

Desain Tanggul Beton pada Bendung Irigasi Air Alas Kabupaten Seluma: Kajian Stabilitas dan Kekuatan Struktur

Miftakhul Jannah¹, Setiyo Ferdi Yanuar², Yanuar Hendra Pramana³

¹Program Studi Teknologi Konstruksi Jalan Jembatan dan Bangunan Air, Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur

¹E-mail: miftakhul.jannah@polinema.ac.id

²Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Bangunan Gedung, Universitas Jember

³Greenflow Smart Solution

Abstract — Irrigation weirs play a vital role in ensuring the continuity of water supply for agricultural activities. However, in many cases, the structures are prone to degradation due to hydraulic forces, erosion, and aging. The Air Alas Weir in Seluma Regency, Bengkulu Province, has experienced structural issues, particularly on the upstream embankment which is still protected by temporary structures such as gabions. This condition has led to a higher risk of erosion and reduced service life of the weir. As a solution, a reinforced concrete embankment was proposed to replace the temporary protection. This study aims to evaluate the design and structural performance of the proposed reinforced concrete embankment. The analysis was conducted using the Indonesian National Standards (SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, and SNI 1726:2019) combined with numerical modeling in Geo5 software. The design resulted in a wall thickness of 25 cm, a footing thickness of 80 cm, and a total wall height of approximately 8.00 m. Reinforcement details were provided with steel bars D19 and D13 for the wall stem and footing. Stability evaluation indicated that under both normal and flood water levels, the embankment fulfilled safety requirements against overturning, sliding, bearing capacity, and slope stability, with safety factors consistently above 1.50. Structural analysis of the reinforced concrete section also confirmed that the provided reinforcement area exceeded the required minimum, and both shear and moment capacities (VRd and MRd) were greater than the applied loads (VEd and MEd). The findings confirm that the proposed reinforced concrete embankment design is structurally safe and feasible to implement. Its application is expected to enhance the reliability of the Air Alas Weir in sustaining irrigation water distribution in Seluma Regency.

Keywords: air alas weir; embankment stability; irrigation structure; reinforced concrete; structural analysis.

Abstract — Bendung irigasi memiliki peran penting dalam menjamin kontinuitas suplai air bagi kegiatan pertanian. Namun, pada banyak kasus, bangunan ini rentan mengalami degradasi akibat gaya hidraulik, erosi, dan faktor usia layanan. Bendung Air Alas di Kabupaten Seluma, Provinsi Bengkulu, mengalami permasalahan struktural, khususnya pada tanggul hulu yang masih menggunakan perlindungan sementara berupa bronjong. Kondisi tersebut meningkatkan risiko erosi serta mengurangi umur layan bendung. Sebagai solusi, direncanakan pembangunan tanggul pelindung permanen menggunakan beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi desain dan kinerja struktural tanggul beton bertulang yang diusulkan. Analisis dilakukan dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1726:2019) serta pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak Geo5. Hasil perencanaan menghasilkan tebal dinding 25 cm, tebal telapak 80 cm, dan tinggi total sekitar 8,00 m. Rincian tulangan menggunakan baja D19 dan D13 pada dinding serta telapak. Evaluasi stabilitas menunjukkan bahwa pada kondisi muka air normal maupun banjir, tanggul memenuhi persyaratan keamanan terhadap guling, geser, daya dukung tanah, dan stabilitas lereng dengan faktor keamanan selalu di atas 1,50. Analisis struktur beton juga mengonfirmasi bahwa luas tulangan yang digunakan lebih besar daripada kebutuhan minimum, serta kapasitas geser (VRd) dan momen (MRd) lebih tinggi dibandingkan beban yang bekerja (VEd dan MEd). Temuan ini menegaskan bahwa desain tanggul beton bertulang yang diusulkan aman secara struktural dan layak diimplementasikan. Penerapannya diharapkan dapat meningkatkan keandalan Bendung Air Alas dalam mendukung distribusi air irigasi di Kabupaten Seluma.

Kata-kata Kunci: analisis struktur; beton bertulang; bendung Air Alas; irigasi; stabilitas tanggul.

I. PENDAHULUAN

Prasarana irigasi merupakan salah satu infrastruktur vital dalam mendukung ketahanan

pangan nasional. Bendung irigasi berfungsi mengatur aliran sungai agar dapat dimanfaatkan untuk penyediaan air pertanian secara berkelanjutan. Seiring bertambahnya usia

layanan, bangunan bendung umumnya mengalami penurunan kualitas akibat faktor hidrologis, gaya hidraulik, dan kondisi geoteknik di sekitarnya. Oleh karena itu, rehabilitasi infrastruktur irigasi menjadi sangat penting untuk menjamin keberlangsungan fungsi dan manfaatnya.

Bendung Air Alas yang terletak di Kabupaten Seluma, Provinsi Bengkulu, dibangun pada tahun 1996–1998 dengan luas layanan mencapai 4.500 hektar. Bendung ini merupakan salah satu sumber utama penyediaan air irigasi di wilayah tersebut. Akan tetapi, hasil identifikasi lapangan menunjukkan adanya beberapa permasalahan teknis, salah satunya adalah kondisi sayap hulu yang belum memiliki konstruksi permanen. Kekosongan struktur pelindung di sisi tersebut berpotensi menimbulkan erosi, ketidakstabilan lereng, serta melemahkan daya tahan bendung terhadap beban hidraulik sungai.

Solusi yang ditawarkan dalam kajian ini adalah pembangunan tanggul pelindung menggunakan pasangan beton bertulang. Pemilihan beton bertulang sebagai material utama didasarkan pada pertimbangan kekuatan struktur yang tinggi, ketahanan terhadap gaya hidraulik besar, serta umur layan yang lebih panjang dibandingkan material konvensional. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa penerapan tanggul beton memberikan stabilitas lebih baik dibandingkan tanggul tanah atau bronjong, terutama pada kondisi aliran dengan energi tinggi. Misalnya, studi stabilitas tanggul di Kolam Retensi Terboyo menunjukkan pentingnya evaluasi terhadap gaya tanah dan tekanan air pori dalam mendesain struktur penahan (Indrawan A. &., 2020). Selain itu, penelitian lain membuktikan bahwa metode perhitungan berbasis elemen hingga dapat digunakan untuk mengevaluasi kestabilan tubuh tanggul dalam kondisi beban kombinasi hidraulik dan seismik (Nugroho T. A., 2021).

Di Kabupaten Seluma, persoalan irigasi masih menjadi perhatian utama. Penelitian mengenai efisiensi saluran irigasi di Bendung Air Seluma menunjukkan bahwa efisiensi saluran tersier hanya mencapai sekitar 84,62%, yang artinya terdapat kehilangan air cukup signifikan akibat rembesan dan perkolasi (Effendi R. S., 2019). Hal serupa juga ditemukan pada sistem irigasi Air Alas, di mana dinding saluran mengalami keretakan, tumbuhnya vegetasi liar, serta kebocoran yang mengganggu kelancaran

distribusi air (Bengkulu, Analisis kerusakan dan efisiensi saluran irigasi Air Alas, Kabupaten Seluma. Laporan Penelitian Fakultas Teknik., 2021). Untuk mengatasi hal tersebut, pemerintah melalui Balai Wilayah Sungai Sumatera VII melakukan peningkatan jaringan irigasi kiri di Daerah Irigasi Air Alas, termasuk perbaikan saluran sekunder, tersier, dan drainase pada tahun 2023 (BWS-VII, 2023). Fakta-fakta ini menunjukkan bahwa upaya rehabilitasi bendung dan jaringan irigasi Air Alas sangat relevan serta mendesak untuk dilaksanakan.

Kajian ini secara khusus difokuskan pada desain tanggul beton pada Bendung Air Alas dengan tujuan mengevaluasi stabilitas dan kekuatan struktur yang direncanakan. Analisis dilakukan menggunakan standar peraturan yang berlaku di Indonesia (SNI-2847, 2019) (SNI-1726, 2019) dan (SNI-1727, 2020) serta perangkat lunak Geo5 untuk menguji stabilitas terhadap guling, geser, daya dukung tanah, dan kestabilan lereng. Hasil kajian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya rehabilitasi bendung, sekaligus menjadi referensi dalam pengembangan ilmu teknik sipil khususnya pada bidang sumber daya air dan desain struktur pelindung sungai.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Salah satu tantangan utama dalam pengelolaan sumber daya air adalah menjaga keberlanjutan infrastruktur irigasi agar mampu menghadapi dinamika alam, seperti peningkatan debit banjir, perubahan iklim, dan degradasi lingkungan. Berbagai kasus menunjukkan bahwa kerusakan pada bendung atau saluran irigasi seringkali dipicu oleh lemahnya perlindungan terhadap tebing sungai maupun struktur utama. Untuk itu, keberadaan tanggul sebagai bangunan pelindung menjadi elemen yang tidak dapat dipisahkan dari sistem irigasi modern.

A. Tanggul Beton dalam Infrastruktur Irigasi

Tanggul merupakan struktur pelindung yang berfungsi menahan massa tanah dan air agar tidak menyebabkan erosi maupun kelongsoran pada tebing sungai atau bangunan air. Pemilihan material konstruksi sangat menentukan daya tahan dan umur layan tanggul. Beton bertulang sering dipilih sebagai material utama karena memiliki kekuatan struktural yang tinggi, ketahanan terhadap gaya hidraulik, serta durabilitas yang lebih panjang dibandingkan

material konvensional seperti bronjong atau pasangan batu. Menurut (Putra & Wulandari, 2020), penerapan turap beton dalam desain tanggul memberikan faktor keamanan lebih tinggi dibandingkan tanggul urugan tanah, terutama pada kondisi debit banjir yang besar.

B. Analisis Stabilitas Struktur Tanggul

Evaluasi stabilitas tanggul perlu memperhatikan beberapa aspek, antara lain stabilitas guling, stabilitas geser, daya dukung tanah, serta kestabilan lereng. (Indrawan & Hartono, 2020) menekankan pentingnya penggunaan analisis numerik dalam mengevaluasi tekanan tanah aktif dan pasif, serta pengaruh tekanan air pori terhadap stabilitas tanggul. Penelitian lain oleh (Nugroho & Rahayu, 2020) menggunakan metode elemen hingga (finite element method) untuk menilai kestabilan tubuh tanggul. Hasilnya menunjukkan bahwa pemodelan numerik dapat memberikan gambaran lebih akurat terhadap respon struktur dibandingkan metode analitik sederhana.

C. Standar Nasional Indonesia (SNI) sebagai Acuan Perencanaan

Perencanaan struktur beton di Indonesia mengacu pada beberapa standar. (SNI-2847, 2019) menetapkan persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, termasuk penggunaan tulangan dan pengaturan selimut beton. (SNI-1727, 2020) memberikan panduan mengenai beban minimum untuk perancangan bangunan, sementara (SNI-1726, 2019) mengatur tata cara perencanaan ketahanan gempa. Ketiga standar ini relevan dalam merencanakan tanggul beton, mengingat tanggul harus mampu menahan kombinasi beban statis, dinamis, dan beban gempa.

D. Irigasi di Kabupaten Seluma

Kabupaten Seluma di Provinsi Bengkulu merupakan salah satu lumbung pertanian di pesisir barat Sumatera. Sistem irigasi di wilayah ini sangat bergantung pada bendung, salah satunya Bendung Air Seluma dan jaringan irigasi Air Alas. Penelitian oleh (Effendi, Syafriadi, & Rahmawati, 2019) menunjukkan bahwa efisiensi saluran tersier di Daerah Irigasi Bendung Air Seluma hanya mencapai 84,62 %, yang berarti terdapat kehilangan air cukup signifikan akibat rembesan, perkolas, maupun vegetasi liar. (Bengkulu, Analisis kerusakan dan efisiensi

saluran irigasi Air Alas, Kabupaten Seluma, 2021) juga melaporkan adanya keretakan dinding kanal dan kebocoran pada sistem irigasi Air Alas, yang menurunkan kinerja distribusi air ke lahan pertanian. Fakta ini menunjukkan pentingnya rehabilitasi jaringan irigasi dan pembangunan tanggul beton sebagai solusi untuk meningkatkan keberlanjutan sistem irigasi di Seluma.

E. Kesenjangan Penelitian

Berdasarkan kajian literatur, penelitian terkait tanggul beton umumnya berfokus pada desain tanggul laut, tanggul banjir perkotaan, atau tanggul di area tambang (Indrawan & Hartono, 2020). Namun, masih terbatas kajian yang secara spesifik menganalisis tanggul beton pada bendung irigasi di daerah pertanian, terutama di konteks lokal seperti Kabupaten Seluma. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki signifikansi untuk mengisi gap tersebut dengan memberikan studi kasus konkret tentang desain tanggul beton di Bendung Air Alas sebagai bagian dari upaya rehabilitasi sistem irigasi.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian disusun untuk menjelaskan tahapan analisis yang digunakan dalam merencanakan serta mengevaluasi desain tanggul beton pada Bendung Air Alas. Tahapan ini mencakup penentuan lokasi penelitian, jenis data yang digunakan, instrumen analisis, hingga prosedur evaluasi stabilitas struktur.

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Bendung Air Alas, Kabupaten Seluma, Provinsi Bengkulu. Bendung ini merupakan infrastruktur irigasi utama dengan luas layanan sekitar 4.500 hektar dan terletak di Daerah Aliran Sungai (DAS) Alas. Secara umum, kondisi sungai memiliki debit yang cukup besar pada musim hujan sehingga diperlukan tanggul pelindung yang memadai untuk mencegah erosi dan kerusakan struktur.

B. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data teknis hasil kajian sebelumnya, antara lain:

- Dimensi bangunan bendung dan tanggul eksisting;
- Data muka air normal dan muka air banjir yang telah dihitung pada tahap analisis hidrologi dan hidrolika;

- Parameter geoteknik tanah dasar (kohesi, sudut geser dalam, berat isi tanah);
- Standar perencanaan: SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, dan SNI 1726:2019 sebagai acuan desain struktur beton dan pembebanan.

C. Instrumen Analisis

Adapun analisa dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Perhitungan manual, digunakan untuk menentukan dimensi tanggul beton bertulang, ketebalan dinding, ketebalan telapak, serta kebutuhan tulangan;
- Perangkat lunak Geo5, digunakan untuk analisis stabilitas tanggul dengan mempertimbangkan dua kondisi muka air, yaitu normal dan banjir. Evaluasi dilakukan terhadap faktor keamanan guling, geser, daya dukung tanah, dan stabilitas lereng.

D. Prosedur Analisis

Tahapan analisis dalam penelitian ini meliputi:

- Identifikasi kondisi eksisting, yakni mengevaluasi kelemahan struktur tanggul yang masih berupa bronjong atau belum permanen;
- Perencanaan desain tanggul beton, yakni menentukan dimensi tanggul (tebal sisi miring, tebal telapak, kebutuhan tulangan) sesuai SNI 2847:2019;
- Evaluasi stabilitas, yakni pemodelan dengan Geo5 untuk kondisi muka air normal dan muka air banjir;
- Interpretasi hasil, yakni membandingkan faktor keamanan dari hasil simulasi dengan batas aman yang dipersyaratkan, untuk menilai kelayakan desain tanggul beton.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan latar belakang yang sudah disampaikan pada sub-bab sebelumnya, maka hasil dan pembahasan pada penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

A. Kondisi Eksisting Tanggul Bendung Air Alas

Berdasarkan hasil identifikasi lapangan, kondisi eksisting tanggul pada Bendung Air Alas masih memiliki beberapa kelemahan:

- Belum ada konstruksi permanen di sisi hulu kanan. Area ini hanya berupa tanggul bronjong sehingga rawan rusak akibat erosi dan tekanan aliran sungai;

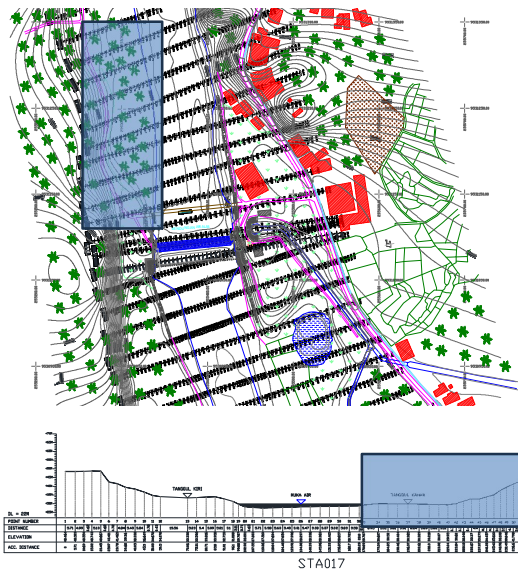
- Kerusakan pada sayap hilir kanan yang menyebabkan fungsi pengarah aliran air berkurang;
- Kebocoran dinding kiri (hilir intake) yang berpotensi mengganggu stabilitas struktur bendung secara keseluruhan;
- Kerusakan mercu bendung akibat umur layan yang panjang dan beban hidraulik berulang.



Gambar 1. Kondisi eksisting sayap hilir kanan

Berdasarkan hasil survei topografi dan analisis hidrolika, diperoleh informasi sebagai berikut:

- Beda tinggi dari elevasi puncak tanggul hingga dasar sungai sekitar $\pm 8,00$ m;
- Muka air normal berada pada elevasi $-4,90$ m dari puncak tanggul. Sedangkan muka air di belakang tanggul sekitar $-7,00$ m dari puncak tanggul;
- Muka air banjir berada pada elevasi $-2,70$ m dari puncak tanggul. Sedangkan muka air di belakang tanggul sekitar $-6,20$ m dari puncak tanggul.



Gambar 2. Kondisi eksisting berdasarkan survei topografi

Kondisi ini menunjukkan bahwa struktur pelindung bendung masih belum optimal. Tanggul bronjong yang ada bersifat sementara dan kurang mampu menahan gaya hidraulik besar. Apabila dibiarkan, maka akan mempercepat erosi tebing serta memperpendek umur layan bendung.

B. Urgensi Rehabilitasi dengan Tanggul Beton
Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pembangunan tanggul beton bertulang sebagai pengganti bronjong. Beton bertulang dipilih karena:

- Memiliki daya tahan tinggi terhadap arus deras;
- Mampu menahan tekanan lateral tanah;
- Lebih awet dibandingkan material konvensional;
- Memungkinkan presisi konstruksi sesuai standar teknis.

Dengan demikian, rehabilitasi berupa pembangunan tanggul beton menjadi langkah penting untuk menjamin keberlanjutan fungsi Bendung Air Alas sebagai penyedia air irigasi bagi lahan pertanian di Kabupaten Seluma.

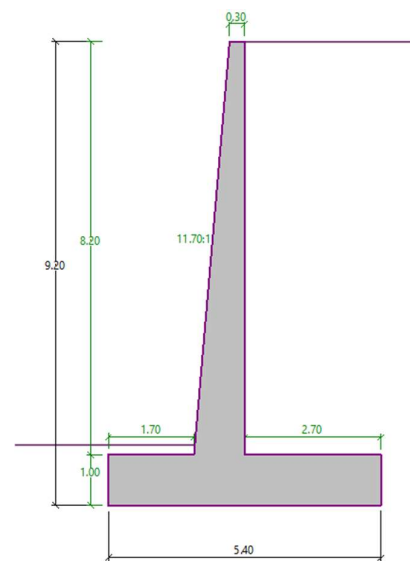
C. Rencana Penanganan

Berdasarkan data tersebut, direncanakan penanganan berupa:

- Pembangunan dinding tanggul beton dengan elevasi puncak mengikuti pasangan batu eksisting di samping mercu bending;
- Penimbunan di belakang tanggul dilakukan untuk meningkatkan kestabilan lereng serta mendukung konstruksi baru.

D. Detail Dimensi Tanggul Beton

Berdasarkan hasil perencanaan struktur dan evaluasi menggunakan acuan SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, serta SNI 1726:2019, diperoleh desain tanggul beton sebagai berikut:



Gambar 3. Detail dimensi tanggul beton

Gambar menunjukkan potongan melintang tanggul beton bertulang dengan bentuk menyerupai Cantilever Wall. Detail dimensinya sebagai berikut:

- Tinggi total struktur: 9,20 m;
- Tinggi dinding tegak: 8,20 m;
- Tebal puncak dinding: 0,30 m;
- Tebal dasar dinding (kaki): ±1,00 m.

Dimensi telapak (pondasi bawah):

- Lebar total telapak: 5,40 m;
- Lebar telapak sisi hilir: 2,70 m;
- Lebar telapak sisi hulu: 1,70 m.

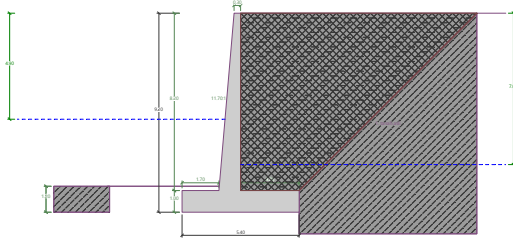
Geometri dinding:

- Dinding utama memiliki kemiringan sekitar 11,70 : 1, sehingga sisi luarnya sedikit miring (tidak tegak lurus), untuk memperbaiki distribusi gaya tekan.

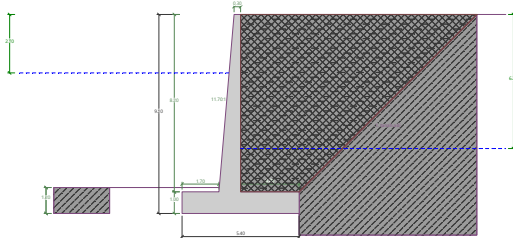
- Tebal dinding mengecil dari dasar ke puncak (tapered wall).

E. Evaluasi Stabilitas

Evaluasi stabilitas tanggul beton dilakukan untuk memastikan struktur yang direncanakan mampu menahan gaya yang bekerja baik pada kondisi muka air normal maupun muka air banjir. Analisis ini mempertimbangkan gaya hidrostatis, beban tanah aktif, serta berat sendiri struktur. Perhitungan dilakukan dengan mengacu pada kriteria keamanan yang berlaku sesuai standar SNI dan menggunakan perangkat lunak Geo5 untuk memperoleh faktor keamanan.



Gambar 4. Pemodelan muka air normal



Gambar 5. Pemodelan muka air banjir

a. Kondisi Muka Air Normal

Pada kondisi muka air normal, elevasi air berada pada $-4,90$ m dari puncak tanggul. Tekanan hidrostatis yang bekerja relatif lebih kecil dibandingkan kondisi banjir. Hasil analisis menunjukkan bahwa tanggul memiliki stabilitas yang memadai, ditunjukkan dengan:

- Evaluasi stabilitas tanggul beton pada kondisi muka air normal dilakukan untuk menilai kinerja struktur saat beban hidrostatis berada dalam keadaan sehari-hari. Berdasarkan hasil analisis, momen penahan (M_{res}) yang dihasilkan tanggul adalah sebesar $2.253,94$ kNm/m, sedangkan momen guling (M_{ovr}) yang bekerja adalah $831,48$ kNm/m. Dari perbandingan kedua nilai tersebut diperoleh faktor keamanan terhadap guling sebesar

$2,71$. Nilai ini jauh di atas ambang batas minimum $1,50$ sebagaimana dipersyaratkan dalam standar perencanaan struktur beton. Artinya, tanggul memiliki kapasitas yang lebih dari cukup untuk menahan gaya guling akibat tekanan air maupun tanah pada kondisi normal.

- Selain guling, pemeriksaan terhadap potensi geser juga dilakukan. Gaya horizontal penahan (H_{res}) tercatat sebesar $361,63$ kN/m, sementara gaya aktif yang bekerja (H_{act}) sebesar $223,93$ kN/m. Hasil perhitungan memberikan faktor keamanan geser sebesar $1,61$. Nilai ini lebih besar daripada kriteria minimum $1,50$, sehingga dinding tanggul dinyatakan aman terhadap pergeseran horizontal. Kondisi ini menunjukkan bahwa dimensi telapak tanggul sudah memadai untuk mencegah pergerakan yang tidak diinginkan akibat gaya lateral.
- Selanjutnya, evaluasi eksentrisitas gaya normal memperlihatkan bahwa nilai maksimum eksentrisitas yang terjadi adalah $0,082$, jauh lebih kecil dari nilai yang diizinkan yaitu $0,333$. Hal ini menandakan bahwa distribusi gaya tekan pada pondasi masih berada dalam zona tengah-tengah alas fondasi sehingga tidak menimbulkan konsentrasi tegangan yang berlebihan di salah satu sisi.
- Pemeriksaan kapasitas dukung tanah menghasilkan tegangan maksimum pada dasar pondasi sebesar $139,66$ kPa, sedangkan kapasitas dukung tanah adalah $400,00$ kPa. Dengan demikian, faktor keamanan terhadap daya dukung tanah mencapai $2,86$. Nilai ini memperlihatkan bahwa pondasi tanggul masih mampu menahan beban yang bekerja dengan margin keamanan yang tinggi.
- Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan berbagai metode, di antaranya Bishop, Fellenius, Spencer, Janbu, dan Morgenstern-Price. Semua metode menghasilkan faktor keamanan rata-rata $3,35-3,42$, yang jelas berada jauh di atas kriteria minimum $1,50$. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi lereng di sekitar tanggul dalam keadaan stabil, baik terhadap potensi kelongsoran parsial maupun global. Secara keseluruhan, evaluasi menunjukkan bahwa pada kondisi muka air normal, tanggul beton berada dalam kondisi sangat memadai

dan aman untuk mengantisipasi gaya yang bekerja.

b. Kondisi Muka Air Banjir

Pada kondisi muka air banjir, elevasi air meningkat hingga $-2,70$ m dari puncak tanggul. Hal ini menimbulkan tekanan hidrostatik yang lebih besar serta gaya lateral yang signifikan terhadap struktur. Berdasarkan hasil simulasi, tanggul tetap dinyatakan aman dengan hasil:

- Evaluasi kondisi muka air banjir menjadi penting karena pada saat debit puncak, gaya hidrostatik yang bekerja terhadap tanggul meningkat secara signifikan. Pada kondisi ini, momen penahan (M_{res}) tercatat sebesar $2.155,48$ kNm/m, sedangkan momen guling (M_{ovr}) sebesar $523,80$ kNm/m. Hasil perhitungan menunjukkan faktor keamanan terhadap guling mencapai $4,12$, nilai yang jauh melampaui kriteria minimum $1,50$. Hal ini membuktikan bahwa struktur tanggul mampu menahan gaya guling meskipun dalam keadaan beban hidrolis ekstrem.
- Pada pemeriksaan geser, gaya horizontal penahan (H_{res}) tercatat $362,31$ kN/m, sementara gaya aktif yang bekerja hanya sebesar $118,77$ kN/m. Perbandingan kedua gaya ini menghasilkan faktor keamanan geser sebesar $3,05$. Dengan nilai ini, tanggul beton dipastikan memiliki kemampuan yang tinggi untuk mencegah pergeseran horizontal pada saat banjir. Lebarnya telapak fondasi berkontribusi besar dalam menjaga stabilitas ini.
- Eksentrisitas gaya normal pada kondisi banjir bahkan menunjukkan nilai nol ($e = 0,000$), yang berarti distribusi gaya tekan benar-benar berada pada pusat pondasi. Kondisi ini sangat ideal karena meminimalkan risiko konsentrasi tegangan pada tepi pondasi. Selanjutnya, pada pemeriksaan kapasitas dukung tanah, tegangan maksimum pada dasar pondasi hanya sebesar $111,69$ kPa, sementara kapasitas dukung tanah tercatat $400,00$ kPa. Dengan demikian, faktor keamanan yang diperoleh adalah $3,58$, menunjukkan bahwa pondasi memiliki ketahanan yang sangat baik meskipun mengalami peningkatan beban dari kondisi normal ke kondisi banjir.
- Stabilitas lereng juga dianalisis menggunakan metode Bishop, Fellenius,

Spencer, Janbu, dan Morgenstern-Price. Semua metode konsisten memberikan faktor keamanan tinggi dalam rentang $4,01-4,10$. Nilai ini sangat jauh di atas syarat minimum $1,50$, sehingga lereng di sekitar tanggul tetap aman dari potensi longsor maupun pergeseran tanah saat debit puncak.

Hasil ini secara keseluruhan memperlihatkan bahwa desain tanggul beton yang diusulkan memiliki kapasitas keamanan yang lebih dari cukup dalam menghadapi kondisi beban banjir. Bahkan, faktor keamanan yang diperoleh relatif lebih tinggi dibandingkan kondisi muka air normal, karena konfigurasi beban dan distribusi gaya pada saat banjir justru menghasilkan kondisi tekan yang lebih sentral pada pondasi. Dengan demikian, tanggul beton dapat dikatakan sangat layak dan handal untuk melindungi bendung dari risiko kerusakan akibat banjir besar.

F. Analisis Struktur Beton dan Tulangan

Hasil analisis perhitungan struktur dengan perangkat lunak Geo5 menunjukkan bahwa desain penulangan tanggul beton Bendung Air Alas telah memenuhi kriteria keamanan sesuai ketentuan SNI 2847:2019. Evaluasi dilakukan pada tiga bagian utama, yaitu batang dinding (*wall stem*), titik loncatan (*wall jump*), dan tumit dinding (*wall heel*).

a. Wall Stem (Batang Dinding)

Pada bagian dinding utama, gaya yang bekerja didominasi oleh tekanan tanah pada kondisi diam (*pressure at rest*) sebesar $383,80$ kN/m, dengan tambahan beban dari berat sendiri dinding serta tekanan air. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tulangan pada sisi depan tidak diperlukan, sementara pada sisi belakang diperlukan penulangan sebanyak 8 batang berdiameter 22 mm dengan selimut beton 30 mm. Luas tulangan yang diinput sebesar $3.041,1$ mm², lebih besar dari luas tulangan minimum yang disyaratkan yaitu $2.330,5$ mm².

- Rasio tulangan $\rho = 0,32\% > \rho_{min} = 0,14\%$.
 - Posisi sumbu netral berada pada $x = 0,06$ m < $x_{max} = 0,58$ m.
 - Kapasitas geser $V_{Rd} = 353,04$ kN > $V_{Ed} = 336,48$ kN.
 - Kapasitas momen $M_{Rd} = 1.279,45$ kNm > $M_{Ed} = 984,71$ kNm.
- Semua kriteria terpenuhi sehingga penampang dinding dinyatakan satisfactory.

b. *Wall Jump* (Titik Loncatan)

Pada bagian ini, beban yang bekerja berasal dari kombinasi berat dinding, tekanan tanah aktif sebesar 295,92 kN/m, serta pengaruh tekanan air. Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan tulangan sebesar 1.373,0 mm², sedangkan luas tulangan yang dipasang adalah 1.417,6 mm² dengan konfigurasi 5 batang diameter 19 mm.

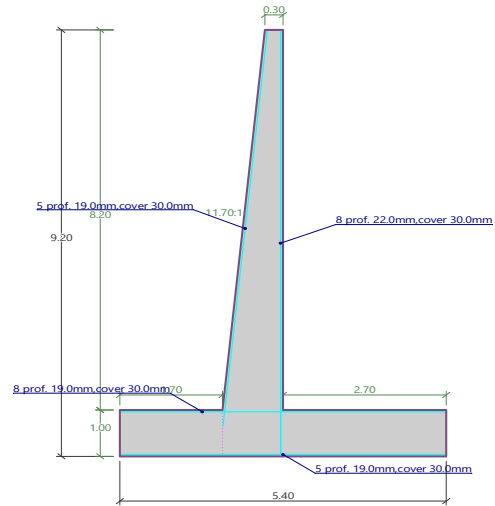
- Rasio tulangan $\rho = 0,15\% > \rho_{\min} = 0,14\%$.
- Posisi sumbu netral $x = 0,04 \text{ m} < x_{\max} = 0,58 \text{ m}$.
- Kapasitas geser $V_{Rd} = 320,46 \text{ kN} > V_{Ed} = 226,34 \text{ kN}$.
- Kapasitas momen $MRd = 605,23 \text{ kNm} > MEd = 336,09 \text{ kNm}$.
Hasil analisis menunjukkan bahwa bagian *wall jump* aman dan memenuhi syarat.

c. *Wall Heel* (Tumit Dinding)

Pada bagian tumit, gaya utama yang bekerja adalah berat tanah di atas telapak, tekanan tanah aktif, serta tegangan kontak tanah pondasi. Tulangan yang dipasang adalah 8 batang diameter 19 mm dengan selimut beton 30 mm, memberikan luas tulangan 2.268,2 mm², lebih besar dari kebutuhan 1.521,2 mm².

- Rasio tulangan $\rho = 0,24\% > \rho_{\min} = 0,14\%$.
- Posisi sumbu netral $x = 0,07 \text{ m} < x_{\max} = 0,58 \text{ m}$.
- Kapasitas geser $V_{Rd} = 320,46 \text{ kN} > V_{Ed} = 273,51 \text{ kN}$.
- Kapasitas momen $MRd = 958,31 \text{ kNm} > MEd = 648,62 \text{ kNm}$.
Bagian tumit tanggul dinyatakan aman karena semua parameter memenuhi persyaratan.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan memperlihatkan bahwa desain tulangan yang digunakan telah memberikan margin keamanan yang cukup. Nilai rasio tulangan pada setiap bagian lebih besar dari nilai minimum, kapasitas momen dan geser selalu melebihi kebutuhan, serta posisi sumbu netral berada dalam batas yang aman. Hal ini menunjukkan bahwa desain tanggul beton tidak hanya aman terhadap gaya hidrolik dan tanah, tetapi juga sesuai standar perencanaan beton bertulang. Dengan demikian, struktur tanggul secara keseluruhan dinyatakan memadai dan layak untuk dilaksanakan.



Gambar 6. Detail penulangan

G. Diskusi Perbandingan dengan Studi Terdahulu

Hasil analisis stabilitas dan struktur tanggul beton pada Bendung Air Alas menunjukkan bahwa desain yang direncanakan aman terhadap guling, geser, daya dukung tanah, maupun kapasitas momen dan geser pada penampang beton. Kondisi ini konsisten dengan temuan beberapa penelitian sebelumnya.

(Putra & Wulandari, 2020) menekankan bahwa penerapan turap beton pada tanggul memberikan faktor keamanan lebih tinggi dibandingkan tanggul urugan tanah, terutama saat menghadapi debit banjir besar. Hasil pada Bendung Air Alas memperlihatkan kecenderungan serupa, di mana margin keamanan tetap tinggi meskipun pada kondisi debit puncak.

Studi (Indrawan A. &, 2020) yang menggunakan analisis numerik juga menunjukkan pentingnya evaluasi tekanan tanah dan hidrostatis untuk memastikan distribusi beban berada pada zona aman. Pada penelitian ini, kondisi muka air banjir justru memberikan hasil lebih sentral pada pondasi, sehingga menurunkan eksentrisitas dan meningkatkan stabilitas. Fenomena ini mendukung argumen bahwa analisis numerik dengan perangkat lunak seperti Geo5 mampu menggambarkan respon struktur secara lebih akurat dibandingkan metode konvensional.

Selain itu, (Nugroho & Rahayu, 2020) menegaskan bahwa evaluasi elemen struktur tanggul harus memperhatikan rasio tulangan minimum dan kapasitas momen. Hasil analisis tanggul Bendung Air Alas memperlihatkan

bahwa semua rasio tulangan yang digunakan lebih besar dari nilai minimum yang dipersyaratkan, dan kapasitas momen (MRd) selalu lebih besar daripada momen yang bekerja (MEd). Hal ini membuktikan bahwa desain sudah sesuai dengan prinsip perencanaan beton bertulang sebagaimana diatur dalam SNI 2847:2019.

Dari sisi konteks lokal, penelitian (Effendi, Syafriadi, & Rahmawati, 2019) terkait efisiensi saluran tersier di Bendung Air Seluma menunjukkan adanya permasalahan kehilangan air yang cukup signifikan. Rehabilitasi tanggul beton pada Bendung Air Alas menjadi salah satu solusi yang relevan, karena mampu memperpanjang umur layan bendung serta menjaga kontinuitas distribusi air irigasi. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mendukung temuan studi terdahulu secara teoretis, tetapi juga memberikan kontribusi praktis untuk peningkatan infrastruktur irigasi di Kabupaten Seluma.

Rancangan beton bertulang yang diusulkan juga mempertimbangkan literatur variasi mutu beton, (Yanuar, Dewi, Iqbal, & Valensia, 2025) yang mengeksplorasi penggunaan batu gamping sebagai agregat kasar dan pengaruhnya terhadap kuat tekan beton.

V. KESIMPULAN

- Kondisi eksisting menunjukkan bahwa tanggul bendung masih berupa konstruksi sementara (bronjong) yang rentan terhadap erosi, kebocoran, dan penurunan fungsi akibat tekanan hidrolik sungai. Hal ini menegaskan urgensi rehabilitasi dengan struktur permanen.
- Desain tanggul beton bertulang yang diusulkan memiliki dimensi utama berupa tebal sisi miring 25 cm, tebal telapak 80 cm, serta tinggi total $\pm 8,00$ m. Mutu material yang digunakan adalah beton dengan kuat tekan $f_c' = 24,90$ MPa dan tulangan baja $f_y = 400$ MPa.
- Evaluasi stabilitas dengan perangkat lunak Geo5 memperlihatkan bahwa pada kondisi muka air normal maupun banjir, tanggul memenuhi kriteria aman terhadap guling, geser, kapasitas dukung tanah, dan stabilitas lereng. Faktor keamanan yang diperoleh selalu lebih besar dari 1,50, sesuai standar perencanaan.

- Analisis struktur beton dan tulangan menunjukkan bahwa luas penulangan yang direncanakan selalu lebih besar dari luas minimum yang dipersyaratkan. Kapasitas momen (MRd) dan geser (VRd) juga melebihi beban yang bekerja (MEd dan VEd), sehingga penampang dinyatakan aman.
- Secara keseluruhan, desain tanggul beton pada Bendung Air Alas dinyatakan layak dan memadai untuk diimplementasikan, serta mampu meningkatkan keandalan bendung dalam mendukung distribusi air irigasi di Kabupaten Seluma.

Adapun saran yang dapat penulis sampaikan adalah sebagai berikut:

- Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis beban gempa secara lebih detail, mengingat wilayah Bengkulu termasuk zona rawan gempa, sehingga desain tanggul lebih komprehensif terhadap beban dinamis.
- Kajian serupa dapat dikembangkan pada bendung irigasi lain di Kabupaten Seluma atau daerah sekitarnya untuk memperkuat sistem irigasi secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Beton struktural untuk bangunan gedung (SNI 2847:2019)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung (SNI 1726:2019)*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain (SNI 1727:2020)*. Jakarta: BSN.
- Balai Wilayah Sungai Sumatera VII. (2023). *Peningkatan jaringan irigasi kiri di D.I. Air Alas, Kabupaten Seluma*. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PUPR. Retrieved from <https://sda.pu.go.id/balai/bwssumatera7/berita/peningkatan-jaringan-irigasi-kiri-di-air-alas-kab-seluma>
- Effendi, R. S. (2019). *Analisis efisiensi saluran tersier di Daerah Irigasi Bendung Air Seluma*. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Bengkulu*, 5(2), 45–52. Retrieved from <https://repository.unib.ac.id/id/eprint/827>
- Effendi, R., Syafriadi, & Rahmawati, I. (2019). *Analisis efisiensi saluran tersier di Daerah Irigasi Bendung Air Seluma*. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Bengkulu*, 5(2), 45–52.
- Indrawan, A., & Hartono, S. (2020). *Analisis stabilitas tanggul pada Kolam Retensi Terboyo menggunakan metode numerik*. *Jurnal Teknik Sipil Unissula*, 12(1),

- 1–10. Retrieved from <https://repository.unissula.ac.id/32559>
- Nugroho, T. A., & Rahayu, D. (2020). *Kajian kestabilan tubuh tanggul dengan metode elemen hingga: Studi kasus Tanggul Wedok, Sidoarjo. Jurnal Geoteknik Undip*, 55–64.
- Putra, A. D., & Wulandari, N. (2020). *Studi perencanaan tanggul dengan turap beton dan urugan tanah. Jurnal Teknik Sumber Daya Air Universitas Brawijaya*, 32–40.
- Universitas Bengkulu. (2021). *Analisis kerusakan dan efisiensi saluran irigasi Air Alas, Kabupaten Seluma*. Laporan Penelitian Fakultas Teknik. Retrieved from <https://repository.unib.ac.id/id/eprint/17202>
- Yanuar, S. F., Dewi, I. C., Iqbal, A., & Valensia, I. (2025). *Kuat tekan beton estetik menggunakan gamping sebagai campuran agregat kasar. Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 272–283.