

PENERAPAN PERALATAN GEORADAR SEBAGAI TEKNOLOGI PENDUKUNG PEMANTAUAN PERILAKU BENDUNGAN Studi Kasus: Bendungan Cacaban, Jawa Tengah

Nurlia Sadikin

Peneliti Balai Bangunan Hidraulik dan Geoteknik Keairan
Pusat Litbang Sumber Daya Air, Jl. Ir. H. Juanda No. 193 Bandung
E-mail: n.sadikin@gmail.com

ABSTRAK

Bendungan merupakan bangunan sipil yang cukup kompleks dan sangat berisiko jika terjadi keruntuhan atau kerusakan. Pada setiap bendungan harus dilakukan pemantauan perilaku bendungan secara kontinu. Semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi telah memberikan pendukung penyelidikan terhadap kinerja bangunan air. Adanya rongga-rongga yang dapat mengarah ke terjadinya bocoran, dapat dideteksi secara dini. Kerusakan bendungan-bendungan yang mengalami rembesan dan berumur tua akan dapat dideteksi dengan peralatan seperti georadar. Pada bulan Agustus 2010 telah dilakukan pengkajian penerapan georadar di Bendungan Cacaban, Jawa Tengah. Terdapat dugaan bahwa terjadi rembesan pada tubuh bendungan tersebut. Lintasan pengukuran yang digunakan pada tubuh bendungan adalah 6 lintasan memanjang dan 4 lintasan melintang di pelimpah. Hasil pengukuran georadar memperlihatkan bahwa tubuh bendungan terbagi dalam 2 per lapisan, lapisan atas menunjukkan variasi sementara lapisan bawahnya lebih homogen. Pelimpah terbagi dalam 3 per lapisan, lapisan atas dan tengah menunjukkan variasi, di mana lapisan tengah lebih kontras dan bervariasi sedangkan lapisan bawah homogen. Ditemukan pula deviasi hubungan garis freatik teoritis, garis freatik dari pisometer dan garis freatik pada lintasan deret-deret pisometer dari pengukuran georadar dengan pembacaan instrumentasi. Deviasi yang muncul disebabkan adanya reflektor nilai amplitudo dan tingkat kepadatan yang berbeda pada per lapisan bendungan urugan.

Kata kunci : bendungan, georadar, rembesan, garis freatik, instrumentasi, bendungan urugan.

ABSTRACT

Dam is a quite complex and highly risky building in the case of failure or damage, therefore continuously monitoring should be carried out in order to monitor the behavior of the dam. The development of science and technology has provided supporting methods of investigating the performance of hydraulic structures. The existence of cavities which can lead to seeps and detection of damages by seepage on earlier phases in dams could be detected by georadar. On August 2010, implementation of georadar application was conducted into Cacaban Dam, Central Java. There were suspicions of seepage in the lower side of the dam body. Measurement lines used for georadar were 6 lines along the dam body and 4 lines across the spillway. The results showed that in the dam body the soil was divided into 2 layers, the top layer showing color variation while the lower layer was homogeneous. On the spillway, results of georadar investigation also showed that the soil was divided into 3 layers. The top and middle layers show color variations, which the middle layer was more contrast and varied and the bottom layer was homogeneous. Deviations showed between the theoretical phreatic lines with phreatic line of piezometers and measured by georadar. These deviations occurred due to the reflector amplitude value and variation of density levels inside the embankment.

Keywords : dam, georadar, seepage, phreatic line, instrumentation, embankment dam.

PENDAHULUAN

Bendungan merupakan bangunan keairan teknik sipil yang cukup kompleks dan sangat berisiko jika terjadi keruntuhan atau kerusakan. Kerusakan pada bangunan air dapat disebabkan oleh longsornya urugan bendungan atau adanya bocoran atau rembesan yang akan

membahayakan konstruksi dan keamanan bendungan. Untuk mencegah terjadinya bencana ini, maka pada setiap bendungan harus dilakukan pemasangan instrumen geoteknik, pemantauan instrumentasi dan perilaku bendungan secara kontinu. Bendungan multiguna berfungsi untuk menampung air sebagai suplai air untuk keperluan irigasi, air

baku, pembangkit tenaga listrik, pengendali banjir dan sebagainya. Bangunan-bangunan tersebut harus kuat menahan tekanan air, mempunyai tingkat rembesan di bawah ambang batas yang diizinkan, memiliki prasarana dan sarana pengoperasian yang dapat berfungsi dengan baik serta sistem instrumentasi yang memadai guna mengetahui fungsi dan kinerja masing-masing komponen bangunan (termasuk keamanan bendungan).

Semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi telah mendapatkan teknologi pendukung pemantauan kinerja bangunan air yang semakin mudah dilakukan. Adanya rongga-rongga pada tubuh bendungan akan dapat dideteksi dengan peralatan seperti georadar. Pengkajian ini dilakukan untuk mendeteksi kerusakan yang ada pada tubuh bendungan dan bangunan pelengkap. Juga dilakukan pengkajian hasil pemantauan data instrumentasi bendungan yang digabungkan atau dikombinasi dengan hasil teknologi georadar di lapangan.

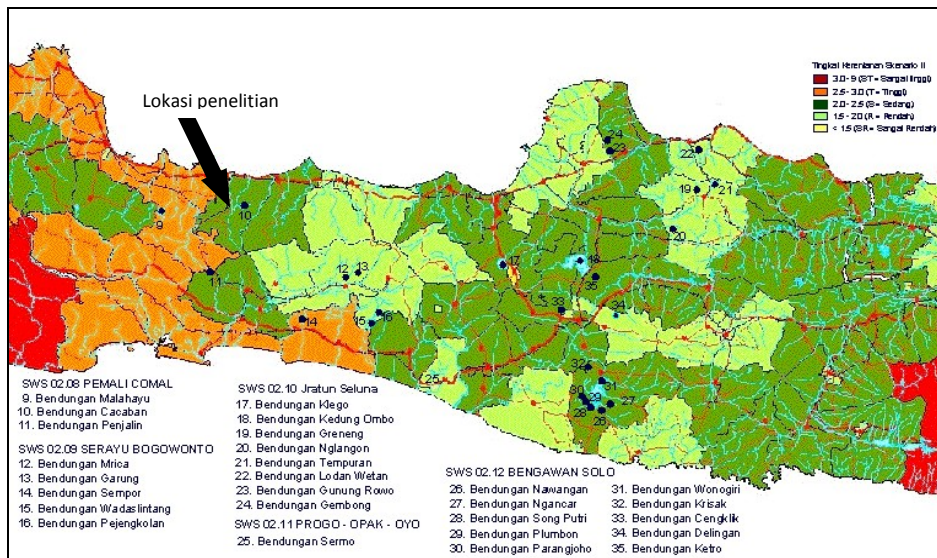
Pengkajian penerapan georadar ini sebagai teknologi pendukung pemantauan perilaku bendungan dilakukan di Bendungan Cacaban, Jawa Tengah (Gambar 1). Terdapat dugaan bahwa terjadi rembesan pada tubuh bendungan tersebut. Bendungan Cacaban mempunyai tipe urugan tanah homogen dan terletak di Desa Sirampak, Kecamatan Slawi, Kabupaten Tegal, Propinsi Jawa Tengah. Waduk Cacaban mempunyai daerah pengaliran sungai (DPS) sekitar 59,00 km², yang terletak di hulu anak sungai K. Curugagung, K. Layak, dan induk sungai K. Cacaban Wetan.

Tujuan kegiatan pada penelitian ini adalah menyediakan teknologi siap pakai, yaitu teknologi georadar sebagai pendeteksi kerusakan timbunan atau bendungan urugan untuk penanggulangan kerusakan dan peningkatan fungsi bangunan air utama. Sasarannya adalah tersedianya pilihan teknologi PU siap pakai untuk menilai kerusakan bendungan yang mengalami rembesan dan berumur tua yang bisa dilaksanakan secara cepat, sebelum dilakukan penelitian yang lebih komprehensif.

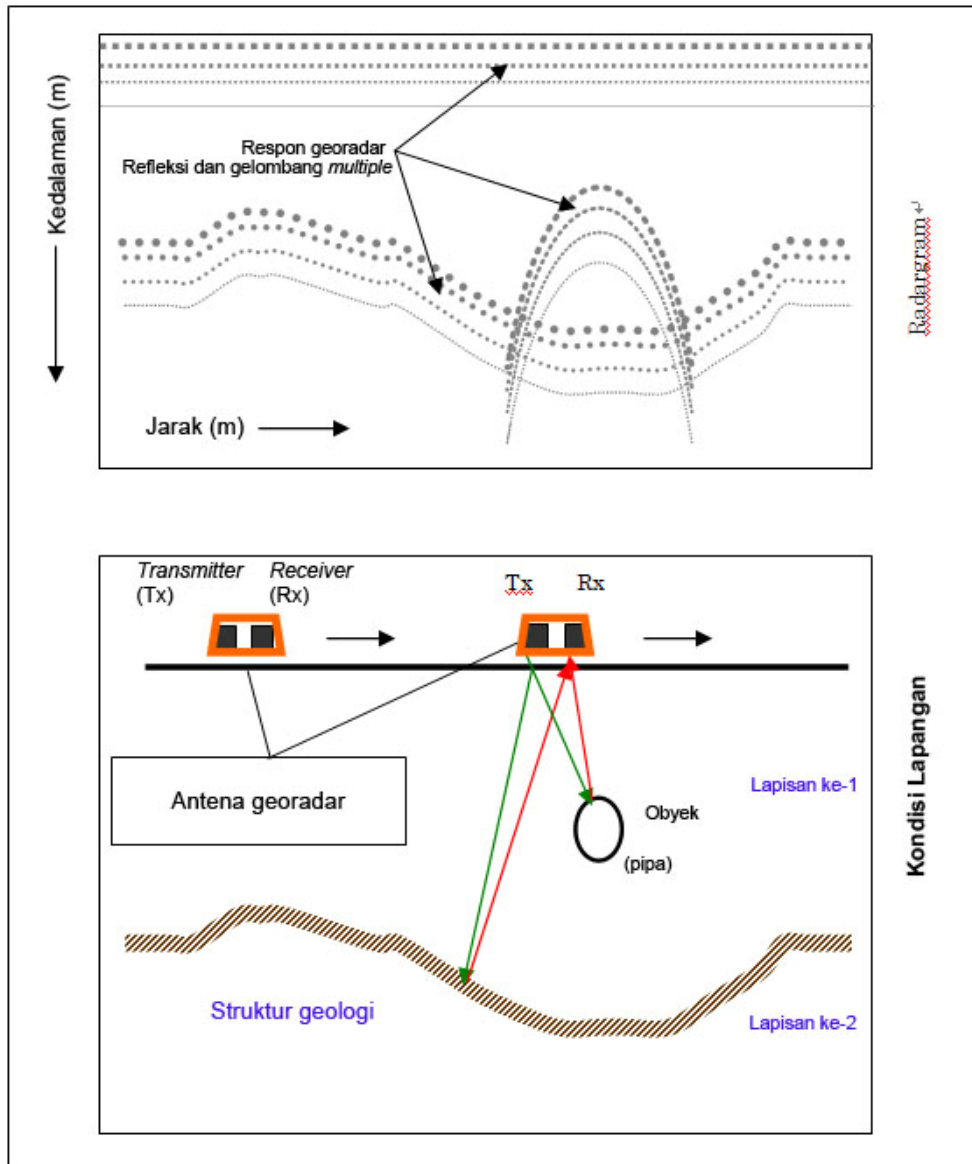
KAJIAN PUSTAKA

1 Georadar*)

Georadar atau Geo-RADAR (RADAR = radio detection and ranging) atau lebih dikenal dengan istilah *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan suatu alat bantu berdasarkan geofisika, yang dapat menggambarkan lapisan bawah permukaan yang dangkal dengan resolusi tinggi, dan analisis struktur geologi bawah permukaan yang dapat diikat terhadap data pengeboran. Secara garis besar, peralatan untuk pengukuran Georadar mengadopsi metode *Subsurface Interface Radar* (SIR) yang merupakan unit *Geophysical Survey Systems, Inc.* (GSSI). Berdasarkan pengalaman, penetrasi dengan metode ini akan bisa mencapai 25 – 30m bila digunakan pada daerah yang kadar kegramannya relatif kecil. Prinsip kerja dasar pengukuran Georadar dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 1 Lokasi penelitian Bendungan Cacaban di Jawa Tengah, No.10 (Najoan & Carlina, 2006; hlm. 49)



Gambar 2 Prinsip kerja dasar pengukuran Georadar (komunikasi lisan dengan (dan gambar-gambar sketsa dari): Untoro)

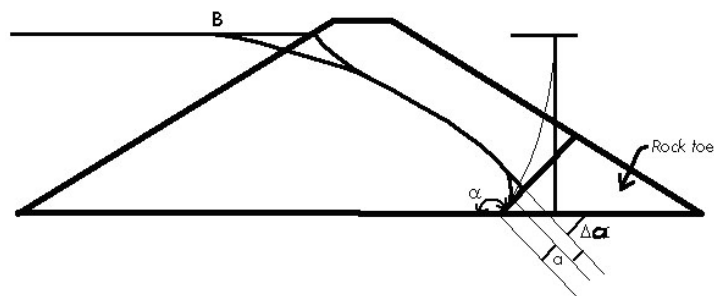
2 Pengkajian Kinerja Instrumentasi Bendungan

Beberapa macam instrumentasi terpasang pada bendungan, antara lain adalah pisometer, inklinometer, *V-notch*, patok geser, dan lain-lain. Namun pada penelitian ini, pengkajian kinerja instrumentasi dilakukan terhadap data hasil pembacaan instrumentasi pisometer. Pisometer digunakan untuk mengukur elevasi muka air tanah, tekanan air pori pada fondasi di sebelah hilir bendungan, dan tekanan air pori pada tubuh bendungan termasuk pada waktu konstruksi. Tipe pisometer yang sering

digunakan, yaitu pisometer sistem terbuka dan pisometer sistem tertutup. Hasil pengkajian digunakan untuk melengkapi (pembanding) hasil pengukuran teknologi georadar.

3 Flownet Metode Cassagrande

Flownet yang digunakan pada penelitian ini merupakan grafik yang berupa kontur aliran air tanah yang dikemukakan oleh Cassagrande (Singh & Sharma, 1976). Menurut Cassagrande, *flownet* yang akurat bisa didapatkan dengan menggunakan metode sketsa grafis karena garis



Gambar 3 Penentuan aliran air dengan metoda Cassagrande untuk sudut α antara 90° dan 180° (Singh & Sharma, 1976; hlm. 24)

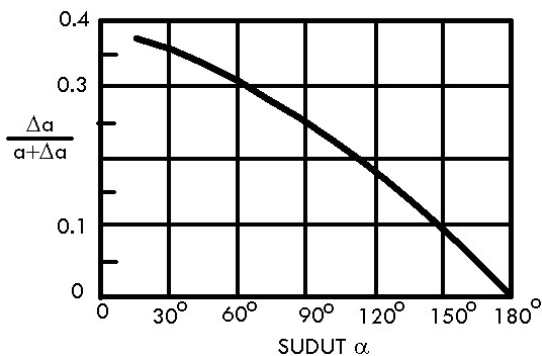
aliran parabola cara Kozney atau 'parabola dasar' dapat diterapkan pada kondisi bendungan urugan. Gambar 3 memperlihatkan proses penggambaran *flownet*.

Dalam semua lintasan parabola, bagian tengah garis aliran bertepatan dengan garis parabola menuju dasar, dimulai dari permukaan air di garis aliran B. 'Titik pintu masuk dikoreksi' dimulai di sebelah kanan sudut bendungan, yang merupakan ekipotensial permukaan kemudian menuju dasar parabola. Untuk tanggul dengan *toe drain*, di mana sudut α antara 90° dan 180° , garis rembesan diteruskan dari dasar parabola sampai ke hilir.

Pada kasus ini, jika α merupakan gambaran jarak dari B sepanjang muka air, maka garis rembesan akan memenuhi $(a + \Delta a)$ yang merupakan jarak parabola sampai memotong

garis debit, rasio $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$ pada A. Cassagrande

dari *flownet* secara grafis untuk berbagai nilai α di-plot dalam Gambar 4. Dari nilai-nilai ini titik-titik awal garis rembesan dari sketsa dasar parabola dapat diketahui.



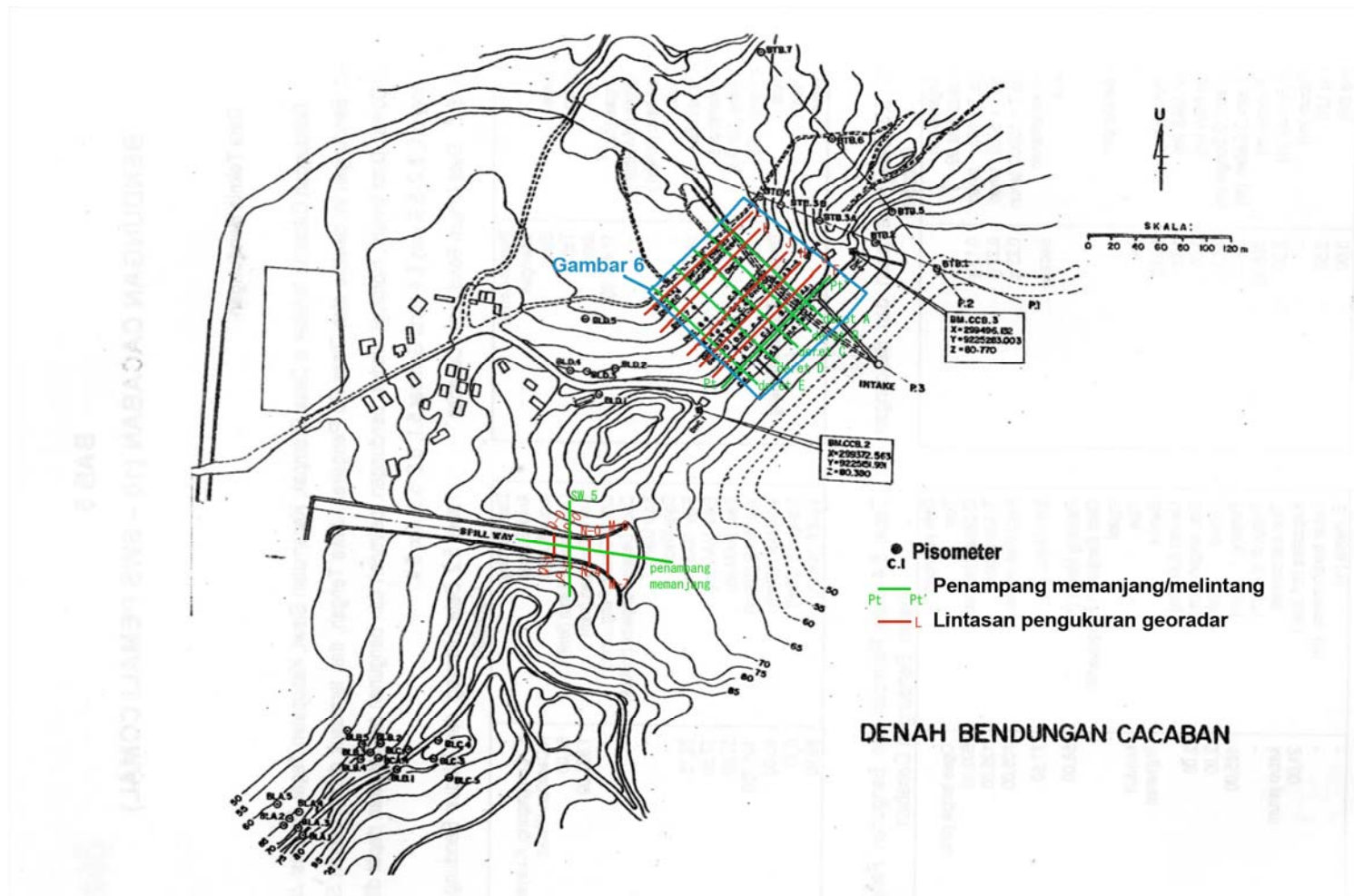
Gambar 4 Rasio $\frac{\Delta a}{a + \Delta a}$ pada berbagai nilai α (Singh & Sharma, 1976; hlm. 25)

METODOLOGI

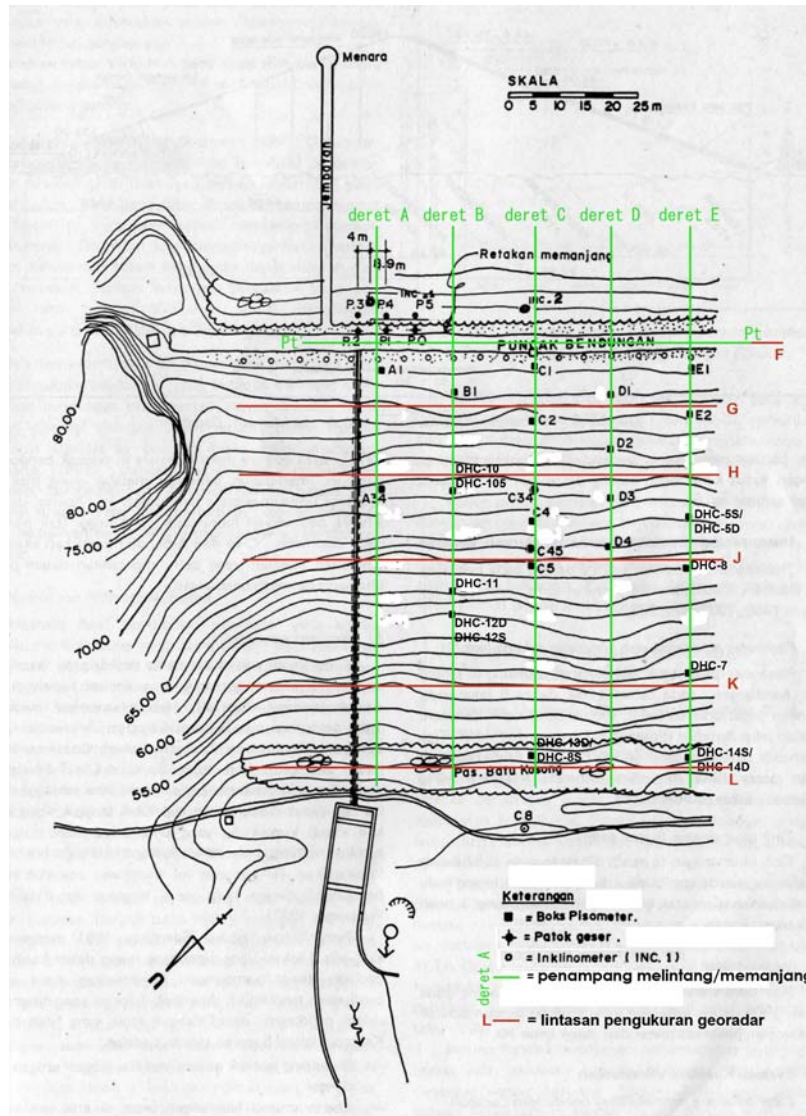
Dalam melaksanakan pengkajian aplikasi alat georadar sebagai teknologi pendukung pemantau perilaku bendungan, digunakan hipotesis bahwa pengukuran dengan teknologi georadar akan memperlihatkan ada atau tidak adanya anomali di dalam tubuh bendungan dan bangunan pelengkap. Asumsi dasar yang digunakan adalah pada pengukuran GPR, sinyal atau gelombang yang dipancarkan ke bawah permukaan akan menyebar dan sebagian akan dipantulkan, karena adanya perbedaan kandungan listrik batuan.

Proses pengumpulan data di Bendungan Cacaban dilakukan setelah membuat lintasan pengukuran georadar di tubuh bendungan dan pelimpah (Gambar 5 dan Gambar 6). Kemudian dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Pengolahan data dilakukan melalui proses pemfilteran, dekonvolusi, migrasi, transformasi Hilbert, penguatan (*gain*) terhadap tampilan amplitudo dari bentuk *wavelet "color scale"*. Pemfilteran dilakukan pada amplitudo untuk *bandpass* tertentu. Sementara proses dekonvolusi digunakan untuk mereduksi gelombang *multiple* akibat reflektor yang kuat.
- 2) Analisis dan interpretasi georadar dilakukan dengan mengamati perbedaan reflektor yang diakibatkan oleh adanya variasi jenis tanah atau batuan atau fluida. Rembesan air akan menghasilkan nilai konduktansi atau kapasitansi yang berbeda bila dibandingkan dengan lapisan yang homogen.
- 3) Menentukan sifat-sifat tersebut, di mana sifat kecepatan penjalaran gelombang elektromagnetik (EM) georadar yang berbentuk sebagai *displacement current* akan menghasilkan nilai amplitudo yang berbeda pula. Semua sifat atenuasi, refleksi maupun dispersi sinyal yang melaluinya juga akan menunjukkan perbedaan struktur bawah permukaan.



Gambar 5 Posisi piezometer pada tubuh bendungan. Lintasan pengukuran georadar dan garis penampang pada tubuh bendungan dan pelimpah Bendungan Cacaban, Propinsi Jawa Tengah. Lintasan pengukuran pada puncak bendungan berimpit dengan penampang tubuh bendungan, sementara lintasan P pada pelimpah berimpit dengan penampang melintangnya (Najoan & Carlina, 2006; hlm. 88).



Gambar 6 Lintasan pengukuran georadar pada tubuh Bendungan Cacaban, Propinsi Jawa Tengah. Lintasan pengukuran pada puncak bendungan berimpit dengan penampang tubuh bendungan (peta situasi dikutip dari Brotodihardjo, 1991; hlm. 49).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1 Geomorfologi

Geomorfologi Bendungan Cacaban memperlihatkan, secara fisiografis bendungan ini terletak di Dataran Aluvial Jawa Utara yang terdiri dari dataran yang landai dan dibatasi oleh tinggian Pegunungan Serayu Selatan dan Jalur Gunung Api Kuarter di sebelah selatannya (Gambar 7). Gunung api terdekat yang terletak di selatan dari kawasan Bendungan Cacaban adalah Gunung Slamet. Morfologi lokalnya terdiri dari perbukitan memanjang yang terpotong oleh aliran sungai.



Gambar 7 Zonasi Fisiografi Jawa Tengah (van Bemmelen, 1949; hlm. 26)

2 Stratigrafi Regional

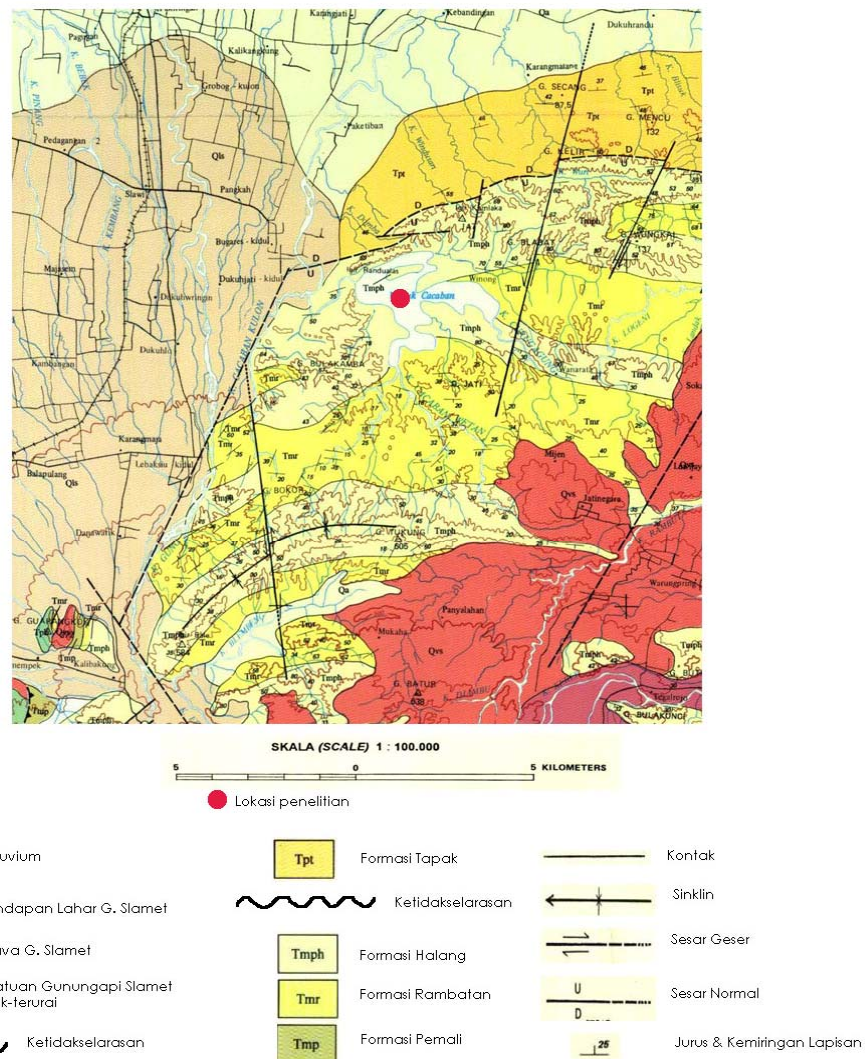
Bendungan Cacaban termasuk ke dalam peta geologi lembar Purwokerto-Tegal (Gambar 8). Peta tersebut menggambarkan kawasan Bendungan Cacaban terbagi dari tua ke muda dalam Formasi Rambatan, Formasi Halang dan Formasi Tapak. Adapun deskripsinya adalah sebagai berikut:

- 1) Formasi Rambatan, terdiri atas serpih napal, batupasir gampingan, napal berselang-seling dengan batupasir, berumur Miosen Tengah.
- 2) Formasi Halang, terdiri dari batu pasir

dengan fragmen batuan andesit, konglomerat tufan dan napal bersisipan dengan batupasir. Sedangkan bagian atasnya terdapat breksi polimiks dengan fragmen batuan andesit, basalt dan batu gamping, yang berumur Miosen Tengah-Miosen Akhir.

- 3) Formasi Tapak, terdiri atas batupasir kasar, konglomerat dan setempat terdapat breksi dengan fragmen batuan andesit. Formasi ini diendapkan pada umur Pliosen.

Sementara dari hasil pengamatan di kawasan Bendungan Cacaban, terdapat sedikitnya empat satuan stratigrafi (Tabel 1).



Gambar 8 Peta Geologi sekitar Bendungan Cacaban (Djuri dkk, 1996)

Tabel 1 Stratigrafi daerah Lembar Purwokerto dan Tegal (Djuri dkk, 1996)

UMUR	SATUAN STRATIGRAFI	LITOLOGI
Holosen	ALUVIUM	Kerikil, pasir, lanau dan lempung
	ENDAPAN LAHAR GUNUNG SLAMET	lahar, dengan bongkahan batuan gunungapi bersusunan andesit-basalt
Ketidakselarasan		
Plistosen Akhir	LAVA GUNUNG SLAMET	Lava andesit
	BATUAN GUNUNGAPI SLAMET TAK-TERURAI	Breksi gunungapi, lava dan tuf
Ketidakselarasan		
Pliosen Awal	FORMASI TAPAK (Tpt)	Batupasir berbutir kasar, konglomerat, breksi andesit
Ketidakselarasan		
Miosen Akhir	FORMASI HALANG (Tmph)	Batupasir andesit, konglomerat tufan dan napal bersisipan pasir
Miosen Tengah	FORMASI RAMBATAN (Tmr)	Serpih, napal dan batupasir gampingan
	FORMASI PEMALI (Tmp)	Napal globigerina bersisipan batugamping pasiran, batupasir tufan dan batupasir kasar

3 Struktur Geologi

Tatanan struktur geologi Jawa Tengah utara secara umum berarah barat daya-timur laut dan barat laut-tenggara, sedangkan di sekitar Gunung Slamet ditemui tatanan struktur melingkar yang berbeda dengan tatanan struktur geologi Jawa Tengah pada umumnya.

Sementara di kawasan Bendungan Cacaban terdapat beberapa jejak struktur geologi berupa:

- 1) Adanya jalur dengan struktur perlapisan yang acak, terlipat dan tersesarkan dalam skala minor.
- 2) Adanya gejala milonitisasi pada batulempung dan batupasir.
- 3) Adanya kekar-kekar berpasangan (*shear fracture*) terutama pada batuan yang bersifat masif di sandaran kiri dan kanan tubuh bendungan.

4 Penyelidikan Geofisika dan Geoteknik

Penyelidikan tubuh bendungan dan pelimpah di Bendungan Cacaban, Jawa Tengah dengan menggunakan teknologi georadar bertujuan untuk memperoleh data primer hasil penyelidikan, dan mengetahui apakah ada rongga atau rekahan atau retakan pada tubuh bendungan. Lintasan pengukuran georadar di sepanjang tubuh bendungan adalah 6 lintasan memanjang dan di pelimpah digunakan 4 lintasan melintang (Gambar 5 dan Gambar 6). Penyelidikan ini dilakukan menggunakan alat GSSI SIR sistem-20. Frekuensi antena GSSI SIR sistem-20 yang digunakan adalah 100 MHz,

sementara pemrosesan data dilakukan dengan perangkat lunak RADAN.

Sinyal yang diakibatkan oleh adanya variasi jenis tanah atau batuan atau fluida misal rembesan air, akan menghasilkan nilai konduktansi atau kapasitansi yang berbeda, bila dibandingkan dengan lapisan yang homogen. Dengan sifat-sifat yang berbeda tersebut, maka sifat kecepatan penjalaran gelombang EM georadar yang berbentuk sebagai *displacement current* akan menghasilkan nilai amplitudo yang berbeda pula. Semua sifat atenuasi, refleksi maupun dispersi sinyal yang melaluinya, juga akan menunjukkan perbedaan struktur bawah permukaan. Hasil citra georadar yang lebih *smooth* atau *homogen* tidak banyak, menunjukkan bahwa reflektor akan ditampilkan sebagai rona hitam yang lebih halus. Sementara warna dalam skala variasi intensitas putih, kuning, merah abu-abu dan hitam yang cukup kontras, menunjukkan adanya perbedaan struktur perlapisan bawah permukaan yang kontras pula (jenis tanah atau batuan maupun tingkat kepadatan atau densitasnya). Bila hal ini berlanjut (kontinu), dapat diinterpretasikan sebagai bidang antar muka perlapisan tanah atau batuan, yang bersifat sebagai reflektor kuat.

Hasil pengukuran georadar yang telah diolah (Gambar 9), kemudian digabungkan dengan pembacaan pisometer lapangan. Analisis dilakukan melalui penampang memanjang dan melintang yang menggambarkan hubungan garis freatik teoritis, garis freatik dari pisometer dan garis freatik dari radargram. Ketiga garis freatik

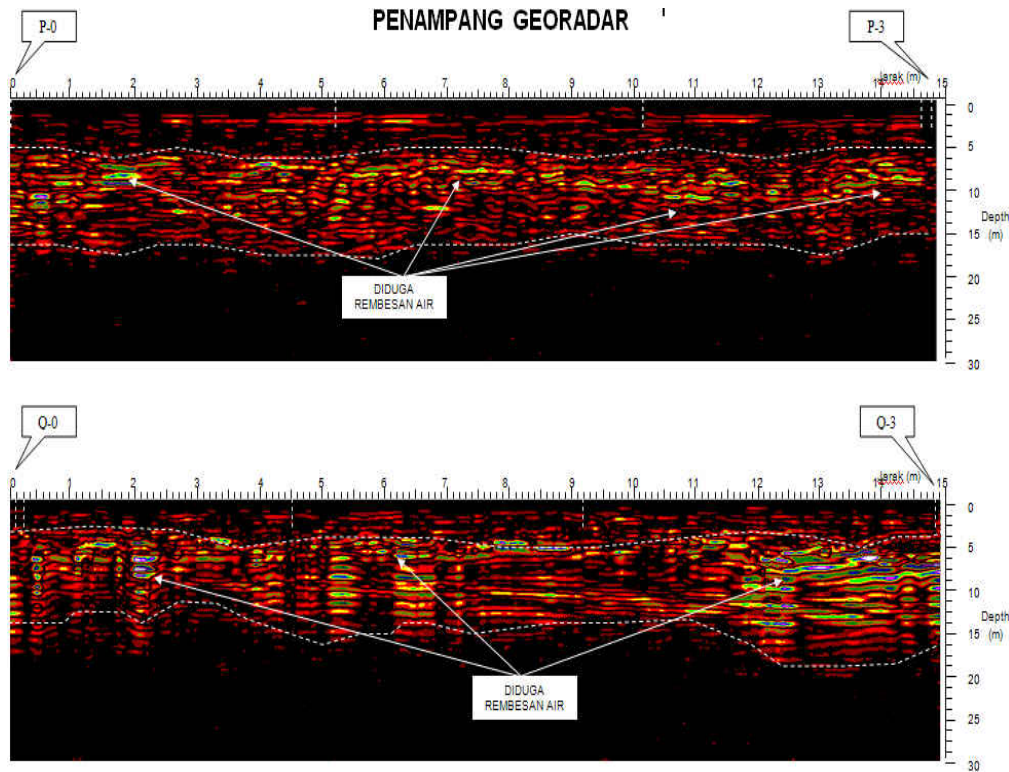
digambarkan dengan *flownet* menggunakan metode Cassagrande, sehingga akan diketahui apakah bendungan dalam kondisi langgeng (*steady*). Pada penampang memanjang (Gambar 10), diperlihatkan dua lapisan yang memisahkan tingkat kepadatan berbeda. Perbedaan ini ditunjukkan pada lapisan atas, terdapat perubahan warna, sementara lapisan bawahnya lebih *homogen*, atau tidak banyak menunjukkan perbedaan reflektor. Penyelidikan pada jalan inspeksi (penampang memanjang) ini memperlihatkan perbedaan amplitudo yang terdapat pada kedalaman sekitar 5 m.

Pada Gambar 11 (a) - (e) disajikan penampang-penampang melintang pada tubuh bendungan. Penampang ini menunjukkan tubuh Bendungan Cacaban terbagi menjadi dua lapisan amplitudo atau reflektor pada kedalaman yang berbeda untuk setiap deretnya. Selain itu, juga memperlihatkan garis freatik teoritis, garis freatik pembacaan pisometer dan batas reflektor yang didapatkan dari pengukuran georadar. Pada deret A dan D (Gambar 11 (a) dan (d)) hanya dapat digambarkan garis freatik teoritisnya karena data pisometernya tidak lengkap. Sementara deret B, C dan E (Gambar 11 (b), (c) dan (e)) menunjukkan adanya deviasi antara garis freatik teoritis terhadap garis

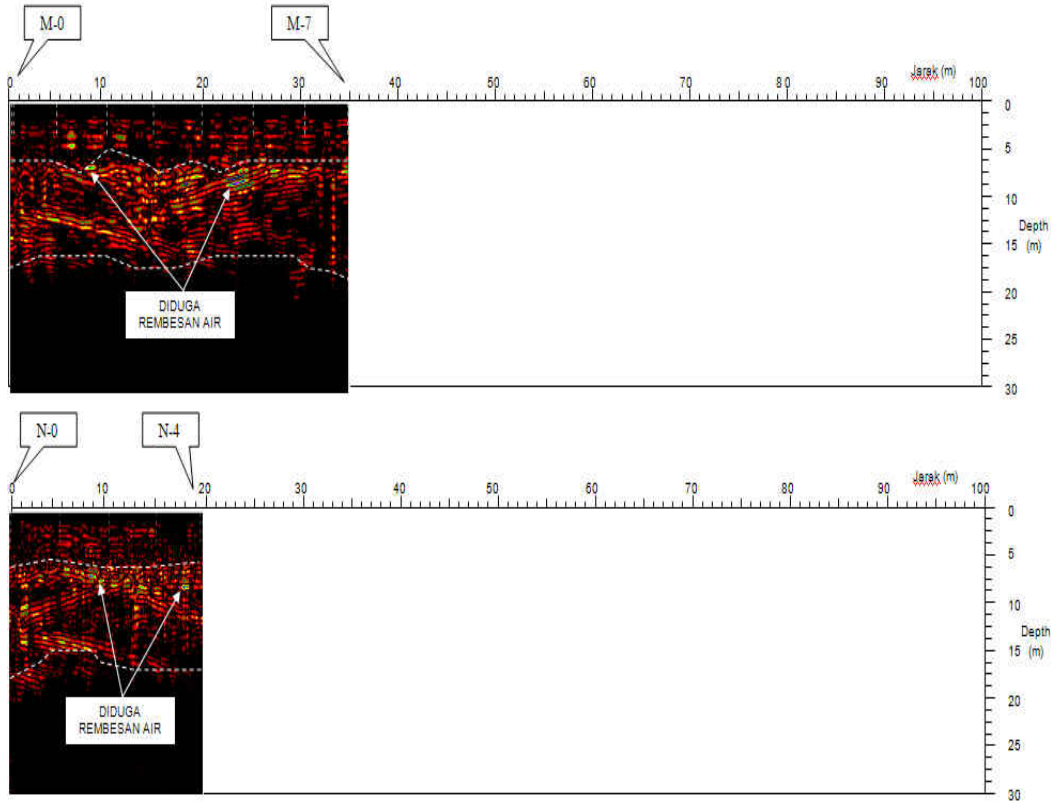
freatik pisometer dan batas reflektor, meskipun antara garis freatik pisometer dan batas reflektor selaras. Pisometer-pisometer tersebut berada pada daerah, di mana rembesan pernah muncul dari tubuh Bendungan Cacaban. Rembesan yang terjadi diperkirakan telah mempengaruhi kondisi urugannya, pada bagian atas lebih *loose* dibandingkan dengan bagian bawahnya.

Penampang memanjang dan melintang pelimpah (Gambar 12 dan 13), memperlihatkan reflektor membagi menjadi 3 lapisan yang berbeda, terpisah pada kedalaman 5m dan 15m. Citra berwarna putih baik menerus ataupun spot-spot diinterpretasikan sebagai fluida.

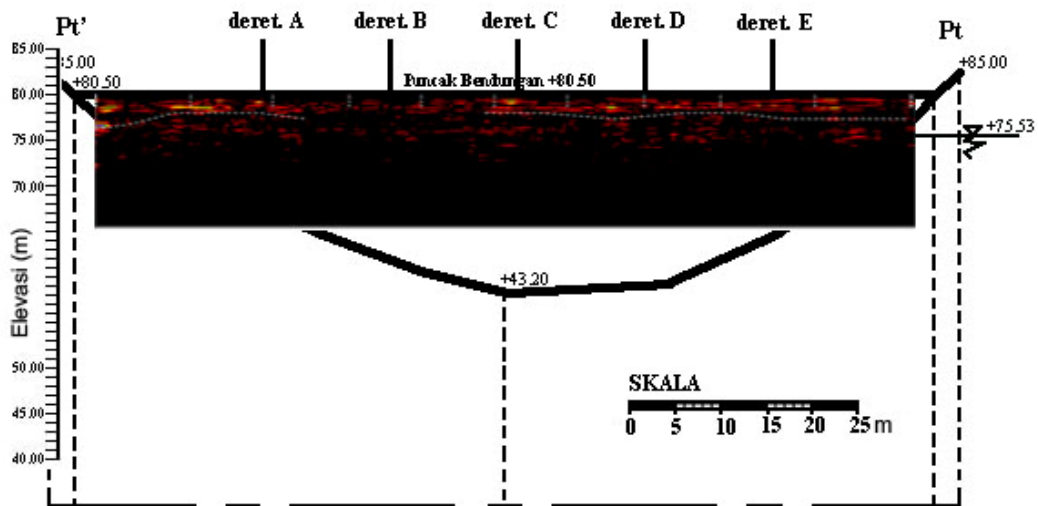
Hasil pemantauan instrumen yang terpasang di Bendungan Cacaban memperlihatkan bahwa antara hasil evaluasi pemantauan pada tahun-tahun sebelumnya yang kemudian dibandingkan dengan perubahan pola peningkatan tekanan air pori terhadap RWL (*Reservoir Water Level*) dari data baru (sampai tahun 2010) relatif tidak terlalu berubah dari tahun ke tahun. Dari grafik histeresis dapat diketahui, bahwa elevasi muka air pisometer pada hampir semua pisometer mempunyai kecenderungan turun atau naik yang bervariasi antara 0,5m sampai 1m. Berdasarkan evaluasi



Gambar 9 Beberapa hasil radargram Bendungan Cacaban



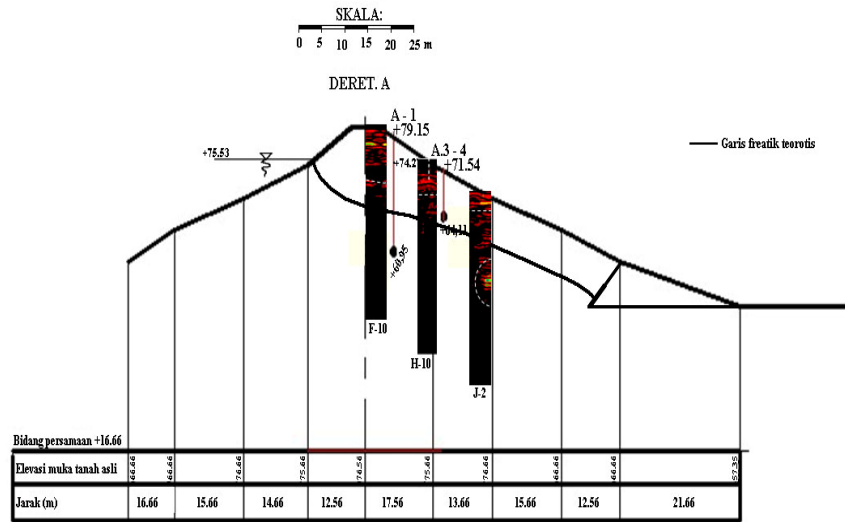
Gambar 9 Beberapa hasil radargram Bendungan Cacaban (lanjutan)



Gambar 10 Penampang memanjang tubuh Bendungan Cacaban

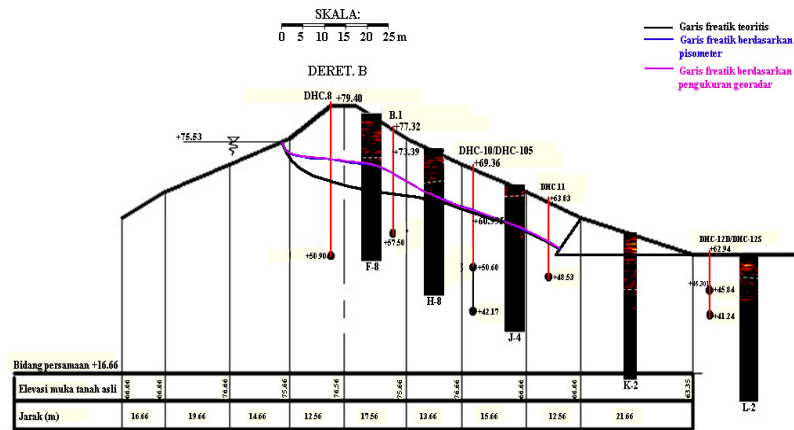
(a)

POTONGAN MELINTANG BENDUNGAN CACABAN



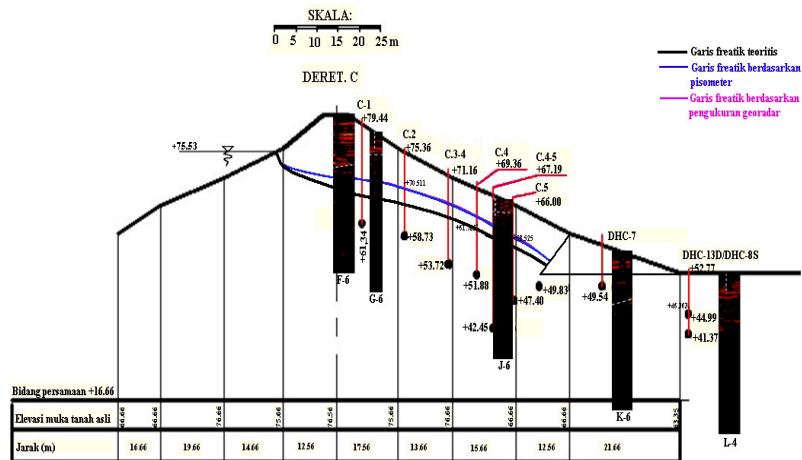
(b)

POTONGAN MELINTANG BENDUNGAN CACABAN

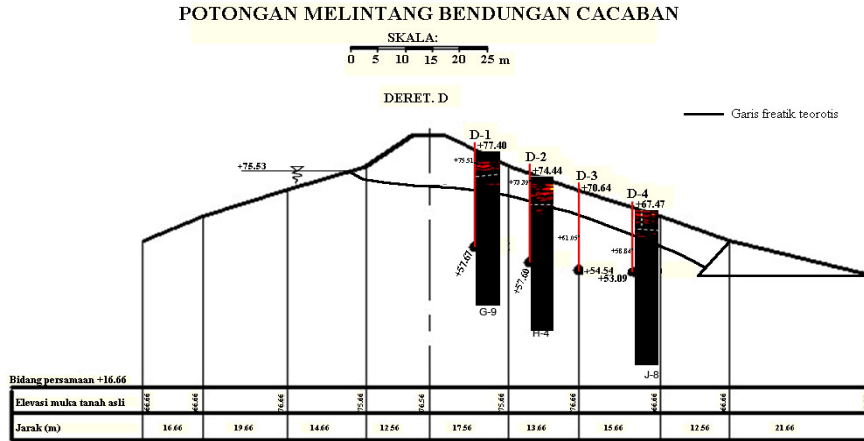


(c)

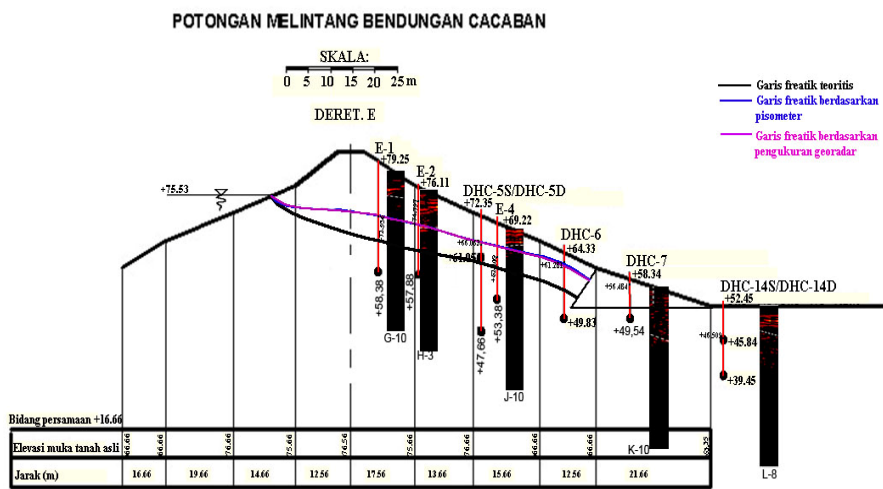
POTONGAN MELINTANG BENDUNGAN CACABAN



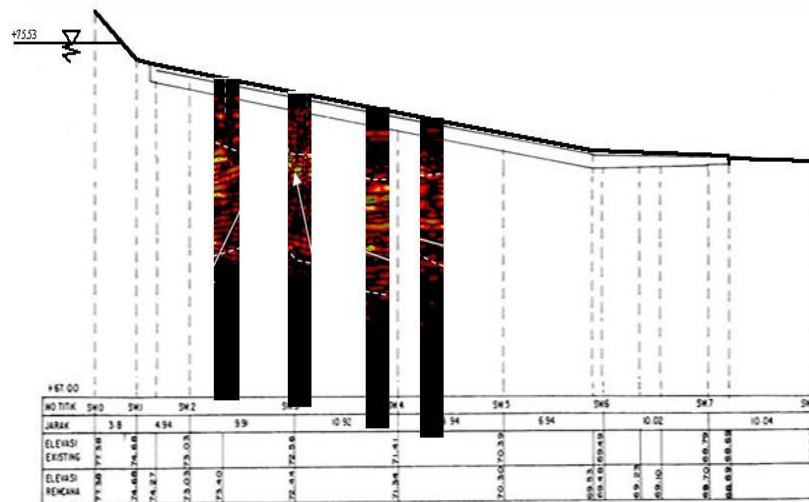
(d)



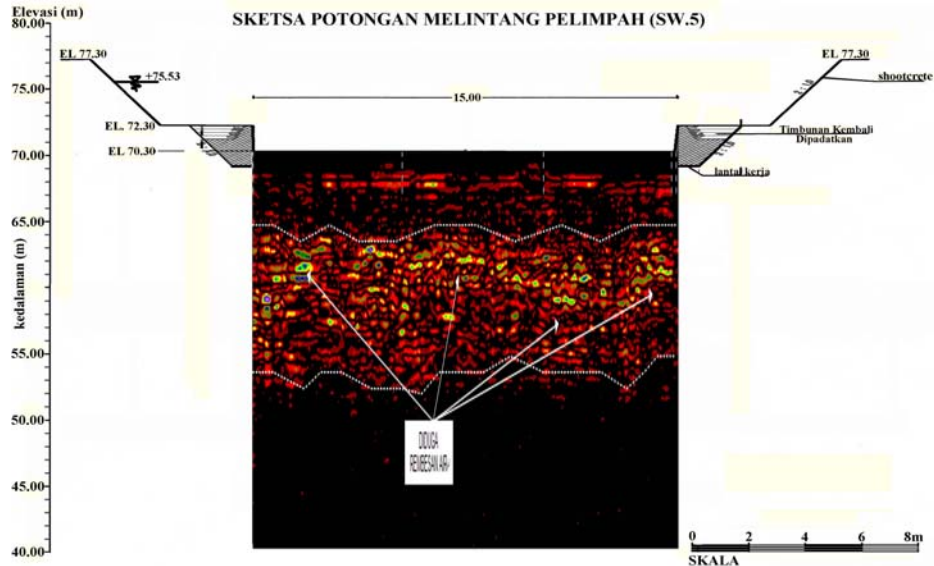
(e)



Gambar 11 (a)-(e) Penampang melintang tubuh Bendungan Cacaban pada potongan deret pisometer A, B, C, D dan E. Garis freatik berdasarkan pisometer dan pengukuran georadar berimpit.



Gambar 12 Penampang memanjang pelimpah Bendungan Cacaban



Gambar 13 Penampang melintang *spillway* Bendungan Cacaban (SW5)

hasil instrumentasi pada Bendungan Cacaban, perubahan tingkat kelulusan air dalam tubuh dan fondasi bendungan dianggap relatif kecil dan tidak mempengaruhi perubahan koefisien permeabilitas material urugan, sehingga tidak terjadi bahaya erosi buluh (*piping*) (Pusat Litbang SDA, 2010).

KESIMPULAN

Radargram pada Bendungan Cacaban menunjukkan reflektor nilai amplitudo dan tingkat kepadatan yang berbeda. Bagian bawah yang relatif homogen, lebih padat daripada bagian yang menunjukkan perubahan warna. Radargram di daerah pelimpah memberikan citra yang berwarna putih baik menerus ataupun spot-spot, hal ini diindikasikan sebagai tanda adanya fluida. Rembesan diperkirakan berasal dari dinding bukit di kanan kiri pelimpah dan bendungan utama.

Penampang memanjang dan melintang pada tubuh Bendungan Cacaban memperlihatkan ketidakselarasan antara garis freatik teoritis dengan garis freatik pembacaan pismeter dan batas reflektor yang didapatkan pada penyelidikan georadar.

Agar didapatkan hasil analisis dan interpretasi yang lebih tajam, perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan alat sondir *piezocone* pada daerah-daerah anomali, agar dapat diketahui jenis dan tekanan air pori tanah di tempat tersebut.

Sebagai validasi hasil pengukuran, diperlukan data sekunder lain misal dari hasil pengeboran, hasil uji laboratorium contoh tanah dan sebagainya untuk dikaitkan pada hasil

pengukuran georadar yang didapat. Para *stakeholder* diharapkan dapat memanfaatkan hasil penelitian ini, dan memberikan masukan untuk meminimalisir kekurangan yang ada, dan para peneliti berikutnya diharapkan pula dapat menindaklanjuti dan mengembangkannya agar didapatkan hasil yang lebih baik dan lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Ibu Ir. Carlina Soetjiono, Dipl. HE, APU atas arahan, bimbingan dan koreksinya sehingga karya tulis ilmiah ini dapat terwujud. Kepada Bapak Djoko Mudjihardjo, ME disampaikan terima kasih atas kritik, saran dan masukannya selama penelitian ini dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Balai Keamanan Bendungan, Ditjen Sumber Daya Air, 2003. *Pedoman Inspeksi Keamanan Bendungan*. Jakarta.
- Bemmelen, R. W. van, 1949. *The Geology of Indonesia*, Martinus Nijhoff, The Hague J/v. IA, General, Government Printing Office, the Netherlands.
- Brotodihardjo, Agus P.P., 1991. *Instrumentasi Geoteknik Dan Peranannya Dalam Keamanan Bendungan*, Jurnal Litbang Pengairan, ISSN 0215-1111. hlm. 44-56.
- Carlina Soetjiono, 2006. *Pengkajian Instrumentasi Geoteknik pada Bendungan Tipe Urugan*. Buletin PUSAIR Vol.XV No. 45, ISSN: 0852-5919.

- Carlina Soetjiono, 2009. *Penerapan metode indeks risiko untuk evaluasi tingkat keamanan bendungan urugan*. Prosiding Kolokium Hasil Litbang SDA Bekasi, ISSN: 1829-9644.
- Carlina Soetjiono & Najoan, T.F., 1993. *Instrumentasi Geoteknik dalam Evaluasi Keamanan Bendungan Tipe Urugan*. Jurnal Litbang Pengairan No.26; ISSN 0215-1111.
- Craig, R.F., 1983. *Soil Mechanics*. Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd., Dept. Of Civil Eng. University of Dundee, Third edition 1983.
- Djuri, M, Samodra, H, Amin, T. C. & Gafoer, S. 1996. *Peta Geologi Lembar Purwokerto dan Tegal, Jawa*. Skala 1:100.000. Puslitbang Geologi. Bandung.
- Dunncliff, John, 1988. *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons Inc.
- Najoan, T.F., 1991. *Ragam Kerusakan dan Cara Pengamanan Bendungan Tipe Urugan di Indonesia*. JICA, Training on Safety Evaluation of Dams, RIWRD Bandung.
- Najoan, T.F. & Carlina Soetjiono, 2006. *Tingkat Keamanan Bendungan di Jawa Vol.II: Jawa Tengah*. Puslitbang Sumber Daya Air, Bandung. 521 halaman; ISBN 979-3197-46-3 (Jilid 2).
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 37 Tahun 2010 tentang *Bendungan* (Lembaran Negara RI Tahun 2010 No. 45, Tambahan Lembaran Negara RI No. 5117). Presiden Republik Indonesia, ditetapkan di Jakarta, tanggal 18 Februari 2010.
- Puslitbang Sumber Daya Air, 2004. *Pengkajian dan Evaluasi Keamanan Bendungan Pasca Rehabilitasi Di Jawa Tengah*. Laporan Akhir Penelitian No. 03/P2TP & SP/2004.
- Puslitbang Sumber Daya Air, 2010. *Teknologi Revitalisasi Bangunan Air Utama Untuk Penanggulangan Kerusakan dan Peningkatan Fungsi*. Laporan Akhir Penelitian No. IK.03.01 / 02 / La-BHGK / 2010 (belum diterbitkan).
- Radhi Sinaro, Ibnu Kasiro, Brotodihardjo, Agus P.P. & Toto Widyarsono. 2007. *Menyimak Bendungan Di Indonesia (1910-2006)*. Bentara Adhi Cipta Indocamp. Jakarta. ISBN 979-3945-15-X.
- Reynolds, J.M. 1998. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York: John Willey and Sons.
- Singh, B & Sharma, H.D., 1976. *Earth And Rockfill Dams*. SMT. Savitri. Delhi.
- Telford, W.M., Gedaart, L.P. & Sheriff, R.E. 1990. *Applied Geophysics*. New York: Cambridge.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2004 tentang *Sumber Daya Air* (Lembaran Negara RI Tahun 2004 No. 32, Tambahan Lembaran Negara RI No. 4377). Presiden Republik Indonesia, disahkan dan diundangkan di Jakarta, tanggal 18 Maret 2004.