCE).

Berdasarkan hasil pengukuran tekanan pisometer pada saat muka air waduk mencapai elevasi +1.196,0 m, hasilnya menunjukkan bahwa tekanan angkat telah mendekati tekanan angkat desain pada kondisi air waduk +1.199,0 m. Untuk mengetahui rembesan yang mengalir di bawah fondasi bendungan tersebut, telah dilakukan analisis flownet yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 12.

Dari hasil analisis flownet tersebut, debit rembesan yang keluar dari bendungan pada

kondisi eleasi air waduk +1.196 m adalah sebesar $7,493 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ atau sebesar 0,075 l/s/m. Bila panjang basah bendungan adalah 75 m, debit rembesan adalah 5,625 l/s. Sedangkan hasil pengukuran rembesan di relief well yang ada di bagian hilir pada kondisi muka air waduk +1.196,0 m adalah sekitar 26,6 l/s.

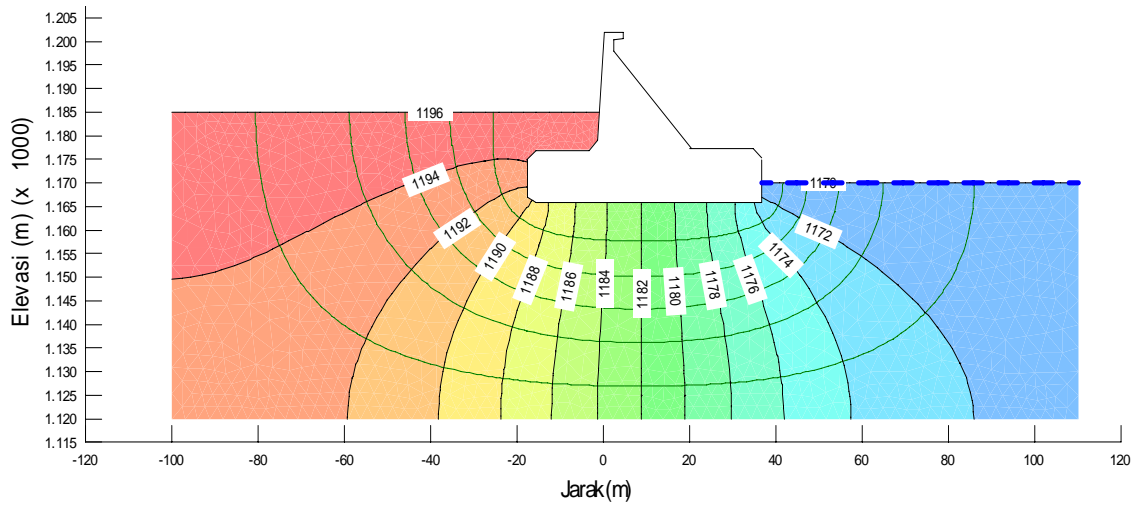
Adanya perbedaan antara debit rembesan teori dengan aktual, karena rembesan dihitung dari yang keluar melalui fondasi saja, sedangkan rembesan aktual, disamping melalui fondasi, rembesan diperkirakan juga melalui kedua tumpuan bendungan, disamping adanya beberapa mata air artesis yang keluar saat konstruksi. Besarnya rembesan yang cukup besar (lebih besar dari rembesan hasil analisis) menunjukkan bahwa grouting tirai kurang efektif (tidak berhasil).

Upaya untuk mengoptimalkan fungsi bendungan yang berarti juga mengoperasikan air waduk sampai elevasi normal +1.199,0 m dapat dilakukan dengan cara memperkecil tekanan angkat dan mengurangi besarnya rembesan, antara lain dengan memperpanjang fondasi blok beton yang ada atau membuat dinding halang kedap air di bagian hulu fondasi bendungan.

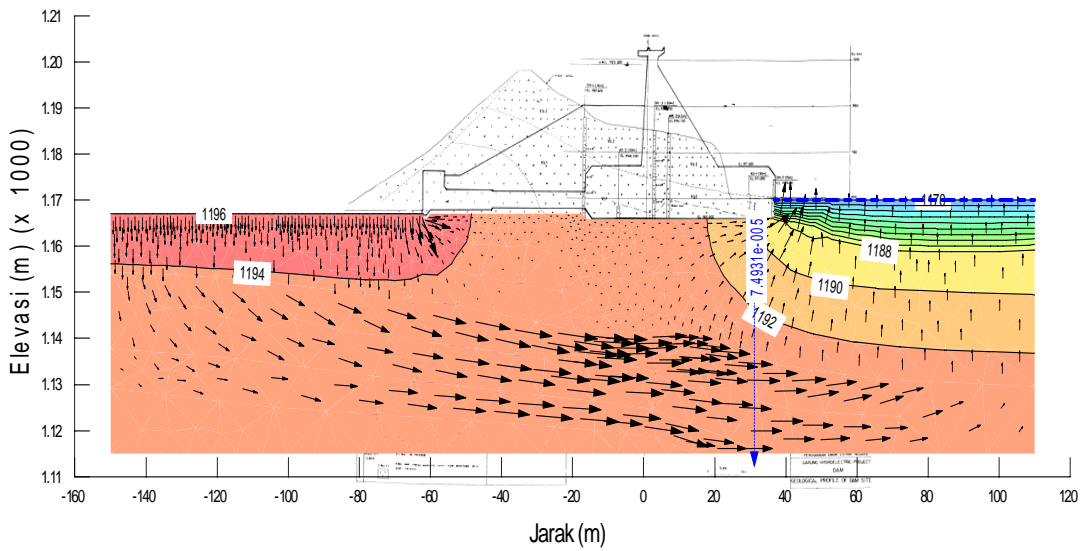
Hasil analisis flownet dengan menambah konstruksi dinding halang (diafragm wall) yang dipasang vertikal di bagian hulu bendungan sampai kedalaman 25 m dari dasar fondasi atau sampai pada elevasi +1.142,0 m dapat mengurangi tingginya tekanan angkat pada kondisi muka air normal +1.199,0 m (Gambar 14). Dari garis ekipotensial dari flownet tersebut tekanan angkat pada setiap titik pisometer dapat dilihat seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Tekanan angkat pada elevasi muka air waduk yang berbeda

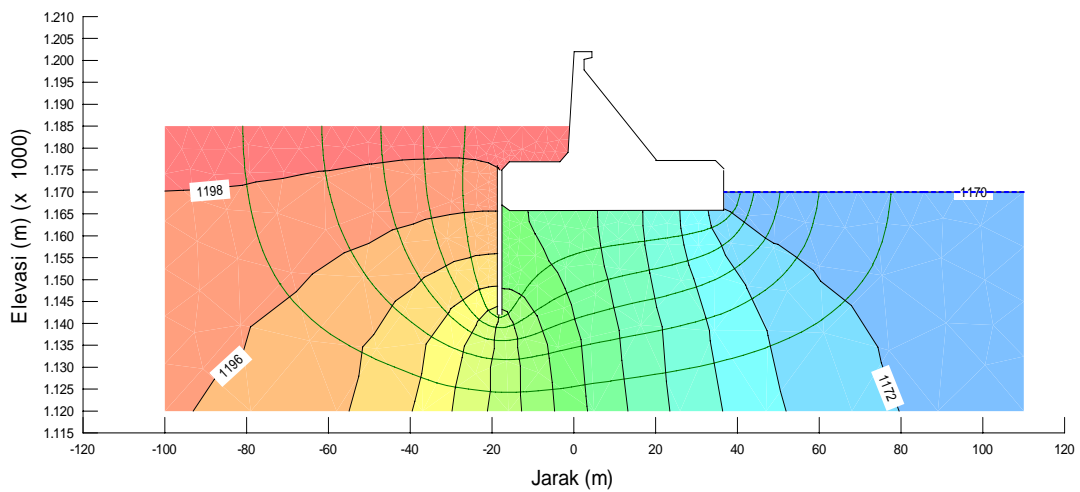
Piso-meter	Elevasi Tinggi Tekanan Angkat (m)			
	Diukur dari pisometer MAW +1.196,0 m	Hasil Analisis Flownet		
		MAW +1.196,0 m (Tanpa dinding halang)	MAW +1.199,0 m	
			Tanpa dinding halang	Dengan dinding halang
P.1	+1.183	+1.192	+1.195	+1.185
P.2	+1.182	+1.188	+1.191	+1.183
P.3	+1.182	+1.182	+1.185	+1.181
P.4	+1.181	+1.179	+1.182	+1.179



Gambar 12 Analisis *Flownet*, muka air waduk pada elevasi +1.196 m



Gambar 13 Analisis *Total head*, muka air waduk pada elevasi +1.196 m



Gambar 14 Analisis *Flownet*, MAW +1.199 m, dengan dinding halang

Tabel 5 Hasil analisis stabilitas bendungan

Kondisi MAW +1.199,0 m	FK _{guling}	FK _{geser}	Eksentrisitas (e) (m)
Tanpa dinding halang	1,83 (1,68)*	1,33 (1,07)*	2,81 (4,55)*
Dengandinding halang	2,42 (2,19)*	1,56 (1,27)*	2,35 (1,06)*

Catatan : Dihitung pada kondisi luar biasa dengan gempa dasar (OBE) dan (...) * beban ekstrim dengan gempa terbesar (MCE).

Tabel 6 Persyaratan FK minimum

Kondisi beban	Lokasi resultan pada dasar pondasi	FK geser minimum
Biasa	Pertengahan 1/3	2,0
Luar biasa	Pertengahan 1/3	1,7
Ekstrim	Di dasar	1,3

Hasil analisis stabilitas bendungan dengan memperhitungkan tekanan angkat di atas dapat dilihat pada Tabel 5 dan Faktor Keamanan (FK) minimum yang disyaratkan adalah seperti Tabel 6.

Dari Tabel 5 tersebut, bila muka air waduk dinaikkan sampai elevasi normal +1.199,0 m, bendungan tidak aman. Alternatif perbaikan tentunya dapat dipilih dengan mempertimbangkan biaya, termasuk kemudahan pelaksanaannya.

Pelajaran yang diperoleh dari kasus Bendungan Garung ini adalah bahwa dengan kondisi geologi yang kurang menguntungkan tersebut (tidak benar-benar sound dan kedap air), bendungan jangan "dipaksakan" dibangun dengan tipe graviti. Tipe lain, yang disesuaikan dengan ketersediaan material timbunan yang tersedia di lapangan disamping kondisi geologi dan topografinya, misalnya bendungan urugan tanah dengan zona inti kedap air atau bendungan urugan batu dengan lapisan beton di hulu (Concrete Faced Rockfill Dam, CFRD) mungkin lebih sesuai (cocok).

KESIMPULAN

Dengan kondisi geologi fondasi bendungan yang terdiri dari breksi gunungapi, tufa lapili, lava andesit dan endapan permukaan yang bersifat porous, bendungan Garung "dipaksakan" dibangun dengan tipe beton gravity. Sebagai perbaikan fondasi, telah dilakukan dengan

grouting tirai. Hasil pengukuran terhadap pisometer menunjukkan bahwa tekanan angkat pada kondisi muka air waduk masih di bawah 3 m dari elevasi muka air waduk normal, ternyata cukup tinggi mendekati tekanan angkat desain pada muka air waduk normal. Besarnya debit rembesan yang melebihi debit rembesan hasil analisis menunjukkan bahwa grouting tirai kurang efektif. Hasil analisis stabilitas terhadap geser menunjukkan bahwa pada elevasi muka air waduk 3 m di bawah elevasi muka air waduk normal, bendungan pada kondisi kritis. Pelajaran dari kasus Bendungan Garung ini adalah dengan kondisi geologi yang kurang menguntungkan tersebut, tipe graviti yang dipilih adalah tidak sesuai, karena tipe graviti memerlukan kondisi batuan yang bersifat sound dan kedap air. Tipe lain, seperti bendungan urugan dengan inti kedap air atau tipe Concrete Faced Rockfill Dam (CFRD) mungkin lebih sesuai. Pemasangan dinding halang vertikal kedap air di bagian hulu bendungan dan penambahan grouting tirai pada kedua tumpuan untuk memperpanjang aliran rembesan dan mengurangi debit rembesan dapat mengurangi tekanan angkat, sehingga waduk Garung dapat dioperasikan secara maksimal pada elevasi normal +1.199,0 m.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada PT. Indonesia Power dan PT. Kwarsa Hexagon yang telah mengizinkan serta membantu dalam

pengumpulan data dan informasi mengenai bendungan beton graviti Garung, sehingga dapat terwujudnya tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chopra, A. K. 1987, "Simplified Earthquake of Concrete Gravity Dam", ASCE Journal of the Structural Division, 1 13ST8:1688-1708.
- Cole, R.A., and Cheek, J. B. 1986, "Seismic Analysis of Gravity Dams", Technical Report SL-86-44, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- PT.Kwarsa Hexagon, 2007, "Jasa Sertifikasi Keamanan Bendungan PLTA PB Soedirman, Kab Banjarnegara dan Bendungan PLTA Garung, Kab Wonosobo, Jawa Tengah".
- Satuan Kerja Balai Keamanan Bendungan, Departemen PU, 2008, "Pedoman Bendungan Beton Graviti".
- USBR, 1976, "Design of Small Dams", First Reprint of Second Edition, Oxford & IBH Publishing Co.
- USBR, 1976, "Design of Gravity Dams", A Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado, USA.