

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur sumber daya air, khususnya bendungan, memegang peranan yang sangat vital dalam mendukung ketahanan air, ketahanan pangan, dan pengendalian banjir nasional. Mengingat besarnya volume air yang ditampung serta potensi risiko kegagalan struktur yang dapat berdampak katastrofik bagi wilayah hilir, aspek keamanan bendungan (*dam safety*) menjadi prioritas utama yang harus dipenuhi sejak tahap perencanaan, konstruksi, hingga operasional. Bendungan urugan, sebagai salah satu jenis bendungan yang paling sering dibangun karena fleksibilitasnya terhadap kondisi fondasi, sangat bergantung pada kekuatan geser material timbunan dan kontrol terhadap perilaku air pori serta deformasi yang terjadi di dalam tubuh bendungan (*maindam*). Salah satu proyek strategis nasional yang saat ini sedang berjalan adalah pembangunan Bendungan Jragung. Saat ini, progres fisik Bendungan Jragung berada pada tahap penyelesaian konstruksi timbunan atau fase *pra-impounding* (sebelum pengisian awal waduk).

Tahap *pra-impounding* ini merupakan fase yang sangat krusial dalam siklus hidup bendungan. Pada fase ini, seluruh beban struktur dari material timbunan telah bekerja sepenuhnya secara internal, namun tubuh bendungan belum menerima beban hidrostatik dari luar. Evaluasi stabilitas pada tahap ini mutlak diperlukan untuk memastikan bahwa parameter desain awal masih relevan dengan kondisi aktual di lapangan, serta untuk mendeteksi secara dini adanya anomali perilaku mekanis pada tubuh bendungan sebelum air mulai digenangkan. Untuk mengetahui nilai faktor keamanan (*safety factor*) yang mencerminkan kondisi riil di lapangan, analisis stabilitas tidak dapat hanya mengandalkan asumsi teoritis semata. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi model berdasarkan pembacaan instrumentasi bendungan yang terpasang secara aktual. Instrumentasi seperti *Extensometer* untuk memantau pergerakan internal vertikal timbunan, memberikan data perilaku struktur secara *real-time*.

Melalui proses kalibrasi ini, parameter geoteknik hasil uji laboratorium dapat diselaraskan dengan respons fisik struktur di lapangan, sehingga pemodelan yang

dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan validitas yang tinggi. Dalam melakukan analisis mekanika tanah yang kompleks pada tubuh bendungan, metode kesetimbangan batas konvensional (*Limit Equilibrium Method*) dinilai memiliki keterbatasan karena hanya meninjau keseimbangan gaya tanpa mempertimbangkan hubungan tegangan-regangan material. Sebagai solusinya, penelitian ini menerapkan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method / FEM*). Keunggulan utama FEM adalah kemampuannya untuk menghitung besarnya deformasi, pergeseran (*displacement*), penurunan (*settlement*), serta distribusi tegangan dan regangan di seluruh bagian tubuh bendungan secara simultan. Dengan metode ini, titik-titik kritis yang mengalami konsentrasi tegangan dapat dideteksi sebelum terjadi keruntuhan material. Selain itu, FEM mampu memodelkan tahapan konstruksi secara bertahap (*staged construction*) sesuai dengan kondisi as-built di lapangan, menganalisis aliran rembesan (*seepage*) bersamaan dengan analisis stabilitas, hingga mensimulasikan respons bendungan terhadap beban siklik seperti gempa bumi melalui analisis pseudostatik maupun dinamik guna mengantisipasi potensi likuifaksi dan deformasi permanen. Penelitian ini dibatasi secara spesifik pada analisis potongan melintang tunggal (*2D cross-section*) pada bagian maindam Bendungan Jragung yang dianggap paling kritis dan mampu mewakili karakteristik keseluruhan timbunan (*embankment*). Mengingat lapisan fondasi bendungan didominasi oleh batuan/tanah keras yang stabil, fokus utama analisis difokuskan pada stabilitas internal material timbunan.

Parameter kekuatan geser tanah diperoleh melalui pengujian laboratorium *Triaxial Consolidated Undrained* (CU) untuk mendapatkan nilai kohesi (c') dan sudut geser dalam (ϕ) efektif, yang dipadukan dengan data pengujian lapangan berupa densitas dan koefisien permeabilitas (k). Model 2D yang telah berhasil dikalibrasi dengan pembacaan instrumen pada kondisi *pra-impounding* (terkait rembesan dan pergerakan) selanjutnya akan digunakan sebagai basis untuk mensimulasikan skenario kritis berikutnya, yaitu saat kondisi waduk terisi penuh (*full impounding*) dan kondisi penurunan muka air waduk secara cepat (*rapid drawdown*) serta permodelan gempa secara dinamis.

Secara teoretis, penelitian ini didasarkan pada prinsip-prinsip utama stabilitas bendungan urugan, konsep tegangan efektif Terzaghi pada kondisi *Consolidated*

Undrained, dan formulasi matematika Metode Elemen Hingga dalam menentukan bidang gelincir serta faktor keamanan minimum.

Melalui pendekatan integratif antara data laboratorium, data aktual lapangan dari instrumentasi, dan pemodelan numerik FEM, Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang akurat mengenai perilaku struktural Bendungan Jragung. Hasil evaluasi ini penting sebagai dokumen audit teknis dan rekomendasi ilmiah demi menjamin keamanan Bendungan Jragung sebelum proses penggenangan (*impounding*) dilaksanakan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan dan merujuk secara langsung pada tahapan diagram alir penelitian, maka rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana mengintegrasikan parameter material hasil pengujian dengan data pemantauan instrumen lapangan (debit *V-notch*, deformasi/*settlement*, dan muka air) ke dalam pemodelan numerik agar menghasilkan tingkat akurasi yang valid dengan deviasi deformasi numerik dalam RMSE (*Root Mean Square Error*) $< 0,1$ meter dan selisih debit rembesan numerik di bawah 10% terhadap monitoring instrumen aktual di lapangan
2. Bagaimana nilai faktor keamanan (*safety factor*) dan perilaku deformasi internal *maindam* Bendungan Jragung pada kondisi eksisting berdasarkan hasil evaluasi model yang telah terkalibrasi?
3. Bagaimana stabilitas dan respons struktural *maindam* Bendungan Jragung terhadap variasi kondisi hidrolis (saat kondisi kosong, Muka Air Normal/MAN, Muka Air Banjir/MAB, dan *rapid drawdown*) baik pada kondisi tanpa pengaruh gempa maupun akibat pengaruh beban gempa pseudostatik?

1.3 Batasan masalah

Untuk menjamin kedalaman analisis dan ketercapaian tujuan penelitian, lingkup pembahasan pada studi ini dibatasi pada aspek geoteknik dan pemodelan numerik utama. Penentuan batasan ini didasarkan pada ketersediaan data lapangan, kriteria desain yang ditinjau, serta fokus evaluasi perilaku mekanis tanah pada struktur utama bendungan. Adapun batasan-batasan dalam penelitian ini meliputi:

1. Bidang gelincir hanya menggunakan bidang gelincir paling kritis
2. Kalibrasi deformasi hanya pada timbunan zona inti
3. Permodelan simulasi hanya menggunakan gempa pseudostatik
4. Nilai GSI berdasarkan data direksi lapangan
5. Permodelan tidak memodelkan rembesan air hujan
6. Elevasi timbunan dianggap sama untuk semua zona
7. Data properti *Grouting* dinyatakan batuan kuat dan non porus
8. Analisis penurunan muka air pada surut cepat berdasarkan asumsi penulis

1.4 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Tujuan umum dari pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah untuk mengevaluasi tingkat stabilitas struktural dan perilaku deformasi internal maindam Bendungan Jragung pada fase *pra-impounding* (sebelum pengisian air waduk) melalui pendekatan pemodelan numerik yang valid dan terkalibrasi berdasarkan data pemantauan instrumen lapangan secara aktual.

1.3.2 Tujuan Khusus

Secara spesifik, tahapan operasional dan sasaran teknis yang ingin dicapai dalam penelitian ini, merujuk pada diagram alir penelitian, adalah sebagai berikut:

1. Melakukan proses kalibrasi model numerik *2D finite element* dengan cara menyelaraskan output perhitungan model terhadap data pemantauan instrumen lapangan aktual (debit *V-notch*, deformasi/*settlement*, dan muka air freatik) hingga mencapai tingkat akurasi yang valid secara komparasi grafik

2. Menghitung besarnya nilai faktor keamanan (*safety factor*) aktual serta memetakan pola deformasi internal yang terjadi pada tubuh timbunan maindam Bendungan Jragung pada kondisi eksisting *pra-impounding* dengan menggunakan basis model numerik yang telah terkalibrasi.
3. Menganalisis stabilitas dan respons struktural maindam Bendungan Jragung melalui simulasi berbagai variasi kondisi hidrolis lanjutan, yang meliputi kondisi waduk kosong (skenario tanpa gempa dan dengan beban gempa), kondisi Muka Air Normal/MAN (skenario tanpa gempa dan dengan beban gempa), kondisi Muka Air Banjir/MAB (skenario tanpa gempa dan dengan beban gempa), serta kondisi penurunan muka air secara cepat/*rapid drawdown* (skenario tanpa gempa).

1.5 Manfaat Penelitian

1.4.1 Peneliti

1. Meningkatkan pemahaman mendalam secara teoretis maupun praktis mengenai penerapan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) dalam mengevaluasi stabilitas bendungan urugan.
2. Mengasah kemampuan analisis dalam mengintegrasikan hasil pengujian mekanis tanah di laboratorium dengan fenomena perilaku struktur aktual yang terekam oleh instrumen di lapangan.
3. Menjadi sarana pembelajaran intensif dalam memecahkan problematika geoteknik riil pada proyek konstruksi bangunan air strategis nasional, sebagai bekal untuk terjun ke dunia kerja profesional.
4. Menjadi rekomendasi teknis yang objektif dan ilmiah guna menjamin keamanan struktural bendungan sebelum memasuki tahap operasional penggenangan.

1.4.2 Institusi Pendidikan

1. Menambah khazanah kepustakaan dan literatur ilmiah pada program studi Teknologi Konstruksi Bangunan Air, khususnya dalam topik evaluasi keamanan bendungan berbasis pemodelan numerik dan kalibrasi instrumentasi.

2. Menjadi salah satu bukti empiris kemampuan mahasiswa dalam mengaplikasikan ilmu geoteknik terapan dan teknologi komputasi yang selaras dengan perkembangan industri konstruksi modern.
3. Memperkuat hubungan kerja sama dan sinergi dunia akademis dengan pihak praktisi industri, khususnya tim proyek lapangan di bawah Kementerian Pekerjaan Umum.

1.4.3 Masyarakat Secara Umum

1. Memberikan jaminan keamanan publik (*public safety*) secara tidak langsung bagi masyarakat yang tinggal di wilayah hilir sungai, melalui hasil evaluasi stabilitas bendungan yang akurat guna mencegah potensi kegagalan struktur (*dam failure*).
2. Mendukung keberhasilan pemanfaatan Bendungan Jragung di masa depan dalam menyuplai air baku, mengairi lahan irigasi pertanian, mereduksi banjir, hingga potensi pembangkit energi, yang berdampak langsung pada peningkatan kesejahteraan sosial-ekonomi masyarakat.