

# **EVALUASI KEAMANAN BENDUNGAN CIRATA DENGAN MENGUNAKAN INSTRUMENTASI GEOTEKNIK**

**Nama : Andi Pandu Pratama  
NRP : 0121074**

**Pembimbing : Theo F. Najoan, Ir., M.Eng.**

**UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA  
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN TEKNIK SIPIL  
BANDUNG**

---

## **ABSTRAK**

Bendungan Cirata adalah bendungan yang dibuat untuk membendung Sungai Citarum, terletak di desa Cadas Sari, Kabupaten Tegal Waru, Plered Purwakarta, Jawa Barat. Bendungan Cirata dibangun dengan dua tahapan, tahap pertama tingginya 125 m dan telah dipersiapkan untuk dapat dinaikkan menjadi 140 m pada tahap kedua. Bendungan ini didesain sebagai bendungan dengan permukaan pelat beton (*Concrete Faced Rockfill Dam*).

Salah satu cara untuk mengetahui tingkat keamanan bendungan adalah dengan menggunakan peralatan instrumentasi geoteknik yang terdiri dari instrumentasi tekanan air, instrumentasi deformasi, instrumentasi rembesan dan instrumentasi seismic. Skripsi ini membahas tekanan air pori yang diukur dengan alat Pizometer Pneumatik sebanyak 12 buah, memantau elevasi muka air yang diukur dengan alat *Ground Water Level* sebanyak 31 buah, memantau bocoran dan rembesan dengan menggunakan 1 buah V-notch, membahas deformasi dengan menggunakan patok geser pada parapet wall sebanyak 6 buah, dan 10 buah Perimetric Joint Meter untuk membahas pergerakan alat tersebut di dinding beton bendungan.

Dari pengamatan terhadap Pizometer, terlihat bahwa beton pada muka bendungan masih berperan baik, terlihat juga pada gambar garis freatik yang mengikuti pola pada desain. Deformasi vertikal yang terbesar terjadi pada puncak bendungan dengan total penurunan mencapai 18,7 cm yaitu pada A3, tetapi masih berada dalam range deformasi elastik. Untuk deformasi horizontal resultan yang terbesar terjadi pada A 3 sebesar 7,7 cm (11 Oktober 1999, 15 Mei 2000, dan Agustus 2004). A 3 terletak pada potongan K-K di puncak bendungan, dan masih terus mengalami deformasi horizontal. Debit rembesan sangat kecil hanya berkisar antara 8-12 l/detik sampai tahun 2004, sehingga masih dapat disimpulkan sangat aman. Pergerakan Perimetric Joint Meter masih dalam batas aman, terlihat pada debit bocoran yang kecil. Pergerakan normal maksimum terjadi di titik PJ-2 sebesar 7,63 mm ke arah atas dan di titik PJ-7 sebesar 65,667 mm ke arah bawah. Pergerakan perpendicular maksimum terjadi di titik PJ-9 terbuka sebesar 26,136 mm. Pergerakan parallel maksimum terjadi pada titik PJ-10 sebesar 21,8 mm ke arah kanan dan di titik PJ-2 sebesar 41,15 mm ke arah kiri.

Secara umum tingkat keamanan Bendungan Cirata masih ada dalam batas normal, dapat berfungsi sesuai dengan yang direncanakan. Tidak terlihat adanya gejala-gejala yang dapat membahayakan stabilitas bendungan. Tetapi tetap diperlukan pengontrolan dan pemantauan selama bendungan beroperasi.

# DAFTAR ISI

|                                                   | Halaman |
|---------------------------------------------------|---------|
| SURAT KETERANGAN TUGAS AKHIR .....                | i       |
| SURAT KETERANGAN SELESAI TUGAS AKHIR .....        | ii      |
| ABSTRAK .....                                     | iii     |
| PRAKATA .....                                     | iv      |
| DAFTAR ISI .....                                  | vi      |
| DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN .....                 | xi      |
| DAFTAR GAMBAR .....                               | xiii    |
| DAFTAR TABEL .....                                | xviii   |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....                           | 1       |
| 1.1 Latar Belakang Masalah .....                  | 1       |
| 1.2 Maksud dan Tujuan Studi .....                 | 2       |
| 1.3 Ruang Lingkup Pembahasan .....                | 3       |
| 1.4 Sistematika Pembahasan .....                  | 4       |
| BAB 2 STUDI LITERATUR BENDUNGAN TIPE URUGAN ..... | 7       |
| 2.1 Bendungan Tipe Urugan .....                   | 7       |
| 2.1.1 Klasifikasi Bendungan Tipe Urugan .....     | 8       |
| 2.1.2 Karakteristik Bendungan Urugan .....        | 13      |
| 2.1.3 Perencanaan Teknik Pondasi .....            | 15      |
| 2.1.4 Perencanaan Teknis Bendungan .....          | 18      |
| 2.2 Kestabilan Lereng .....                       | 19      |
| 2.2.1 Penyebab Gerakan Tanah Longsor .....        | 20      |

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.2 Analisis Kestabilan Lereng .....                            | 21        |
| 2.2.2.1 Faktor Keamanan (FK) .....                                | 21        |
| 2.3 Proses Konsolidasi .....                                      | 24        |
| 2.4 Aliran Dalam Tanah .....                                      | 26        |
| 2.4.1 Permeabilitas .....                                         | 28        |
| 2.4.2 Penentuan Koefisien Permeabilitas .....                     | 28        |
| 2.4.3 Gradien Hidraulik .....                                     | 31        |
| 2.5 Kuat Geser Tanah .....                                        | 32        |
| 2.5.1 Kriteria Keruntuhan Menurut Mohr-Coulomb .....              | 32        |
| <b>BAB 3 JENIS INSTRUMENTASI GEOTEKNIK PADA</b>                   |           |
| <b>BENDUNGAN .....</b>                                            | <b>35</b> |
| 3.1 Alat Instrumentasi .....                                      | 39        |
| 3.2 Alat Ukur Tekanan Pisometer .....                             | 40        |
| 3.2.1 Sumur Observasi .....                                       | 40        |
| 3.2.2 Pisometer Pipa Tegak Terbuka .....                          | 41        |
| 3.2.3 Pisometer Hidraulik Tabung Ganda .....                      | 42        |
| 3.2.4 Pisometer Pneumatik .....                                   | 43        |
| 3.2.5 Pisometer Kawat Getar ( <i>Vibrating Wire Pizometer</i> ).. | 45        |
| 3.2.6 Pisometer Tahanan Listrik .....                             | 45        |
| 3.3 Alat Ukur Deformasi .....                                     | 48        |
| 3.3.1 Metode Survei ( <i>External Deformation</i> ) .....         | 49        |
| 3.3.2 Alat Probe Extensometer .....                               | 50        |
| 3.3.2.1 Alat duga lengan melintang ( <i>Crossarm gage</i> )       | 51        |
| 3.3.2.2 Probe mekanik ( <i>Probe mechanical</i> ) .....           | 52        |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2.3 Alat duga koil induksi ( <i>Induction coil gage</i> )..                         | 52 |
| 3.3.2.4 Alat duga magnit kabel bertombol ( <i>Magnit /<br/>reel switch gage</i> ) ..... | 53 |
| 3.3.3 Alat Ukur Ekstensometer Timbunan Tetap .....                                      | 54 |
| 3.3.3.1 Pelat penurunan ( <i>Settlement plate</i> ) .....                               | 55 |
| 3.3.3.2 Pelat tertanam .....                                                            | 55 |
| 3.3.3.3 Alat duga listrik dengan tranduser<br>perpindahan linier .....                  | 56 |
| 3.3.4 Alat Ukur Penurunan Lapisan Bawah Permukaan ....                                  | 57 |
| 3.3.5 Alat Ukur Ekstensometer Lubang Bor Tetap .....                                    | 57 |
| 3.3.6 Inklinometer .....                                                                | 58 |
| 3.3.7 Alat Ukur Duga Batas Cairan ( <i>Liquid level gages</i> ) ...                     | 60 |
| 3.4 Alat Ukur Tegangan Total .....                                                      | 61 |
| 3.4.1 Sel Tekanan Tanah yang Tertanam .....                                             | 61 |
| 3.4.2 Sel Tekanan Tanah Kontak .....                                                    | 62 |
| 3.5 Alat Ukur Temperatur .....                                                          | 62 |
| 3.6 Alat Ukur Kegempaan .....                                                           | 64 |
| 3.6.1 Aselerograf .....                                                                 | 64 |
| 3.6.1.1 Aselerograf analog .....                                                        | 65 |
| 3.6.1.2 Aselerograf digital .....                                                       | 66 |
| 3.6.2 Alat Alarm Percepatan Gempa ( <i>Seismic Alarm<br/>Device= SAD</i> ) .....        | 67 |
| 3.6.3 Alat Pencatat Percepatan Gempa Puncak<br>(Nonelektronik) .....                    | 67 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 3.7 Alat Ukur Rembesan Di Hilir Bendungan .....                 | 68  |
| 3.7.1 Ambang .....                                              | 68  |
| 3.7.2 Alat Ukur Parshall Flumes .....                           | 69  |
| 3.7.3 Kotak ( <i>Container</i> ) Tampung yang Dikalibrasi ..... | 70  |
| 3.7.4 Alat Ukur Kecepatan .....                                 | 70  |
| 3.7.5 Alat Ukur Pemantau Panas .....                            | 70  |
| 3.7.6 Alat Duga Curah Hujan .....                               | 71  |
| 3.7.7 Alat Duga Muka Air .....                                  | 71  |
| BAB 4 STUDI KASUS .....                                         | 72  |
| 4.1 Deskripsi Proyek .....                                      | 72  |
| 4.2 Tekanan Air Pori .....                                      | 76  |
| 4.2.1 Pisometer Pneumatik .....                                 | 76  |
| 4.2.1.1 Potongan melintang G-G .....                            | 78  |
| 4.2.1.2 Potongan melintang K-K .....                            | 79  |
| 4.2.1.3 Potongan melintang N-N .....                            | 85  |
| 4.2.1.4 Potongan melintang R-R .....                            | 89  |
| 4.2.1.5 Potongan melintang U-U .....                            | 93  |
| 4.2.2 <i>Ground Water Level Observation Well</i> .....          | 97  |
| 4.2.3 Penjelasan Tekanan Air Pori .....                         | 101 |
| 4.2.3.1 Penjelasan dari gambar dan grafik Pisometer .....       | 101 |
| 4.2.3.2 Penjelasan dari grafik <i>Observation Well</i> .....    | 102 |
| 4.3 Deformasi .....                                             | 102 |
| 4.3.1 Deformasi Vertikal .....                                  | 103 |
| 4.3.2 Deformasi Horizontal .....                                | 108 |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 4.3.3 Penjelasan Deformasi .....              | 113 |
| 4.3.3.1 Penjelasan deformasi vertikal .....   | 113 |
| 4.3.3.2 Penjelasan deformasi horizontal ..... | 114 |
| 4.4 Rembesan .....                            | 114 |
| 4.5 Joint Meter .....                         | 118 |
| 4.5.1 Penjelasan Perimetric Joint Meter ..... | 131 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....              | 132 |
| 5.1 Kesimpulan .....                          | 132 |
| 5.2 Saran .....                               | 134 |
| DAFTAR PUSTAKA .....                          | xix |
| LAMPIRAN .....                                | xx  |

## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

|          |                                                   |
|----------|---------------------------------------------------|
| $A$      | = luas penampang tanah                            |
| $a$      | = luas penampang melintang pipa tegak             |
| AWLR     | = <i>Automatic Water Level Recorder</i>           |
| $c$      | = kohesi                                          |
| $c'$     | = kohesi efektif                                  |
| DCDT     | = <i>Direct Current Differensial Transformer</i>  |
| $F_c$    | = angka keamanan terhadap kohesi                  |
| $F_K$    | = angka keamanan terhadap kekuatan tanah          |
| $F_\phi$ | = angka keamanan terhadap sudut geser             |
| $g$      | = percepatan gravitasi                            |
| GWL      | = <i>Ground Water Level</i>                       |
| $h$      | = tinggi energi total                             |
| $i$      | = gradien hidrolik                                |
| $k$      | = koefisien rembesan                              |
| $k$      | = kecepatan aliran dalam tanah                    |
| $L$      | = panjang contoh tanah                            |
| $L$      | = panjang aliran dimana kehilangan energi terjadi |
| LVDT     | = <i>Linear Variable Differensial Transformer</i> |
| $p$      | = tekanan                                         |
| PLTA     | = Pembangkit Listrik Tenaga Air                   |
| $q$      | = debit rembesan                                  |

|            |                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------|
| Q          | = volume air yang dikumpulkan                                    |
| RTDs       | = <i>Resistance Temperature Devices</i>                          |
| RWL        | = <i>Reservoir Water Level</i>                                   |
| SAD        | = <i>Seismic Alrm Device</i>                                     |
| t          | = waktu yang digunakan untuk mengumpulkan air                    |
| u          | = tekanan pori                                                   |
| v          | = kecepatan                                                      |
| WES        | = <i>Waterways Experiment Station</i>                            |
| $\gamma_h$ | = kehilangan energi                                              |
| F          | = sudut geser dalam                                              |
| F'         | = sudut geser dalam efektif                                      |
| $\gamma_w$ | = berat volume air                                               |
| s          | = tegangan total                                                 |
| s'         | = tegangan efektif                                               |
| $s_v$      | = tegangan vertikal total                                        |
| $s_v'$     | = tegangan vertikal efektif                                      |
| $t_f$      | = kekuatan geser rata-rata dari tanah                            |
| $t_d$      | = tegangan geser rata-rata yang bekerja sepanjang bidang longsor |

## DAFTAR TABEL

|                                                                        | Halaman |
|------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabel 2.1 Harga-harga koefisien rembesan pada umumnya .....            | 31      |
| Tabel 3.1 Keuntungan dan keterbatasan alat ukur tekanan pisometrik ... | 46      |
| Tabel 3.2 Kategori alat ukur deformasi .....                           | 48      |
| Tabel 3.3 Perbandingan alat ukur temperature jarak jauh .....          | 63      |
| Tabel 4.1 Lokasi pisometer pneumatic .....                             | 77      |
| Tabel 4.2 Penjelasan masing-masing Pisometer pada Potongan K-K ....    | 82      |
| Tabel 4.3 Penjelasan masing-masing Pisometer pada Potongan N-N ....    | 87      |
| Tabel 4.4 Penjelasan masing-masing Pisometer pada Potongan R-R .....   | 91      |
| Tabel 4.5 Penjelasan masing-masing Pisometer pada Potongan U-U ....    | 95      |
| Tabel 4.6 Inisial pada masing-masing alat patok geser .....            | 102     |
| Tabel 4.7 Penjelasan tiap Patok Geser pada puncak .....                | 106     |
| Tabel 4.8 Inisial pada masing-masing alat patok geser .....            | 107     |
| Tabel 4.9 Pergerakan horizontal Patok Geser pada puncak .....          | 108     |
| Tabel 4.10 Penjelasan tiap Patok Geser pada puncak .....               | 111     |
| Tabel 4.11 Penjelasan tiap <i>Perimetric Joint Meter</i> .....         | 128     |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                            | Halaman |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Gambar 1.1 Diagram alir penelitian .....                                                                   | 6       |
| Gambar 2.1 Klasifikasi bendungan tipe urugan .....                                                         | 9       |
| Gambar 2.2 Potongan melintang bendungan urugan .....                                                       | 10      |
| Gambar 2.3 Potongan melintang bendungan zonal dengan tirai kedap<br>air .....                              | 11      |
| Gambar 2.4 Potongan melintang bendungan dengan inti kedap air<br>miring .....                              | 11      |
| Gambar 2.5 Bendungan urugan Zonal inti miring .....                                                        | 11      |
| Gambar 2.6 Potongan melintang bendungan urugan Zonal inti tegak ....                                       | 12      |
| Gambar 2.7 Potongan melintang bendungan tipe Zonal dengan inti<br>kedap air vertical .....                 | 12      |
| Gambar 2.8 rencana teknis bendungan sekat .....                                                            | 13      |
| Gambar 2.9 Grafik waktu pemampatan selama konsolidasi untuk suatu<br>penambahan beban yang diberikan ..... | 26      |
| Gambar 2.10 Uji rembesan dengan cara tinggi konstan .....                                                  | 29      |
| Gambar 2.11 Uji rembesan dengan cara tinggi jatuh .....                                                    | 30      |
| Gambar 2.12 (a) Kemiringan bidang keruntuhan dengan bidang utama<br>besar di dalam tanah .....             | 34      |
| Gambar 2.12 (b) Lingkaran Mohr dan garis keruntuhan .....                                                  | 34      |
| Gambar 3.1 Bagan pembagian alat-alat instrumentasi .....                                                   | 39      |
| Gambar 3.2 Skema sumur observasi (Dunnicliff 1988) .....                                                   | 41      |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.3 Skema pisometer pipa tegak (Dunnicliff 1988) .....                                                                  | 42 |
| Gambar 3.4 Skema pisometer hidraulik tabung ganda (Dunnicliff 1988) .....                                                      | 43 |
| Gambar 3.5 Skema alat pneumatic (Dunnicliff 1988) .....                                                                        | 43 |
| Gambar 3.6 Skema pisometer pneumatic tipe dorong setempat dalam<br>lubang bor (Dunnicliff 1988) .....                          | 44 |
| Gambar 3.7 Skema alat kawat getar (Dunnicliff 1988) .....                                                                      | 45 |
| Gambar 3.8 (a) Skema alat regangan perlawanan listrik kawat tidak<br>terikat (Dunnicliff 1988) .....                           | 46 |
| Gambar 3.8 (b) Skema alat regangan perlawanan listrik foil terikat<br>uniaxial (Dunnicliff 1988) .....                         | 46 |
| Gambar 3.8 (c) <i>Fully encapsulated submersible transducer</i> tekan .....                                                    | 46 |
| Gambar 3.9 Skema alat patok geser .....                                                                                        | 50 |
| Gambar 3.10 (a) Crossarm gage (Skema pipa) .....                                                                               | 51 |
| Gambar 3.10 (b) Crossarm gage (Probe pengukur) .....                                                                           | 51 |
| Gambar 3.11 Skema sondex probe ekstensometer ( <i>slope indicator</i><br><i>company</i> ) terpasang dalam lubang bor .....     | 53 |
| Gambar 3.12 (a) Alat ukur percepatan keseimbangan gaya ( <i>force</i><br><i>balance accelerometer</i> , Dunnicliff 1988) ..... | 54 |
| Gambar 3.12 (b) Skema alat ukur probe ekstensometer dengan magnet<br>kabel bertombol dipasang di dalam lubang bor .....        | 54 |
| Gambar 3.13 Alat pelat penurunan .....                                                                                         | 55 |
| Gambar 3.14 Skema alat ekstensometer timbunan tetap dengan<br><i>electrical linear displacement transducer</i> .....           | 56 |
| Gambar 3.15 Skema alat penurunan dengan ujung berspiral .....                                                                  | 57 |





|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gambar 4.25 Letak parapet wall pada bendungan .....                                                       | 102 |
| Gambar 4.26 Grafik deformasi vertikal pada puncak .....                                                   | 104 |
| Gambar 4.27 Grafik hubungan elevasi muka air waduk (RWL) dengan<br>deformasi vertikal pada puncak .....   | 106 |
| Gambar 4.28 Grafik deformasi horizontal pada puncak .....                                                 | 109 |
| Gambar 4.29 Grafik hubungan elevasi muka air waduk (RWL) dengan<br>deformasi horizontal pada puncak ..... | 111 |
| Gambar 4.30 (a) AWLR ( <i>Automatic Water Level Recorder</i> ) .....                                      | 115 |
| Gambar 4.30 (b) Triangular Weir (" <i>V</i> " <i>Notch Thompson</i> ) .....                               | 115 |
| Gambar 4.31 Letak AWLR dan " <i>V</i> " Notch pada bendungan .....                                        | 116 |
| Gambar 4.32 Grafik debit bocoran (Q) pada V-notch terhadap waktu<br>pengamatan .....                      | 117 |
| Gambar 4.33 Alat untuk membaca <i>Perimetric Joint Meter</i> .....                                        | 118 |
| Gambar 4.34 Letak <i>Perimetric Joint Meter</i> pada bendungan .....                                      | 119 |
| Gambar 4.35 Grafik hubungan pergerakan alat dan RWL dengan waktu                                          | 129 |