

Artikel Penelitian (Teknik Sipil)

Identifikasi Rembesan dan Lendutan Bendungan Mamak Menggunakan Metode Geolistrik dan Georadar dengan Solusi Penanganannya Menggunakan Geokomposit

Studi Kasus: Bendungan Mamak, Provinsi Nusa Tenggara Barat

Ekodjati Tunggulgeni¹, Prasetyo Oetomo³, Sayed Ahmad Fauzan¹, Ricky Harianja¹, Suprayogi², Joggi Theophilus Purba^{2*}, Siulan Bethar Supriyadi², William Mackleva Purba², Bana Aurelya Nandita Putri¹, Eric Falgano Cristob Siwabessy¹, Viyantri Agustin¹, Reyvan Marcel Pasaribu¹, Muhammad Yuflih Nurhafiyyan¹

¹Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia, 16810

²Prodi Rekayasa Sumber Daya Air, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia, 16810

³Konsultan Tenaga Ahli Geokomposite, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 28 Oktober 2025
Revisi Akhir: 03 Februari 2026
Diterbitkan Online: 28 Februari 2026

KATA KUNCI

Bendungan Urugan
Rembesan
Lendutan
Geolistrik
Georadar
Geokomposit

KORESPONDENSI (*)

E-mail: joggipurba095@gmail.com

A B S T R A K

Bendungan Mamak di Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Barat merupakan bendungan urugan batu yang mengalami indikasi lendutan pada daerah puncak *saddle dam 2* serta rembesan pada bukit tumpuan kanan hilir *saddle dam 2*. Investigasi lapangan dilakukan menggunakan metode geolistrik resistivitas dengan konfigurasi dipole-dipole serta metode *Ground Penetrating Radar (GPR)* pada lintasan yang berbeda untuk mengidentifikasi sumber permasalahan. Hasil geolistrik menunjukkan zona resistivitas rendah ($<25 \Omega \cdot m$) yang mengindikasikan keberadaan jalur rembesan aktif pada area bukit tumpuan kanan hilir *saddle dam 2*, sedangkan hasil GPR mendeteksi anomali refleksi berupa *blank zone* dan reflektor hiperbolik pada puncak *saddle dam 2* yang menunjukkan adanya deformasi atau lendutan. Penanganan direncanakan melalui pemasangan lapisan selimut kedap air geokomposit tiga lapis pada area rembesan serta penimbunan kembali pada bagian yang mengalami lendutan. Evaluasi stabilitas dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio (SEEP/W dan SLOPE/W). Hasil analisis menunjukkan bahwa sebelum penanganan, nilai *Factor of Safety (FK)* lereng berada pada kisaran 2,26–2,57 untuk kondisi statik dan 1,36–1,84 untuk kondisi gempa maksimum (MDE). Setelah penerapan geokomposit, nilai FK meningkat menjadi 2,30–3,26 pada kondisi statik dan 1,45–2,16 pada kondisi gempa, yang menunjukkan penurunan tekanan air pori dan peningkatan stabilitas lereng secara signifikan. Dengan demikian, penerapan geokomposit terbukti efektif dalam mengendalikan rembesan serta meningkatkan keamanan struktur bendungan terhadap deformasi dan potensi kegagalan jangka panjang.

PENDAHULUAN

Bendungan Mamak merupakan salah satu bendungan tipe urugan batu yang terletak di Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Barat. Bendungan Mamak berfungsi sebagai penyedia air irigasi bagi lahan pertanian di sekitarnya, sekaligus sebagai infrastruktur pengendali banjir yang berperan dalam menjaga kestabilan debit aliran sungai pada musim penghujan. Selain itu, bendungan ini juga dimanfaatkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) serta berperan dalam konservasi sumber daya air dengan meningkatkan muka air tanah yang memberi manfaat terhadap sumur-sumur penduduk di sekitar wilayah bendungan. Dengan peranan yang sangat strategis tersebut, keberlangsungan fungsi dan keamanan

struktur bendungan menjadi hal yang mutlak untuk dijaga. Seiring dengan berjalannya waktu, pengamatan lapangan menunjukkan adanya indikasi permasalahan berupa rembesan pada bukit tumpuan kanan hilir *saddle dam 2* serta lendutan pada daerah puncak *saddle dam 2*. Kondisi ini menunjukkan adanya potensi gangguan pada stabilitas tubuh bendungan yang apabila tidak segera ditangani dapat berujung pada penurunan kinerja bahkan kegagalan struktu.

Permasalahan rembesan dan lendutan pada bendungan urugan yang berusia di atas 20 tahun sering kali muncul akibat faktor internal dan eksternal. Untuk mendeteksi kondisi bawah permukaan tanpa merusak struktur, diperlukan metode investigasi yang mampu mengidentifikasi perubahan sifat fisik material secara detail. Dalam penelitian ini digunakan dua pendekatan geofisika, yaitu metode geolistrik dan georadar. Metode geolistrik dipilih karena kemampuannya dalam mendeteksi jalur rembesan air berdasarkan variasi nilai resistivitas batuan dan tanah, sementara georadar digunakan untuk mengidentifikasi adanya rongga atau deformasi (lendutan) di dalam tubuh bendungan. Kedua metode ini dilakukan pada lintasan yang berbeda, namun hasilnya saling mendukung dalam menggambarkan kondisi aktual di lapangan.

Metode geolistrik resistivitas dipilih karena efektif dalam memetakan distribusi kejenuhan air dan jalur rembesan pada kedalaman menengah hingga dalam, berdasarkan variasi nilai tahanan jenis material. Zona jenuh air atau jalur rembesan umumnya dicirikan oleh nilai resistivitas rendah akibat meningkatnya konduktivitas listrik pada material urugan yang terisi air. Oleh karena itu, metode ini sangat sesuai untuk mengidentifikasi rembesan internal yang tidak dapat diamati secara visual di permukaan. Sementara itu, metode GPR memiliki resolusi spasial yang tinggi terhadap perubahan sifat elektromagnetik material pada kedalaman dangkal, sehingga unggul dalam mendeteksi diskontinuitas, rongga kecil, penurunan densitas, dan deformasi internal seperti lendutan pada puncak bendungan. Namun, keterbatasan penetrasi gelombang radar pada material jenuh air menyebabkan metode ini kurang efektif untuk memetakan rembesan pada kedalaman yang lebih besar.

Hasil interpretasi menunjukkan bahwa metode geolistrik berhasil mengidentifikasi adanya zona rembesan yang berlokasi pada bukit tumpuan kanan hilir *saddle dam 2*, sedangkan georadar mendeteksi adanya deformasi berupa rongga atau *cave* pada daerah *saddle dam 2*. Kondisi ini menunjukkan bahwa bendungan mengalami permasalahan ganda, yaitu penurunan pada tubuh urugan serta potensi kehilangan air melalui jalur rembesan. Jika tidak segera ditangani, deformasi tersebut dapat berkembang menjadi rekahan yang memperbesar aliran rembesan dan meningkatkan risiko keruntuhan lokal. Berdasarkan hasil tersebut, diperlukan tindakan rehabilitasi yang mampu menekan laju rembesan dan memperbaiki kestabilan tubuh bendungan secara menyeluruh.

Solusi yang direncanakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pemasangan lapisan selimut kedap air berbahan geokomposit, yang berfungsi untuk meningkatkan nilai permeabilitas (nilai kekedapan air) sekaligus memperkuat zona urugan yang mengalami deformasi. Efektivitas dari rancangan perbaikan ini dievaluasi melalui analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak GeoStudio *SEEP/W* dan Geoslope, dengan tujuan untuk menilai sejauh mana penerapan geokomposit dapat meningkatkan keamanan bendungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan (FK) pada kondisi setelah rencana pemasangan geokomposit mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan kondisi eksisting, yang mengindikasikan bahwa solusi tersebut berpotensi efektif dalam mengurangi rembesan serta menambah stabilitas struktur bendungan.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar teknis bagi perencanaan dan pelaksanaan perbaikan bendungan urugan dengan permasalahan serupa di Indonesia. Selain itu, hasilnya memperlihatkan bahwa kombinasi investigasi geolistrik–georadar dengan penerapan lapisan geokomposit merupakan pendekatan yang efektif dan efisien dalam menangani permasalahan rembesan serta deformasi pada bendungan urugan. Dengan demikian, penerapan teknologi ini dapat mendukung upaya peningkatan keamanan bendungan nasional serta memperpanjang umur layanan infrastruktur sumber daya air di masa mendatang.

TINJAUAN PUSTAKA

Bendungan Urugan Batu

Bendungan urugan batu merupakan salah satu tipe bendungan yang banyak digunakan di Indonesia karena memanfaatkan material lokal dan memiliki fleksibilitas tinggi terhadap deformasi tanah dasar. Selain itu, hal ini disebabkan oleh posisi Indonesia berada di zona *Ring of Fire* sehingga rawan untuk terdampak gempa. Bendungan urugan dirancang untuk

menahan tekanan air dengan sistem lapisan material yang disusun berdasarkan sifat permeabilitas dan kekuatannya [1]. Stabilitas bendungan urugan sangat dipengaruhi oleh karakteristik material timbunan, material inti kedap air, zona filter, lapisan pelindung dan kekokohan pondasi bendungan. Kegagalan pada salah satu zona tersebut dapat menyebabkan deformasi, rembesan, dan jika tidak ada penanganan yang tepat dapat menimbulkan potensi keruntuhan bendungan (*Dam Failure*). Keruntuhan pada tubuh bendungan dapat terjadi karena lereng yang terlalu curam untuk menahan gaya geser [2]. Apabila gaya yang ditahan lebih kecil dibanding gaya yang mendorong maka menyebabkan keruntuhan lereng.

Permasalahan Rembesan dan Lendutan

Rembesan (*seepage*) merupakan aliran air yang menembus tubuh atau pondasi bendungan akibat perbedaan tekanan hidrolis antara sisi hulu dan hilir. Apabila tidak terkontrol, rembesan dapat menggerus material halus pada zona transisi dan memicu erosi internal (*piping*) yang menurunkan kestabilan [3]. Sementara itu, lendutan (*deformation*) merupakan perubahan bentuk tubuh bendungan akibat redistribusi beban, peningkatan tekanan air pori, atau penurunan daya dukung material pondasi yang dapat mengindikasikan gangguan struktur [4]. Kombinasi rembesan dan lendutan sering menjadi indikator dini potensi kegagalan bendungan, sehingga pemantauan geoteknik dan investigasi bawah permukaan menggunakan metode seperti geolistrik, georadar, serta instrumen *piezometer*, atau *inclinometer*, patok geser, *V-notch* dan instrumen bendungan lainnya sangat diperlukan untuk memastikan keamanan dan stabilitas bendungan [5].

Metode Geolistrik untuk Identifikasi Rembesan

Metode geolistrik merupakan teknik geofisika yang digunakan untuk memetakan variasi resistivitas bawah permukaan berdasarkan respon listrik batuan terhadap arus yang dialirkan. Metode geolistrik konfigurasi dipole–dipole efektif dalam mendeteksi zona rembesan karena air yang mengandung mineral terlarut memiliki resistivitas lebih rendah dibandingkan material urugan kering [6]. Hasil pemetaan resistivitas dapat digunakan untuk mengidentifikasi jalur rembesan dan area dengan potensi kehilangan air.

Metode Georadar (Ground Penetrating Radar) untuk mendeteksi lendutan

Metode georadar (GPR) bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi ke bawah permukaan, kemudian merekam pantulan gelombang dari lapisan atau objek dengan kontras dielektrik berbeda. Penerapan GPR pada bendungan mampu mendeteksi rongga, rekahan, serta deformasi internal tanpa perlu pengeboran [7]. Georadar menjadi pelengkap metode geolistrik karena memiliki resolusi tinggi terhadap perubahan kecil pada lapisan dangkal, seperti lendutan atau kerusakan zona inti bendungan.

Penggunaan Geokomposit sebagai Solusi Teknis

Geokomposit merupakan material sintesis hasil kombinasi geotekstil dan geomembran yang berfungsi sebagai lapisan kedap air sekaligus penguat zona urugan. Penerapan geokomposit dapat mengurangi laju rembesan hingga 90% dan meningkatkan faktor keamanan struktur terhadap deformasi [8]. Dalam konteks rehabilitasi bendungan, pemasangan geokomposit tiga lapis pada area rembesan mampu memperkuat integritas tubuh bendungan serta meningkatkan nilai faktor keamanan (*Factor of Safety*) berdasarkan simulasi stabilitas dengan perangkat lunak GeoStudio SEEP/W dan Geoslope.

Integrasi Metode Geofisika dan Solusi Rekayasa

Kombinasi metode geolistrik dan georadar memberikan gambaran komprehensif terhadap kondisi internal bendungan, baik dari aspek hidraulik maupun mekanik. Penelitian terbaru di Indonesia menunjukkan bahwa pendekatan multidisiplin ini efektif untuk mendiagnosis permasalahan rembesan dan deformasi secara non-destruktif [6];[7]. Integrasi hasil interpretasi geofisika dengan penerapan material geokomposit sebagai solusi teknis terbukti meningkatkan stabilitas dan memperpanjang umur layanan bendungan.

Tabel 1. Perbandingan Konfigurasi Geolistrik (Dipole–dipole, Wenner, dan Schlumberger)

Aspek Perbandingan	Dipole–Dipole	Wenner	Schlumberger
Susunan Elektroda	Elektroda arus dan potensial masing-masing berpasangan (dipole) dengan jarak antar dipole diperbesar	Elektroda disusun simetris dengan jarak sama	Elektroda arus berjauhan, elektroda potensial relatif dekat
Resolusi Lateral	Sangat tinggi	Rendah–sedang	Rendah
Resolusi Vertikal	Sedang	Baik	Sangat baik (sounding)
Sensitivitas terhadap Anomali Sempit (jalur rembesan, zona lemah)	Sangat baik	Kurang sensitif	Kurang sensitif
Kedalaman Investigasi	Sedang	Dangkal–sedang	Dalam
Tingkat Noise Data	Relatif tinggi	Rendah	Rendah
Kesesuaian untuk Bendungan Urugan	Sangat sesuai (heterogen, jalur lateral)	Kurang optimal	Kurang optimal
Tujuan Utama	Pemetaan variasi lateral resistivitas	Pemetaan lapisan homogen	Investigasi stratigrafi vertikal
Alasan Pemilihan pada Penelitian Ini	Mampu mengidentifikasi jalur rembesan lateral dan zona lemah pada tubuh bendungan	Resolusi lateral terbatas	Fokus vertikal, kurang menangkap anomali lateral

Perbandingan Sistem Geokomposit Tiga Lapis dan Metode Grouting

Pengendalian rembesan pada bendungan urugan dapat dilakukan dengan berbagai metode, di antaranya sistem geokomposit tiga lapis dan metode grouting konvensional. Sistem geokomposit tiga lapis bekerja dengan membentuk lapisan kedap air yang kontinu pada sisi hulu bendungan, sehingga mampu menurunkan permeabilitas secara menyeluruh dengan nilai yang sangat rendah ($<10^{-9}$ m/s). Keberadaan *Geosynthetic Clay Liner* (GCL) memberikan mekanisme *self-sealing* melalui pengembangan bentonit ketika jenuh air, yang memungkinkan penutupan celah mikro dan retakan kecil secara alami. Selain itu, sistem ini relatif minim gangguan terhadap struktur eksisting dan menunjukkan kinerja yang stabil dalam jangka panjang.

Sebaliknya, metode grouting konvensional mengandalkan injeksi material ke dalam rekahan atau pori tanah secara lokal, sehingga efektivitasnya sangat bergantung pada kondisi material dan pola rekahan yang ada. Pada bendungan urugan yang bersifat heterogen, grouting sering kali tidak mampu membentuk penghalang kedap air yang kontinu dan berpotensi mengalami penurunan efektivitas seiring waktu. Proses pengeboran dan injeksi bertekanan juga berisiko menimbulkan gangguan tambahan pada tubuh bendungan. Oleh karena itu, untuk kasus rembesan yang bersifat luas dan berkaitan dengan kejenuhan material urugan, sistem geokomposit tiga lapis dinilai lebih efektif dan andal dibandingkan metode grouting konvensional.

METODOLOGI

Metodologi penelitian ini disusun mengikuti alur investigasi lapangan dan analisis pemodelan secara berurutan untuk mengidentifikasi permasalahan rembesan dan lendutan pada Bendungan Mamak serta mengevaluasi efektivitas solusi penanganannya. Tahap awal penelitian diawali dengan investigasi lapangan menggunakan metode geolistrik resistivitas dan *Ground Penetrating Radar* (GPR) untuk memperoleh gambaran kondisi bawah permukaan bendungan. Metode geolistrik digunakan untuk mengidentifikasi distribusi kejenuhan air dan potensi jalur rembesan pada kedalaman menengah hingga dalam, sedangkan GPR difokuskan pada deteksi diskontinuitas dangkal dan deformasi internal seperti lendutan pada puncak bendungan.

Hasil interpretasi data geofisika selanjutnya digunakan sebagai dasar penentuan zona permasalahan dan penetapan parameter awal dalam pemodelan numerik. Analisis pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio dengan modul SEEP/W untuk mengevaluasi pola aliran rembesan dan distribusi tekanan air pori, serta modul SLOPE/W

untuk menganalisis stabilitas lereng melalui perhitungan nilai *Factor of Safety* (FK). Pemodelan dilakukan pada kondisi sebelum dan sesudah penerapan sistem geokomposit guna menilai pengaruh penanganan terhadap penurunan rembesan dan peningkatan stabilitas bendungan.

Lokasi dan Kondisi Bendungan Mamak

Bendungan Mamak terletak di Desa Mamak, Kecamatan Lopok, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat (koordinat sekitar 8°41'29" S, 117°34'37" E). Bendungan ini merupakan waduk irigasi utama di wilayah tersebut dan memiliki kapasitas tampung mendekati 30 juta m³ dengan luas genangan ratusan hektare, sehingga berperan penting bagi ketersediaan air irigasi dan pengendalian banjir di daerah sekitarnya. Lokasi, elevasi lahan sekitar 95 mdpl, dan informasi administratif dapat dikonfirmasi lewat peta lokasi dan inventaris bendungan nasional.

Studi kasus ini berfokus pada Bendungan Mamak, yang secara struktural dikategorikan sebagai bendungan urugan batu (*rockfill dam*) dengan inti kedap air (*clay core*). Data dasar terkait parameter desain, dimensi geometrik, dan konfigurasi pasca konstruksi dari dokumen teknis proyek dan laporan penyiapan dan penetapan izin operasi bendungan. Pemilihan area ini didasarkan pada temuan lapangan mengenai indikasi rembesan (*seepage*) dan perubahan kondisi permukaan, yang menandakan adanya potensi kerentanan geoteknik dan perlunya tindakan perbaikan.

Pemeriksaan geofisika (geolistrik/ ERT dan GPR) yang dilakukan dalam studi internal mengidentifikasi zona resistivitas rendah dan anomali refleksi yang dikorelasi dengan manifestasi rembesan di hilir bukit tumpuan kanan *saddle dam* 2. Hasil interpretasi ini menjadi dasar keputusan pemasangan lapisan selimut kedap air geokomposit pada sisi hulu bendungan sebagai solusi remedial untuk mengendalikan potensi rembesan air dan lendutan.

Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini meliputi beberapa langkah sistematis yang dimulai dari studi literatur, pengumpulan data, analisis geofisika, hingga evaluasi teknis geokomposit. Tahap awal dilakukan dengan menelaah laporan dan referensi terdahulu terkait Bendungan Mamak, termasuk hasil pemeriksaan besar untuk PPIO (Penyiapan dan Penetapan Izin Operasi) bendungan dan laporan geolistrik-georadar. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data sekunder berupa hasil pengukuran resistivitas dan data *Ground Penetrating Radar* (GPR) untuk mengidentifikasi indikasi jalur rembesan pada area tumpuan kanan *Saddle Dam* 2.

Metode Geolistrik

Metode geolistrik merupakan salah satu metode geofisika bawah permukaan yang digunakan untuk mengidentifikasi variasi sifat kelistrikan batuan dan tanah berdasarkan nilai tahanan jenis (resistivitas). Prinsip dasar metode ini adalah menginjeksikan arus listrik (I) ke dalam tanah melalui sepasang elektroda arus (*current electrodes*) dan mengukur beda potensial listrik (ΔV) yang dihasilkan pada elektroda potensial (*potential electrodes*). Rasio antara beda potensial terhadap arus yang diinjeksikan digunakan untuk menghitung resistivitas semu (ρ_a) menurut persamaan:

$$\rho_a = kx \Delta V / I$$

Dalam kegiatan penyelidikan di Bendungan Mamak, digunakan metode resistivitas konfigurasi *Wenner-Schlumberger*, karena konfigurasi ini memiliki sensitivitas yang baik terhadap variasi lateral maupun vertikal tahanan jenis, serta mampu menghasilkan resolusi spasial yang optimal untuk mendeteksi jalur rembesan air pada tubuh bendungan [9];[10]. Metode ini secara umum lebih stabil terhadap noise lapangan dan mampu memetakan zona jenuh air maupun rongga material berpori di bawah permukaan.

Interpretasi dilakukan dengan mengaitkan distribusi nilai resistivitas dengan karakteristik litologi lokal dan kondisi kejenuhan air. Berdasarkan teori geofisika kelistrikan, nilai resistivitas rendah (<100 $\Omega \cdot m$) mengindikasikan material berpori jenuh air seperti lempung atau pasir jenuh, sedangkan nilai resistivitas tinggi (>1000 $\Omega \cdot m$) menunjukkan material kering atau batuan dasar yang padat [11];[12]. Pada konteks bendungan, zona dengan resistivitas rendah diinterpretasikan sebagai jalur rembesan potensial, sementara resistivitas tinggi menandakan bagian tubuh bendungan yang stabil dan kedap air.

Metode Georadar

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mendeteksi kondisi bawah permukaan berdasarkan sifat elektromagnetik suatu material. Prinsip kerja metode ini adalah dengan memancarkan gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi (1–1000 MHz) ke dalam tanah melalui antena pemancar (*transmitter*). Gelombang ini akan dipantulkan kembali ke permukaan ketika menemui batas antar lapisan dengan kontras konstanta dielektrik, dan sinyal pantul tersebut kemudian ditangkap oleh antena penerima (*receiver*).

Lapisan dengan reflektor kuat dan pola gelombang tidak kontinu diinterpretasikan sebagai zona yang mengalami perubahan kelembaban tinggi atau jalur rembesan aktif, sedangkan lapisan dengan reflektor lemah dan kontinu menunjukkan material yang padat serta homogen. Hasil interpretasi georadar kemudian dikorelasikan dengan data geolistrik untuk memperkuat penentuan lokasi dan kedalaman jalur rembesan yang terjadi pada tubuh dan tumpuan Bendungan Mamak.

Perencanaan Desain Geokomposit

Direncanakan lapisan selimut kedap air geokomposit pada Bendungan Mamak yang bertujuan untuk mengatasi rembesan pada area bukit tumpuan kanan *Saddle Dam 2*. Desain sistem geokomposit dirancang secara berlapis untuk mencapai fungsi kedap air yang optimal dengan tetap memperhatikan kondisi eksisting struktur bendungan. Tujuan utama rancangan ini adalah mengurangi intensitas rembesan (*seepage*) dan meningkatkan stabilitas hidrolik pada area hulu bendungan. Setiap lapisan memiliki fungsi spesifik yang saling melengkapi sehingga membentuk sistem penghalang air yang efektif dan tahan terhadap kondisi lapangan.

Secara umum, susunan lapisan geokomposit terdiri atas empat komponen utama sebagai berikut:

1. *Geomembrane* (Lapisan Kedap Air Utama)
Lapisan ini berfungsi sebagai barrier utama terhadap pergerakan air. *Geomembrane* berbahan dasar *High Density Polyethylene* (HDPE) digunakan karena memiliki impermeabilitas tinggi, ketahanan terhadap sinar ultraviolet, dan daya tahan jangka panjang terhadap kondisi lingkungan ekstrem [8].
2. *Geotextile Non-woven* (Lapisan Pelindung)
Lapisan geotekstil non-woven ditempatkan di bawah *geomembrane* untuk melindungi dari gesekan, tekanan mekanis, dan potensi kerusakan akibat material kasar dari lapisan dasar. Selain itu, geotekstil juga berfungsi sebagai lapisan transisi yang mendistribusikan beban secara merata di antara lapisan geokomposit [13]
3. *Geosynthetic Clay Liner* (GCL)
Lapisan GCL terdiri dari bentonit alami yang diapit antara dua lapisan geotekstil dan berfungsi memperkuat daya kedap air melalui mekanisme *swelling*. Saat jenuh air, bentonit membentuk gel yang menghambat infiltrasi, sehingga meningkatkan efektivitas sistem kedap air secara keseluruhan [14].
4. Lapisan pelindung batu (*Riprap Protection Layer*)
Lapisan pelindung batu diletakkan di bagian paling atas untuk melindungi sistem geokomposit dari gaya hidrodinamik, gelombang, dan potensi erosi permukaan. Penggunaan riprap juga membantu menjaga stabilitas lereng hulu terhadap pengaruh gelombang air dan fluktuasi muka air waduk [1].

Desain berlapis ini diterapkan secara sistematis berdasarkan analisis kondisi geoteknik, topografi lereng hulu, serta data rembesan hasil investigasi geofisika (ERT dan GPR) di Bendungan Mamak. Integrasi antara fungsi kedap air dan ketahanan mekanis diharapkan mampu meminimalkan rembesan serta meningkatkan umur operasional struktur bendungan.

Evaluasi Stabilitas dengan GeoStudio

Evaluasi stabilitas pada bendungan Mamak dilakukan menggunakan perangkat lunak GeoStudio dengan modul SEEP/W dan Geoslope. Analisis ini bertujuan untuk mempelajari kondisi rembesan dan distribusi tekanan air pori pada tubuh bendungan sebelum dan sesudah pemasangan lapisan selimut kedap air geokomposit, sehingga dapat diketahui efektivitas perbaikan terhadap kestabilan struktur bendungan

Prinsip Analisis SEEP/W dan Geoslope

Modul SEEP/W digunakan untuk menganalisis aliran rembesan (seepage flow) pada media jenuh dan tak jenuh melalui pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga (*finite element method*). Program ini menghitung distribusi head hidrolik, garis freatik, dan fluks rembesan (Q) berdasarkan karakteristik permeabilitas tanah, batas hidrolik, serta geometri tubuh bendungan.

Persamaan dasar yang digunakan dalam analisis ini adalah bentuk umum dari hukum Darcy untuk aliran dua dimensi, yaitu:

$$q = -k \frac{dh}{dl}$$

(q) = laju aliran per satuan lebar (m³/s/m),

(k) = koefisien permeabilitas (m/s),

$\frac{dh}{dl}$ = gradien hidrolik.

Analisis dilakukan dalam dua kondisi untuk mengetahui pengaruh perbaikan, yaitu sebelum dan sesudah pemasangan geokomposit.

Perangkat lunak GeoSlope digunakan untuk membantu analisis perilaku tanah dan air tanah secara terpadu melalui beberapa modul, antara lain SEEP/W untuk analisis rembesan dan SLOPE/W untuk analisis stabilitas lereng. Prinsip kerja GeoSlope didasarkan pada penerapan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dan metode keseimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*), yang memungkinkan simulasi kondisi nyata di lapangan secara numerik.

Dalam penelitian ini, hasil analisis SEEP/W berupa distribusi tekanan pori dan garis freatik digunakan sebagai input ke SLOPE/W untuk menghitung faktor keamanan lereng (*Factor of Safety*) pada dua kondisi, yaitu sebelum dan sesudah pemasangan geokomposit.

Pemasangan geokomposit berfungsi sebagai sistem drainase yang mempercepat aliran air dan menurunkan tekanan pori di dalam tubuh tanah. Penurunan tekanan pori ini akan meningkatkan gaya penahan (*resisting forces*) terhadap gaya penggerak (*driving forces*), sehingga meningkatkan stabilitas lereng.

Hasil analisis GeoSlope kemudian digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana pemasangan geokomposit memberikan pengaruh terhadap:

1. Perubahan pola aliran dan distribusi tekanan pori (hasil SEEP/W), serta
2. Perubahan nilai faktor keamanan (hasil SLOPE/W).

Kondisi Sebelum Pemasangan Geokomposit

Pemodelan awal menggambarkan kondisi eksisting bendungan tanpa perbaikan. Parameter input yang digunakan berasal dari hasil uji geolistrik dan georadar, yang menunjukkan variasi nilai resistivitas bawah permukaan. Nilai resistivitas ini kemudian dikonversi menjadi koefisien permeabilitas (k) dengan kisaran 10^{-5} hingga 10^{-6} m/s untuk lapisan inti dan filter.

Kondisi batas (*boundary condition*) ditetapkan sebagai berikut:

1. Batas hulu: muka air waduk pada elevasi maksimum operasional (EMAW),
2. Batas hilir: muka air di kaki bendungan,
3. Lapisan tubuh bendungan: dibagi menjadi zona inti, filter, transisi, dan batuan pilihan.

Hasil simulasi awal menunjukkan garis freatik menembus hingga sisi hilir dengan tekanan air pori tinggi pada tumpuan

kanan *Saddle dam 2*. Pola ini menunjukkan adanya rembesan aktif yang berpotensi mengurangi stabilitas lereng hilir dan mempercepat terjadinya erosi internal (*piping*).

Kondisi Setelah Pemasangan Geokomposit

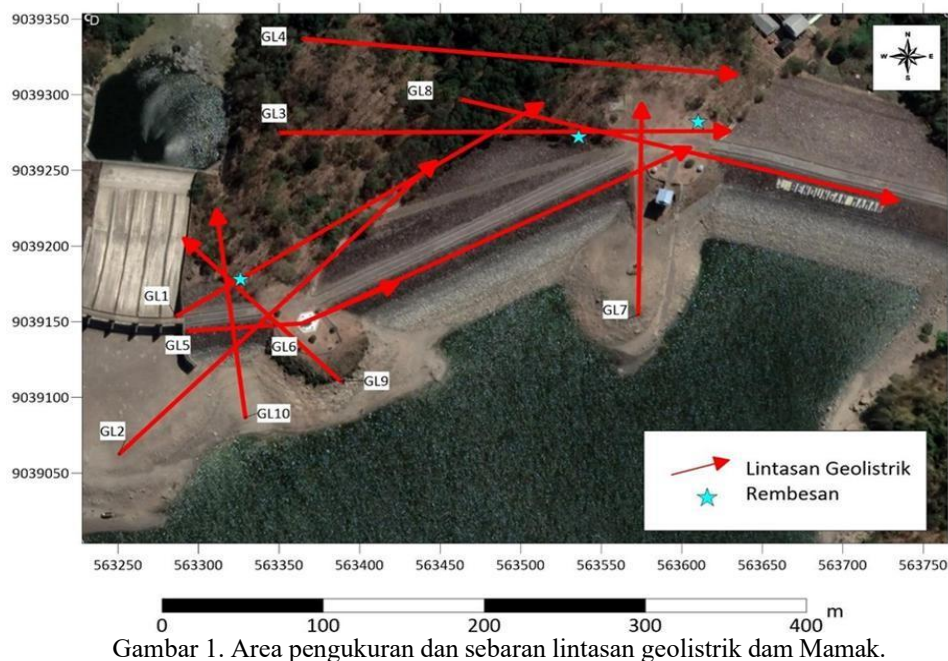
Analisis lanjutan dilakukan setelah penerapan lapisan selimut kedap air geokomposit di sisi hulu bendungan dan bukit tumpuan kanan. Rencana desain lapisan geokomposit terdiri atas:

1. Geosynthetic Clay Liner (GCL) – lapisan tanah liat sintetis kedap air,
2. Geomembrane HDPE – lapisan utama penahan rembesan
3. Geotekstil non-woven – lapisan pelindung terhadap kerusakan mekanis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hasil Investigasi Geolistrik

Investigasi geolistrik di Bendungan Mamak dilakukan untuk mengidentifikasi pola distribusi resistivitas bawah permukaan, yang merepresentasikan kondisi material urugan, zona jenuh air, serta jalur rembesan yang berpotensi memengaruhi kestabilan tubuh bendungan. Pengukuran dilakukan pada 10 lintasan (GL1–GL10) dengan menggunakan konfigurasi Dipole–Dipole dan jarak antar elektroda 6 meter. Sebagian lintasan menggunakan 48 elektroda, sedangkan lintasan dengan keterbatasan area menggunakan 24 elektroda. Posisi lintasan diatur melintang tubuh bendungan.

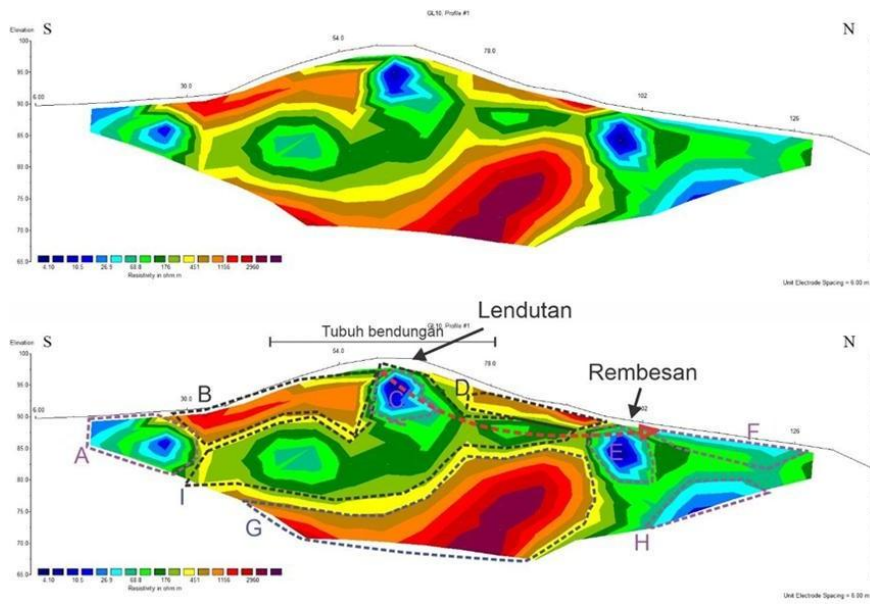


Gambar 1. Area pengukuran dan sebaran lintasan geolistrik dam Mamak.

Nilai resistivitas hasil inversi dua dimensi bervariasi antara 15 Ωm hingga 80 Ωm , menunjukkan perbedaan kontras antara lapisan batuan keras, zona jenuh air, dan lapisan urugan yang mengalami degradasi kekuatan. Secara umum, zona dengan resistivitas rendah (<25 Ωm) diinterpretasikan sebagai area jenuh air atau jalur rembesan, sedangkan zona resistivitas tinggi (>60 Ωm) merepresentasikan material urugan padat dan relatif kedap air.

Lintasan GL10 (Zona Rembesan Hilir Saddle Dam 2)

Lintasan GL10 terletak di bagian barat area penelitian dengan orientasi selatan–utara, melintasi area rembesan dan lendutan di Saddle Dam 2.



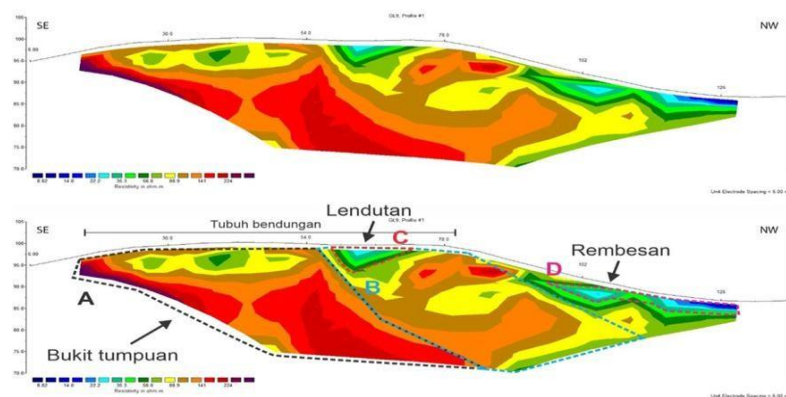
Gambar 2. (atas) Penampang dan (bawah) interpretasi geolistrik lintasan 10 (GL10)

Interpretasi menunjukkan zona resistivitas tinggi di bagian bawah tubuh bendungan (zona G) yang mewakili material padat, sedangkan zona I (resistivitas menengah) menunjukkan material berpori dan kurang kedap air. Zona E memperlihatkan anomali resistivitas rendah yang diinterpretasikan sebagai jalur rembesan aktif menuju sisi hilir bendungan. Air dari waduk (zona A) diperkirakan mengalir melalui zona lemah (zona I) dan keluar melalui zona E, dengan kontribusi tambahan dari area lendutan (zona C)

Lintasan GL9 (Korelasi Lendutan dengan Rembesan)

Lintasan GL9 berarah tenggara–barat laut dan juga melintasi *Saddle Dam 2*. Nilai resistivitas tinggi (>60 Ωm) di bagian tenggara (zona A) menunjukkan material urugan yang masih kompak, sedangkan penurunan resistivitas di bagian tengah (zona B, 20–30 Ωm) mengindikasikan material jenuh air akibat infiltrasi vertikal.

Zona ini bertepatan dengan area lendutan yang terekam di permukaan, sehingga dapat disimpulkan bahwa deformasi lentur (settlement) telah menciptakan ruang berpori yang mempercepat aliran rembesan. Di sisi barat laut, zona D memperlihatkan penurunan resistivitas lebih lanjut, menunjukkan kemungkinan keluarnya aliran rembesan dari tubuh bendungan menuju area hilir.

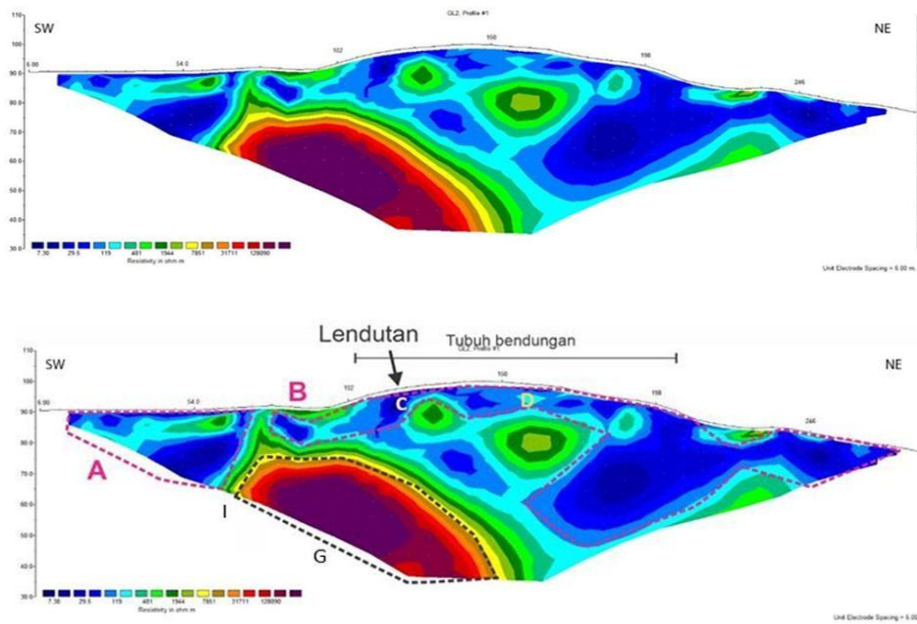


Gambar 3. (atas) Penampang dan (bawah) interpretasi geolistrik lintasan 9 (GL9)

Lintasan GL2 (Jalur Air dari Hulu menuju Hilir)

Lintasan GL2 sepanjang 288 meter melintasi tubuh utama bendungan dari barat daya ke timur laut, mencakup area waduk, <https://doi.org/10.56211/blendsains.v4i4.1346>

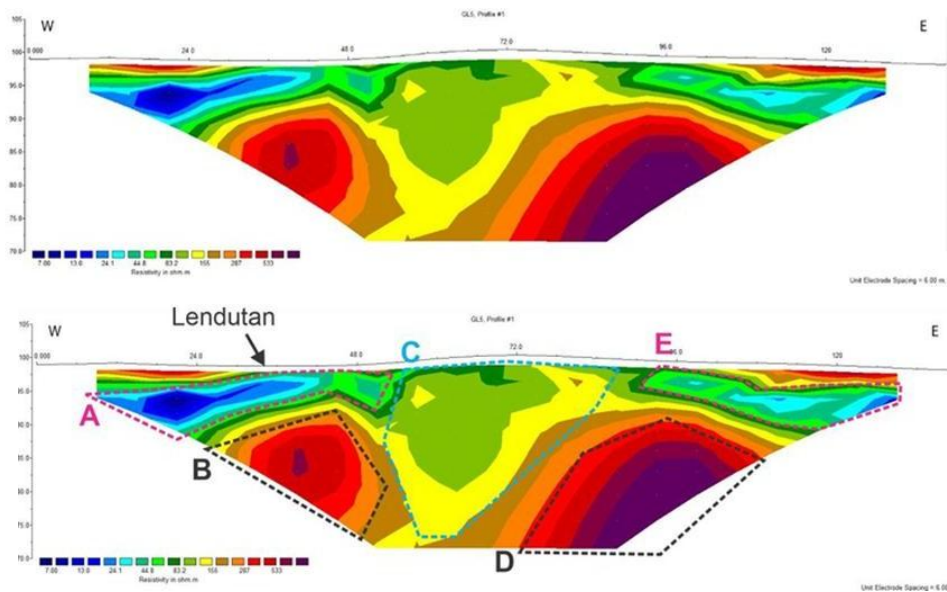
puncak bendungan, hingga zona lendutan. Hasil penampang memperlihatkan zona resistivitas tinggi (zona C, >70 Ωm) di bagian bawah, yang diinterpretasikan sebagai batuan dasar atau inti kedap air, sedangkan bagian atas (zona A dan B, <25 Ωm) menunjukkan akumulasi air rembesan dan zona jenuh dengan kedalaman hingga ±50 meter. Kehadiran zona jenuh air di bagian atas dam memperkuat indikasi bahwa air waduk merembes melalui lapisan urugan yang mengalami penurunan kepadatan, menyebabkan softening pada lapisan atas dan memicu deformasi permukaan (lendutan).



Gambar 4. (atas) Penampang dan (bawah) interpretasi geolistrik lintasan 2 (GL2).

Lintasan GL5 – Anomali Kelemahan Material di Tubuh Bendungan

Lintasan GL5 berarah barat–timur dan melintasi area tengah bendungan, berdekatan dengan *Saddle Dam 2*. Zona resistivitas tinggi (zona B dan D, >60 Ωm) menggambarkan material urugan yang masih padat, sedangkan zona C (35–45 Ωm) menunjukkan penurunan kekuatan mekanik. Perbedaan ini mengindikasikan adanya degradasi material akibat jenuh air dan beban siklik akibat fluktuasi muka air waduk. Pada bagian barat, zona A menampilkan nilai resistivitas rendah (<20 Ωm) yang diasosiasikan dengan genangan akibat air hujan dan rembesan lateral. Di bagian tengah bawah (zona E), ditemukan indikasi kantung air yang dapat memperlemah daya dukung tubuh bendungan dan meningkatkan risiko deformasi lokal.

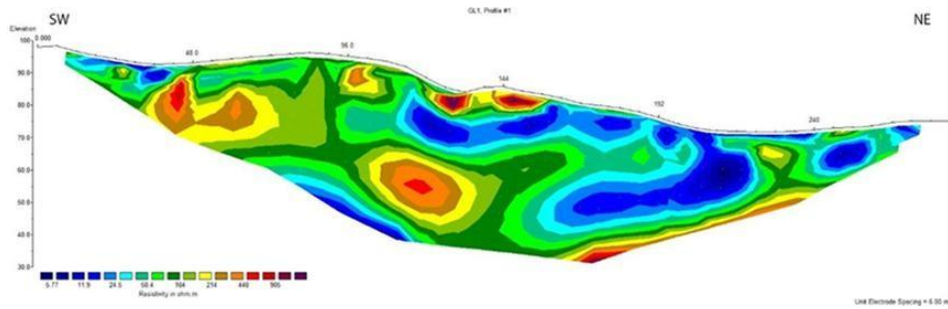


Gambar 5. (atas) Penampang dan (bawah) interpretasi geolistrik lintasan 5 (GL5)

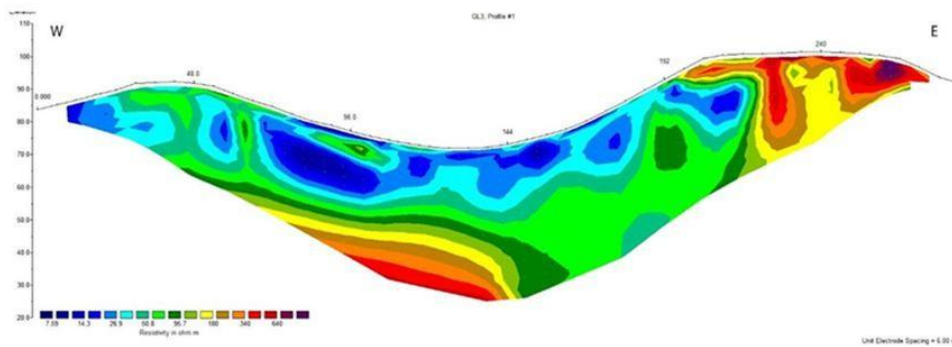
Lintasan GL1, GL3, dan GL4 – Zona Referensi Batuan Dasar

Ketiga lintasan ini digunakan sebagai lintasan referensi (baseline) untuk menentukan nilai resistivitas batuan asli di sekitar bendungan. Nilai resistivitas tinggi (70–80 Ωm) menunjukkan bahwa batuan dasar masih kompak, kering, dan relatif kedap air.

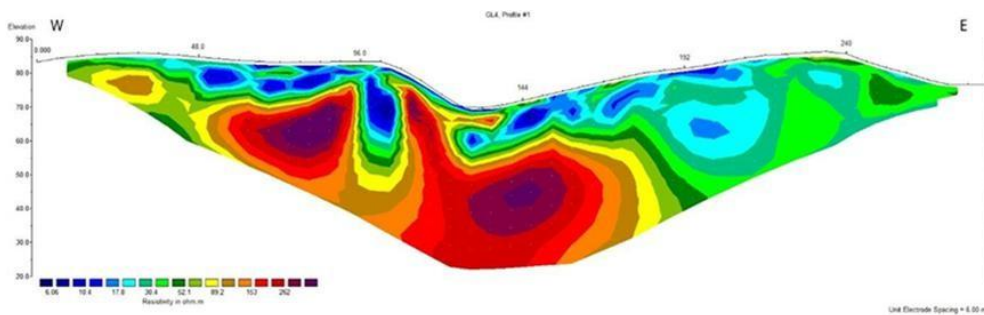
Zona biru pada penampang menunjukkan material yang jenuh air alami, namun tidak berpotensi menyebabkan rembesan aktif. Dengan demikian, hasil dari tiga lintasan ini dijadikan benchmark interpretasi terhadap anomali resistivitas pada lintasan lain.



Gambar 6. Penampang geolistrik lintasan 1 (GL1).



Gambar 7. Penampang geolistrik lintasan 3 (GL3).



Gambar 8. Penampang geolistrik lintasan 4 (GL4).

Data Hasil Investigasi

Integrasi seluruh lintasan geolistrik terhadap topografi menghasilkan model tiga dimensi distribusi resistivitas bawah permukaan Bendungan Mamak. Berdasarkan hasil *overlay* tersebut, teridentifikasi bahwa zona dengan resistivitas rendah (<25 Ωm) terkonsentrasi pada area *Saddle Dam 2* bagian tengah hingga hilir.

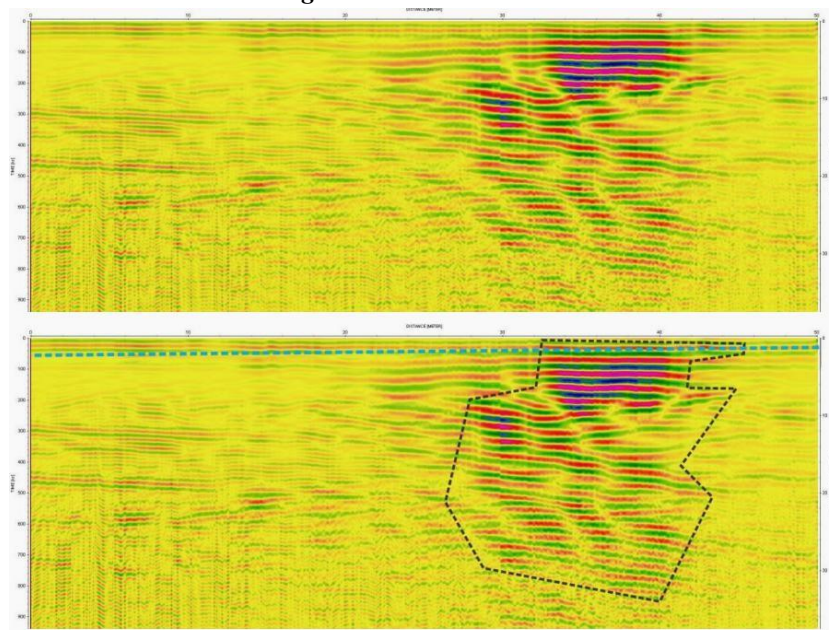
Distribusi ini konsisten dengan hasil observasi lapangan berupa rembesan di kaki hilir dan genangan air pada puncak bendungan, yang mengindikasikan adanya jalur rembesan air dari hulu menuju hilir melalui zona material urugan yang telah melemah. Fenomena tersebut memperkuat dugaan bahwa pola rembesan pada Bendungan Mamak bersifat

kombinasi, yakni rembesan internal (*internal seepage*) akibat perbedaan gradien hidrolik antar-lapisan urugan dan rembesan eksternal (*surface infiltration*) yang dihasilkan oleh infiltrasi air hujan pada area lendutan permukaan. Kedua mekanisme ini berkontribusi terhadap penurunan kekuatan geser tanah serta memicu deformasi vertikal (lendutan) pada tubuh bendungan.

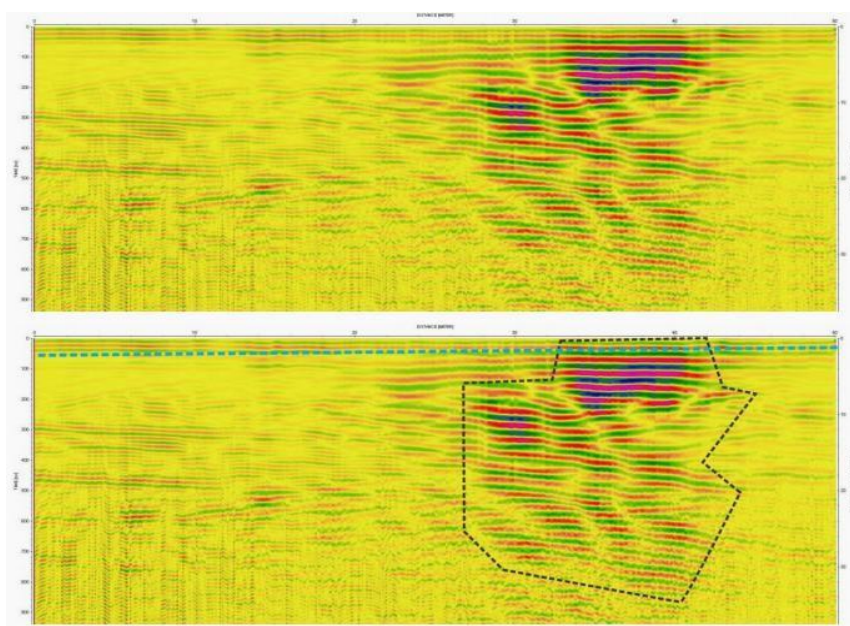
Zona dengan resistivitas rendah ($<25 \Omega\text{m}$) diinterpretasikan sebagai jalur rembesan aktif yang dominan pada area *Saddle Dam 2*, dengan arah aliran rembesan dari hulu menuju hilir. Sementara itu, zona resistivitas menengah ($30-45 \Omega\text{m}$) menggambarkan material urugan yang telah jenuh air dan berpori, berperan sebagai media perpindahan rembesan lateral di dalam tubuh bendungan. Korelasi antara lendutan di puncak bendungan dan zona resistivitas rendah di bawahnya menunjukkan hubungan kausal yang kuat antara deformasi permukaan dengan pelemahan material internal akibat kejenuhan air.

Data Hasil Investigasi Georadar Data Hasil Tiap Lintasan Georadar

Lintasan GPR01 dan GPR02 – Puncak Bendungan Utama



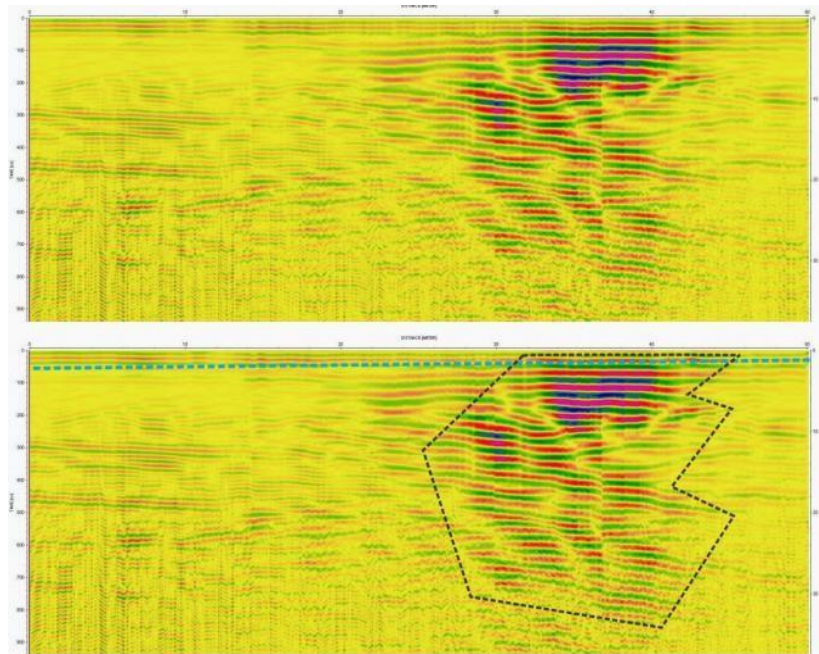
Gambar 9. (atas) Pengolahan dan (interpretasi) lintasan GPR Line 1 (GPR01).



Gambar 10. (atas) Pengolahan dan (interpretasi) lintasan GPR Line 2 (GPR02).

Lintasan GPR01 dan GPR02 ditempatkan di sepanjang puncak Bendungan Mamak, sejajar dengan arah aliran waduk. Radargram menunjukkan reflektor kontinu dengan amplitudo kuat pada kedalaman 0,5–2,0 meter, menandakan lapisan urugan atas yang masih padat dan kering. Namun, pada GPR02 bagian tengah terdapat pola hiperbolik tumpul di kedalaman 4–6 meter, yang menandakan zona penurunan densitas akibat deformasi vertikal (lendutan). Zona ini bertepatan dengan area di mana permukaan puncak menunjukkan cekungan (hasil survei topografi), mengindikasikan bahwa lendutan permukaan memiliki korelasi dengan deformasi internal material urugan.

Lintasan GPR03 dan GPR04 – Zona Hulu hingga Tengah Bendungan

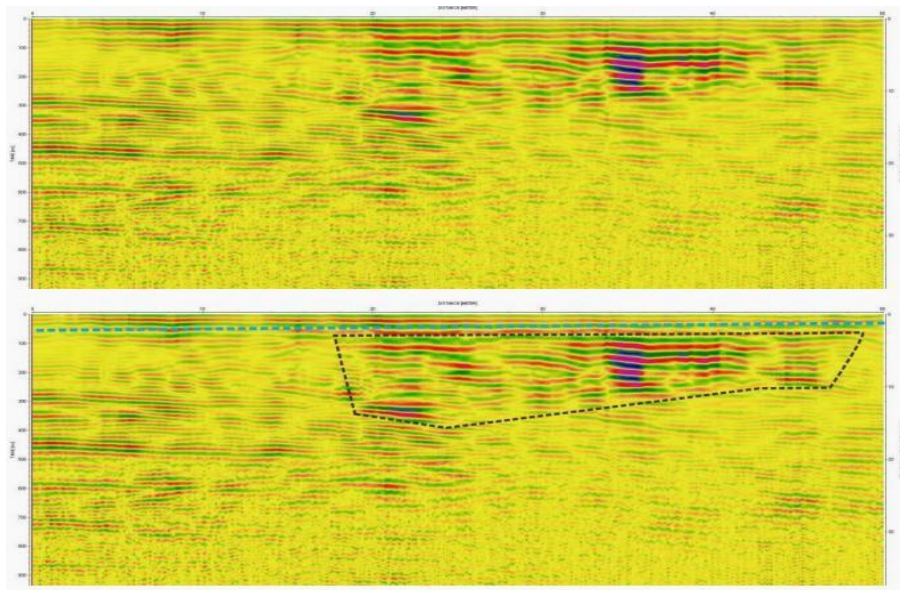


Gambar 12. (atas) Pengolahan dan (interpretasi) lintasan GPR Line 3 (GPR03).

Lintasan GPR03 dan GPR04 ditempatkan pada bagian hulu hingga tengah tubuh bendungan. Reflektor kuat pada kedalaman 1–3 meter menunjukkan lapisan urugan yang relatif kering, sedangkan area di bawahnya menunjukkan reflektor tidak kontinu dengan amplitudo rendah yang menandakan adanya zona kejenuhan air.

Pada GPR04, reflektor di bawah kedalaman 8 meter mulai hilang (*blank zone*), mengindikasikan perubahan kontras dielektrik akibat peningkatan kadar air atau keberadaan rongga kecil. Fenomena ini menunjukkan bahwa aliran rembesan air dari arah hulu telah mencapai zona tengah tubuh bendungan, memperlemah material pada kedalaman menengah.

Lintasan GPR05 – Area Hilir Tengah (Saddle Dam 2)



Gambar 13. (atas) Pengolahan dan (interpretasi) lintasan GPR Line 5 (GPR05).

Lintasan GPR05 yang berada di *Saddle Dam 2* bagian tengah menunjukkan radargram dengan pola hilangnya reflektor (zona blank) mulai dari kedalaman 5 meter hingga lebih dari 10 meter. Pada zona ini, gelombang elektromagnetik mengalami atenuasi kuat akibat peningkatan kadar air dan konduktivitas elektrik yang tinggi. Kondisi ini sesuai dengan hasil investigasi geolistrik GL10 dan GL9 yang menunjukkan resistivitas rendah ($<25 \Omega\text{m}$) di area yang sama. Dengan demikian, lintasan GPR05 berhasil mengonfirmasi keberadaan jalur rembesan aktif di dalam tubuh *Saddle Dam 2*, sekaligus memperkuat bukti adanya akumulasi air pada zona bawah bendungan yang berpotensi memperlemah kestabilan struktur.

Data Analisis Spasial dan Integrasi dengan Hasil Geolistrik

Integrasi hasil GPR dan geolistrik menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara zona hilangnya reflektor radar (blank zone) dengan zona resistivitas rendah ($<25 \Omega\text{m}$). Keduanya secara spasial berada di area *Saddle Dam 2* bagian tengah-hilir, yang merupakan lokasi utama jalur rembesan aktif. Fenomena ini memperlihatkan bahwa kejenuhan air di zona bawah tubuh bendungan telah memperlemah konduktivitas dielektrik material, sehingga menyebabkan hilangnya pantulan sinyal radar. Selain itu, pola hiperbolik di lintasan GPR02 dan GPR06 menunjukkan hubungan langsung dengan zona deformasi vertikal (lendutan) di permukaan. Kondisi ini memperkuat dugaan bahwa lendutan dan rembesan memiliki hubungan kausal, di mana peningkatan kejenuhan air pada lapisan dalam menyebabkan penurunan densitas material, yang selanjutnya menghasilkan deformasi vertikal di puncak bendungan. Dengan demikian, integrasi kedua metode geofisika ini memberikan gambaran utuh bahwa kondisi internal Bendungan Mamak saat ini dipengaruhi oleh kombinasi rembesan aktif, infiltrasi air permukaan, dan deformasi material urugan.

Data Analisis Sumber dan Penyebab Rembesan serta Lendutan Data Identifikasi Sumber Rembesan

Berdasarkan integrasi hasil investigasi geolistrik dan georadar, teridentifikasi bahwa sumber utama rembesan pada Bendungan Mamak berasal dari dua mekanisme dominan, yaitu rembesan internal (*internal seepage*) dan rembesan eksternal (*surface infiltration*). Rembesan internal terjadi akibat perbedaan gradien hidrolis antar lapisan urugan dan zona permeabilitas tinggi yang terbentuk di dalam tubuh bendungan, terutama pada *Saddle Dam 2* bagian tengah hingga hilir. Nilai resistivitas rendah ($<25 \Omega\text{m}$) dan hilangnya reflektor radar pada kedalaman 8–12 meter menunjukkan adanya aliran air bawah permukaan yang menerobos lapisan urugan. Hal ini diperkuat oleh posisi jalur rembesan yang sejajar dengan arah aliran air waduk. Rembesan eksternal terjadi akibat infiltrasi air hujan di area puncak bendungan, yang terakumulasi di area lendutan permukaan. Air yang tertahan di cekungan tersebut meresap ke bawah dan mempercepat peningkatan kadar air pada lapisan urugan atas.

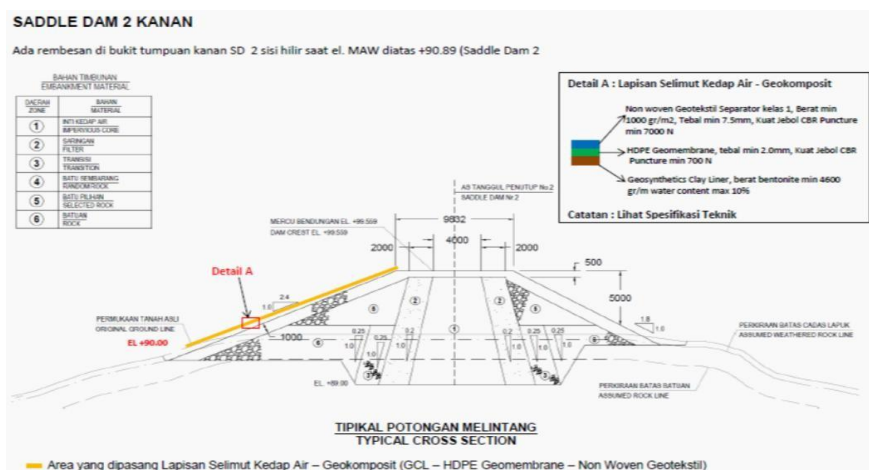
Data Analisis Penyebab Terjadinya Lendutan

Hasil GPR menunjukkan bahwa deformasi vertikal (lendutan) terutama terjadi pada bagian puncak bendungan utama dan *Saddle Dam 2*. Reflektor hiperbolik pada lintasan GPR02 dan GPR05 mengindikasikan penurunan densitas material urugan di kedalaman 4–6 meter, yang berhubungan dengan area cekungan pada permukaan bendungan hasil survei topografi. Penyebab utama lendutan ini dapat dijelaskan oleh tiga faktor: Penurunan kepadatan (*settlement*) akibat beban sendiri (*self-weight consolidation*) dan variasi kelembaban tanah. Ketika lapisan urugan bagian bawah jenuh air karena rembesan, kekuatan geser efektif menurun sehingga material mengalami penurunan (*subsidence*). Pelemahan material akibat kejenuhan air. Zona dengan resistivitas rendah dan hilangnya reflektor menunjukkan peningkatan kadar air yang menyebabkan gaya kohesi berkurang. Hal ini mengakibatkan terjadinya deformasi diferensial antara bagian kering dan jenuh. Degradasi akibat siklus beban hidrologis (*wetting–drying cycle*). Fluktuasi muka air waduk menyebabkan pengeringan dan pembasahan berulang, sehingga material urugan kehilangan kekuatan struktural jangka panjang. Kombinasi ketiga faktor tersebut menghasilkan lendutan lokal di puncak bendungan dan memperbesar risiko terbentuknya jalur rembesan vertikal, yang kemudian berkontribusi terhadap rembesan horizontal di bawahnya.

Dari hasil integrasi analisis geolistrik dan GPR, dapat disimpulkan bahwa rembesan dan lendutan memiliki hubungan sebab-akibat yang erat. Lendutan di permukaan puncak bendungan tidak hanya merupakan akibat dari penurunan material, tetapi juga dipicu oleh peningkatan tekanan air pori akibat rembesan internal. Sebaliknya, lendutan yang terjadi menciptakan cekungan pada permukaan, yang mempercepat infiltrasi air hujan dan membentuk rembesan eksternal tambahan.

Analisis gabungan geolistrik dan GPR menunjukkan bahwa sumber utama permasalahan rembesan dan lendutan pada Bendungan Mamak berasal dari kombinasi proses hidrogeoteknik internal dan eksternal yang saling memengaruhi. Pemahaman mendalam terhadap pola rembesan dan deformasi ini menjadi dasar penting dalam penerapan langkah remediasi berbasis geosynthetic drainage system, sehingga keamanan dan umur layan bendungan dapat dipertahankan secara berkelanjutan

Desain dan Implementasi Geokomposit



Gambar 14. Teknis Desain Geokomposit

Berdasarkan hasil investigasi geolistrik dan georadar, teridentifikasi zona resistivitas rendah (<25 Ωm) di area *Saddle Dam 2* bagian tengah–hilir dan sebagian tumpuan kanan bendungan, yang menunjukkan adanya jalur rembesan aktif dan zona jenuh air. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dirancang dan diterapkan sistem lapisan selimut kedap air geokomposit (*geocomposite impermeable blanket*) guna mengendalikan rembesan dan meningkatkan stabilitas tubuh bendungan.

Desain Sistem Geokomposit

Struktur geokomposit terdiri atas tiga lapisan utama:

1. *Geosynthetic Clay Liner* (GCL) sebagai lapisan penghalang utama dengan permeabilitas $<10^{-9}$ m/s.
2. *HDPE Geomembrane* (2 mm) sebagai pelindung kedap air dan tahan terhadap tekanan hidrostatik.
3. *Non-woven Geotextile* sebagai pelindung mekanis dari kerusakan akibat beban atau abrasi.



Kombinasi ini membentuk sistem kedap air berfungsi ganda sebagai barrier dan proteksi mekanis, efektif menghambat aliran rembesan vertikal maupun lateral.

Evaluasi dengan GeoStudio (GeoSlope dan ShearPage)

Tujuan dan Metode Evaluasi

Evaluasi dengan perangkat lunak GeoStudio dilakukan untuk menilai pengaruh penerapan lapisan geokomposit terhadap kestabilan tubuh bendungan dan kondisi rembesan bawah permukaan. Analisis dilakukan menggunakan dua modul utama:

1. Slope/W (GeoSlope) untuk menghitung faktor keamanan lereng (*Factor of Safety, FK*) pada berbagai kondisi muka air dan beban gempa, serta
2. Seep/W untuk mengevaluasi pola aliran air (*seepage*), gradien hidrolis, dan potensi piping sebelum dan sesudah perbaikan.

Parameter tanah tiap zona tubuh bendungan ditetapkan berdasarkan hasil desain dan investigasi geoteknik lapangan [15], meliputi nilai kohesi (c'), sudut geser dalam (ϕ'), berat isi tanah (γ), serta koefisien permeabilitas (k) untuk zona inti, filter, transisi, random fill, dan lapisan geokomposit.

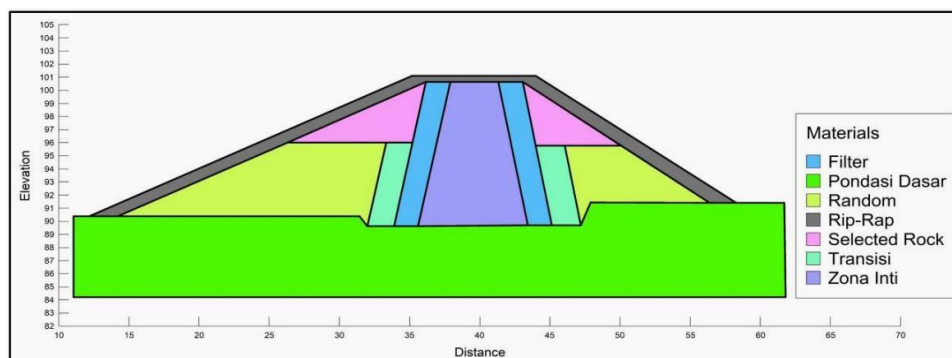
Analisis Stabilitas Lereng dengan GeoSlope

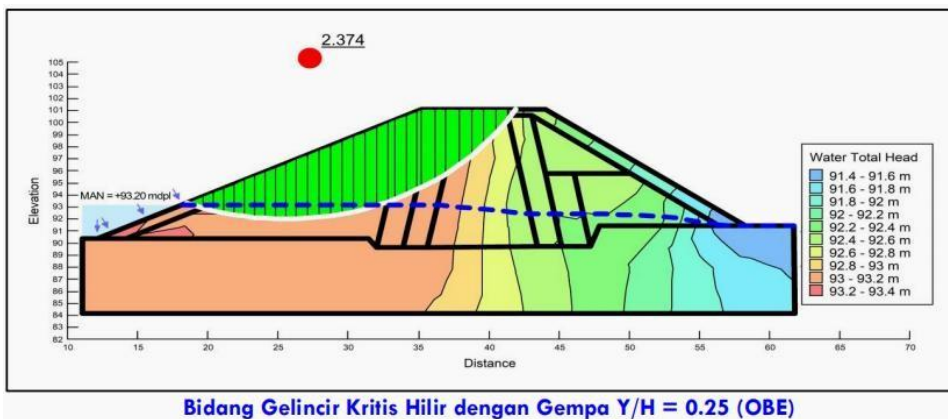
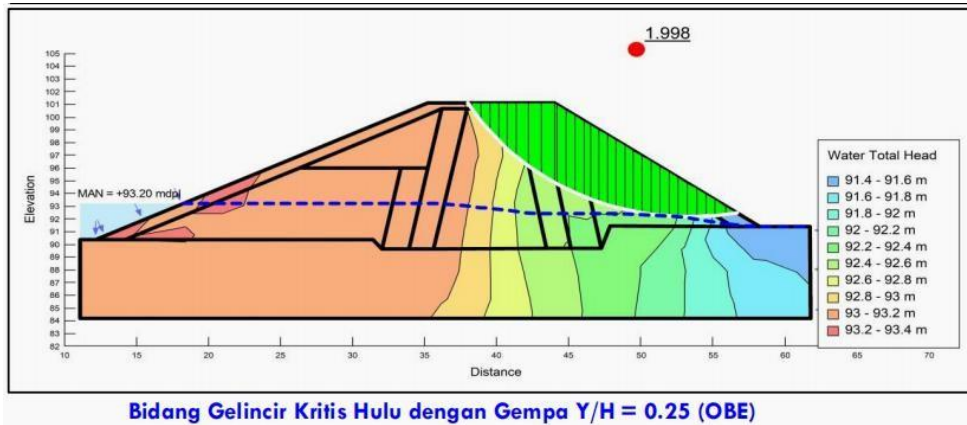
Analisis stabilitas dilakukan untuk empat kondisi muka air, yaitu:

1. Kondisi Kering (Kosong),
2. Rencana Debit Dasar (RDD),
3. Muka Air Normal (MAN, +93,20 mdpl), dan
4. Muka Air Banjir (MAB, +95,40 mdpl),

Dengan mempertimbangkan kondisi statik dan dinamik (gempa OBE & MDE).

Sebelum Penambahan Geokomposit



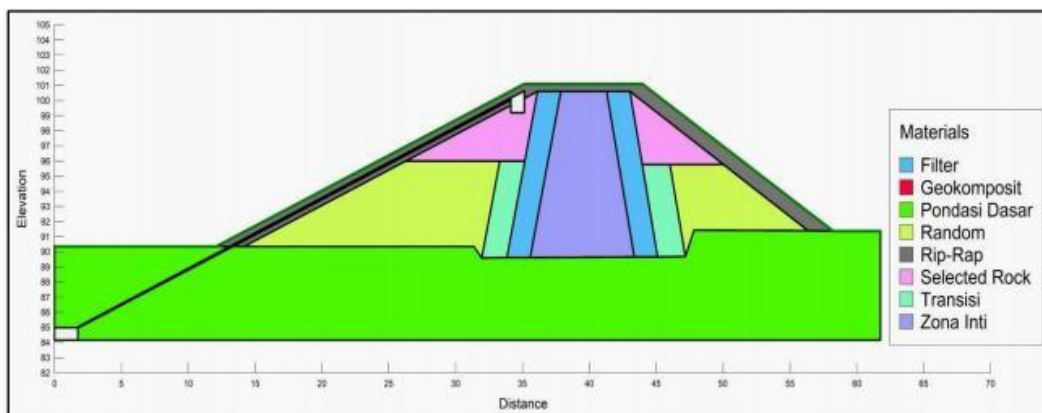


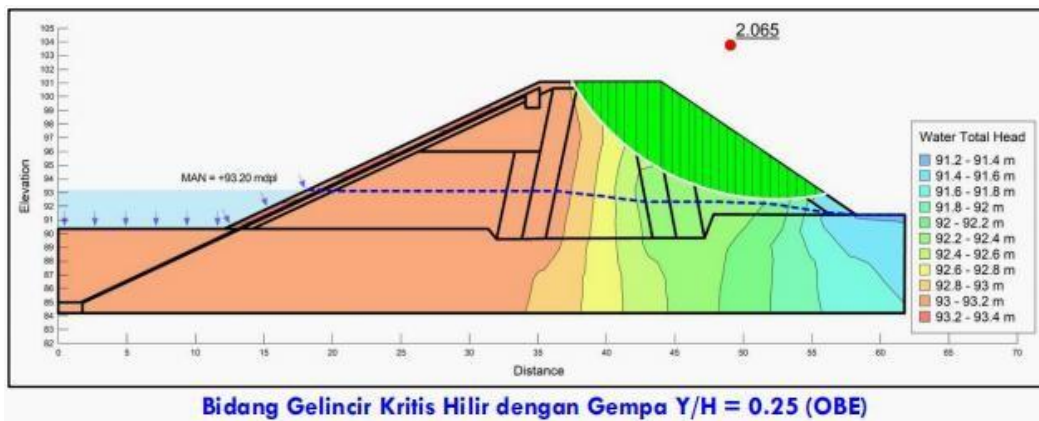
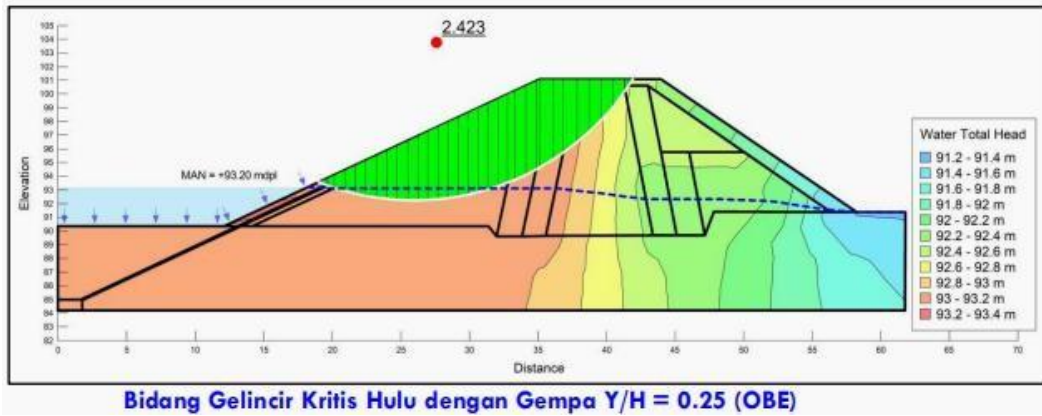
Nilai faktor keamanan (FK) untuk lereng hulu dan hilir berada pada kisaran:

1. Statik: 2,26–2,57,
2. Gempa OBE (T = 100 tahun): 1,63–2,07,
3. Gempa MDE (T = 5000 tahun): 1,36–1,84.

Seluruh nilai memenuhi syarat minimum SNI 8064:2016 [28] (FK ≥ 1,3 untuk operasi normal dan ≥ 1,0 untuk kondisi gempa).

Setelah Penambahan Geokomposit



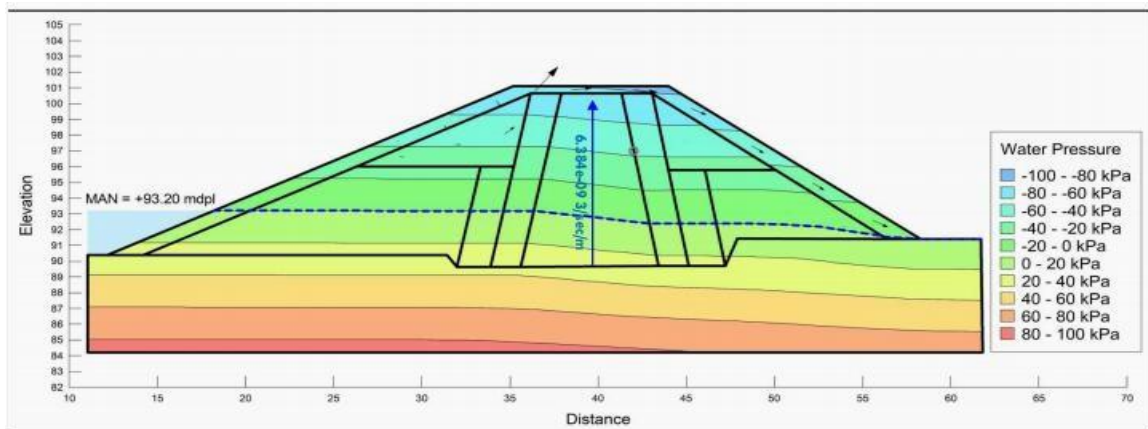


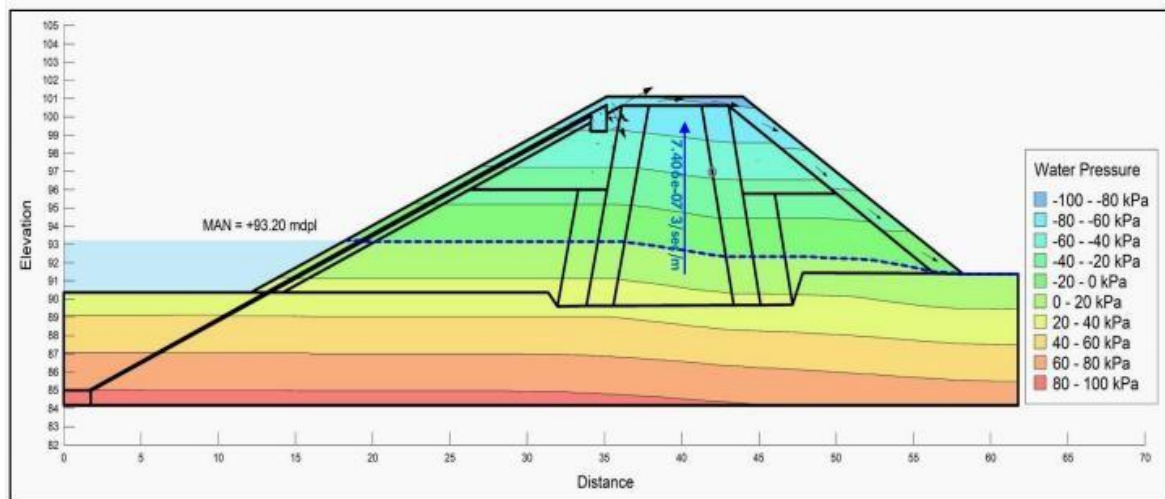
Setelah pemasangan lapisan geokomposit drainase, nilai FK meningkat menjadi:

1. Statik: 2,30–3,26,
2. Gempa OBE: 1,68–2,48,
3. Gempa MDE: 1,45–2,16.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa sistem geokomposit efektif dalam mengurangi tekanan air pori dan memperbaiki kestabilan lereng, baik pada kondisi normal maupun gempa. Secara keseluruhan, hasil pemodelan menunjukkan seluruh kondisi stabil (AMAN) sesuai kriteria keamanan bendungan urugan.

Analisis Rembesan dengan Seep/W

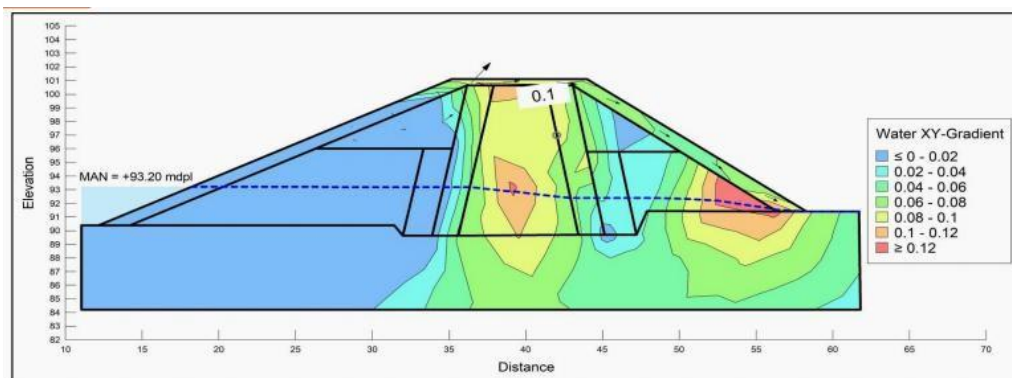




Sesudah

Analisis rembesan dilakukan untuk memprediksi debit aliran air melalui tubuh bendungan dan perubahan gradien hidrolik akibat penambahan geokomposit. Sebelum pemasangan geokomposit, diperoleh debit rembesan sebesar $4,532 \times 10^{-3}$ L/s, dengan pola aliran air menembus zona inti menuju hilir. Setelah pemasangan geokomposit, debit rembesan menurun drastis menjadi $3,904 \times 10^{-6}$ L/s, menunjukkan penurunan lebih dari 99%. Model kontur tekanan air dari Seep/W juga menunjukkan penurunan muka air jenuh (*phreatic line*) secara signifikan di bagian hilir, sehingga tekanan air pori dan risiko rembesan terkendali. Berdasarkan kriteria nilai tersebut termasuk kategori aman terhadap rembesan (*safe seepage condition*) [7].

Analisis Piping dan Erosi Bawah Pondasi



Evaluasi keamanan terhadap piping dilakukan menggunakan pendekatan critical hydraulic gradient (i_{cr}) sesuai SNI 8065:2016 [28]. Sebelum pemasangan geokomposit, diperoleh FK terhadap piping = 8,36. Setelah pemasangan geokomposit, nilai meningkat menjadi FK = 10,45, menunjukkan keamanan tinggi terhadap erosi buluh dan heave pada batas antara zona inti dan filter. Nilai ini jauh di atas ambang batas aman minimum ($FK \ge 3,0$), sehingga dapat disimpulkan bahwa risiko piping setelah perbaikan tidak signifikan (AMAN).

KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam pemodelan SEEP/W, lapisan geokomposit dimasukkan sebagai lapisan impermeable dengan nilai koefisien permeabilitas yang diturunkan menjadi 10^{-9} – 10^{-10} m/s. Parameter dan kondisi batas lainnya tetap dipertahankan agar hasil perbandingan lebih objektif.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa:

1. Garis freatik turun signifikan dan tidak lagi menembus tubuh bendungan,
2. Tekanan air pori di sisi hilir menurun,
3. Fluks rembesan berkurang drastis, dan
4. Tidak ditemukan zona jenuh di tumpuan kanan setelah perbaikan.

Hal ini menunjukkan bahwa lapisan geokomposit berfungsi efektif sebagai penghalang utama rembesan (*impermeable barrier layer*) dan berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas bendungan.

Perbandingan hasil pemodelan sebelum dan sesudah pemasangan geokomposit ditunjukkan pada Tabel berikut.

Parameter Analisis	Sebelum Geokomposit	Sesudah Geokomposit
Koefisien Permeabilitas Hulu (k)	$10^{-5} - 10^{-6}$ m/s	$10^{-9} - 10^{-10}$ m/s
Posisi Garis Freatik	Menembus tubuh bendungan	Turun di sisi hulu
Tekanan Air Pori	Tinggi	Rendah
Fluks Rembesan (Q)	Besar	Sangat kecil
Potensi Piping	Ada	Tidak ada
Stabilitas Lereng	Menurun	Meningkat

Dari hasil analisis GeoStudio SEEP/W, dapat disimpulkan bahwa pemasangan lapisan selimut kedap air geokomposit secara signifikan menurunkan permeabilitas dan mengurangi tekanan air pori, sehingga meningkatkan kestabilan struktur bendungan Mamak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures* (4th ed.). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315274898/hydraulic-structures-novak-moffat-nalluri-narayanan>
- [2] R. Rahayu dan S. Permana,(2022). *Analisis Kestabilan Lereng Bendungan Akibat Fluktuasi Muka Air*, Jurnal Konstruksi, Institut Teknologi Garut. <https://jurnal.itg.ac.id/index.php/konstruksi/article/view/916>
- [3] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Peraturan Menteri PUPR Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan*. Jakarta: Kementerian PUPR. <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/144525/permen-pupr-no-27prtm2015-tahun-2015>
- [4] Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. (2017). *Pedoman Operasi dan Pemeliharaan Bendungan (PD T-02- 2007-B)*. Jakarta: Kementerian PUPR. <https://sda.pu.go.id>
- [5] Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi. 2017. Modul 12 : Modul Modul Analisa Stabilitas Bendungan : Perhitungan Rembesan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar. Kemeterian PUPR
- [6] Amalia, D. R., dkk. (2022). *Pemetaan Pola Rembesan Air pada Bendungan Selorejo Menggunakan Metode Geolistrik*. Prosiding Seminar Nasional FIS Universitas Negeri Malang. <https://conference.um.ac.id/index.php/fis/article/view/160>
- [7] Sadikin, N. (2020). *Penerapan Peralatan Georadar Sebagai Teknologi Pendukung Pemantauan Perilaku Bendungan (Studi Kasus: Bendungan Cacaban, Jawa Tengah)*. Jurnal Sumber Daya Air, Puslitbang SDA, Kementerian PUPR. <https://jurnalsda.pusair-pu.go.id/index.php/JSDA/article/download/375/273>
- [8] Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation, United States. Amalia
- [9] Loke, M. H. (2004). *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*. Geotomo Software.
- [10] Dahlin, T., & Zhou, B. (2006). "Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging." *Near Surface Geophysics*, 4(2), 113–123.
- [11] Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley- Blackwell.
- [12] Sharma, P. V. (1997). *Environmental and Engineering Geophysics*. Cambridge University Press.

- [13] Shukla, S. K. (2017). *Introduction to Geosynthetic Engineering*. CRC Press.
- [14] Rowe, R. K. (2014). "Performance of GCLs in liners for landfills and ponds." *Geosynthetics International*, 21(2), 151–175.
- [15] Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I. (2023). *Data Teknis Bendungan Mamak, Kabupaten Sumbawa*.
- [16] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. <https://bwsnt1.pu.go.id/>
- [17] Arian Barker. 2023. *Handbook of Dam Engineering*. Larsen and Keller Education.
- [18] Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I. (2022). *Laporan Inspeksi Besar Bendungan Mamak dan Saddle Dam (PPIO/DOISP-2)*. Nusa Tenggara Barat: Kementerian PUPR. <https://sinbad.sda.pu.go.id/doisp2-dok/>
- [19] Central Water Commission (CWC). 2019. *Handbook for Assessing and Managing Reservoir Sedimentation*. CWC, India.
- [20] Christian Kutzner. 1997. *Earth And Rockfill Dams*. A.A.BALKEMA.
- [21] Dr. Ir. Suyono Sosrodarsono dan Kensaku Takeda. 2016. *Bendungan Tipe Urugan*. Balai Pustaka.
- [22] Desy Rizki Amalia, Abdulloh Fuad, Daeng Achmad Suaidi, Siti Zulaikah, Yoyok Adisetyo Laksono (2017). *Pemetaan Pola Rembesan Air pada Bendungan Selorejo Menggunakan Metode Geolistrik*.