

BAB III

METODOLOGI DAN PENELITIAN

3.1 Umum

Metodologi penelitian adalah serangkaian langkah terstruktur yang diterapkan untuk menyelesaikan penelitian sehingga menghasilkan hasil yang memenuhi sasaran yang telah ditentukan. Penelitian ini merupakan tipe penelitian perencanaan (design research) yang bertujuan untuk mengembangkan struktur pengaman tebing sungai dengan tipe bronjong berdasarkan analisis kestabilan lereng. Metode yang diterapkan dalam penelitian ini adalah pendekatan teoritis yang menggunakan teori Allowable Stress Design (ASD) untuk merancang struktur bronjong dan teori Terzaghi untuk analisis konsolidasi serta kestabilan lereng.

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan secara bertahap dengan mengikuti alur diagram alir yang dirancang untuk mempermudah analisis dan interpretasi hasil. Semua analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak GeoStudio yang dimodul menggunakan pendekatan metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*).

3.2 Jenis Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam jenis penelitian perencanaan (design research) dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian perencanaan merupakan penelitian yang bertujuan untuk menghasilkan suatu desain atau rancangan teknis berdasarkan analisis teoritis dan data empiris yang ada. Dalam konteks penelitian ini, jenis penelitian perencanaan dipilih karena:

1. Tujuan yang bersifat aplikatif: Penelitian ini bertujuan menghasilkan desain struktur pengaman tebing yang dapat diaplikasikan di lokasi penelitian.
2. Pendekatan analitis: Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis berdasarkan teori-teori mekanika tanah dan teknik struktur yang telah mapan.
3. Output berupa desain: Hasil akhir penelitian berupa dimensi dan spesifikasi teknis struktur bronjong yang aman dan efisien.
4. Pendekatan teoritis yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:
 - a. Teori Allowable Stress Design (ASD): Digunakan dalam perencanaan struktur bronjong dengan prinsip bahwa tegangan yang terjadi pada struktur tidak boleh melebihi tegangan ijin material.

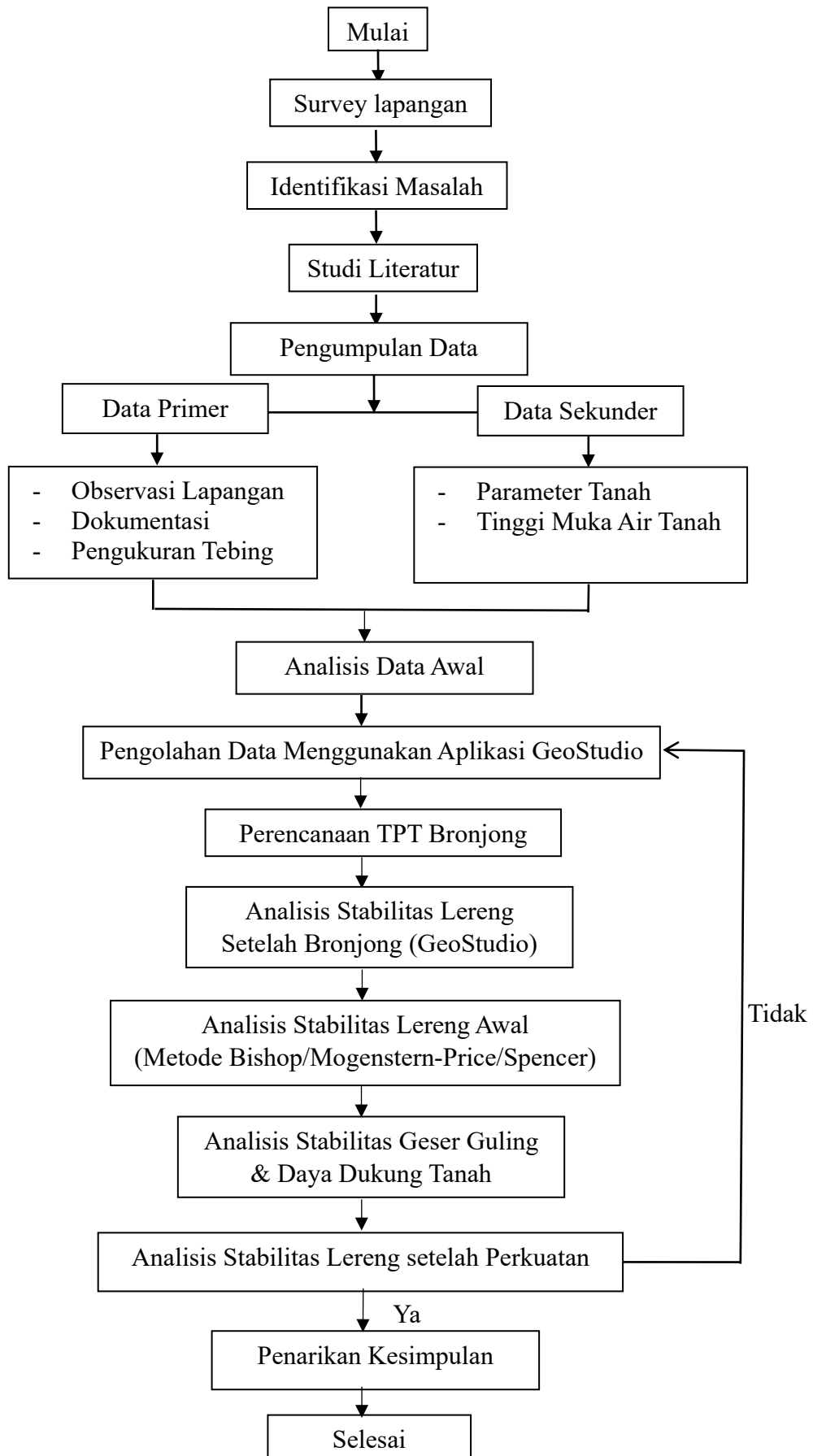
- b. Teori Terzaghi: Digunakan sebagai dasar analisis konsolidasi tanah dan stabilitas lereng, termasuk teori konsolidasi satu dimensi dan teori stabilitas lereng.

3.3 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di daerah tepian Sungai/Kali Subang yang terletak di Desa Bulaklo, Kecamatan Balen, Kabupaten Bojonegoro, Provinsi Jawa Timur. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kondisi lapangan yang menunjukkan adanya indikasi ketidakstabilan tebing sungai akibat erosi dan longsor. Lokasi penelitian berada pada koordinat geografis yang dapat diidentifikasi secara spasial dan memiliki karakteristik tanah serta kondisi hidrologi yang representatif untuk studi stabilitas lereng.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini disusun dengan tahapan yang sistematis untuk memastikan setiap langkah analisis dilakukan secara berurutan dan terstruktur. Diagram alir berikut menggambarkan keseluruhan proses penelitian yang akan dilaksanak



Gambar 3.1 : *Bagan Alir Penelitian*

3.5 Tebing Sungai dan Permasalahannya

3.5.1 Pengertian Tebing Sungai

Tebing sungai adalah bagian sisi kiri dan kanan alur sungai yang membatasi badan sungai, biasanya berupa lereng tanah atau batuan yang terbentuk akibat proses geomorfologi seperti erosi, sedimentasi, dan aliran air.

a. Teori *Allowable Stress Design* (ASD)

Studi literatur mengenai teori ASD mencakup:

1. Konsep dasar tegangan ijin material
2. Prinsip perencanaan struktur dengan metode tegangan kerja
3. Faktor keamanan dalam perencanaan struktur
4. Aplikasi ASD pada struktur bronjong
5. Peraturan dan standar yang relevan (SNI, ACI, dll.)

b. Teori Terzaghi

Studi literatur mengenai teori Terzaghi mencakup:

1. Teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi
2. Parameter konsolidasi (C_v , C_c , C_s , a_v , m_v)
3. Penurunan konsolidasi primer dan sekunder
4. Teori stabilitas lereng
5. Pengaruh tekanan air pori terhadap stabilitas lereng

Selain kedua pendekatan teoritis tersebut, studi literatur juga mencakup kajian tentang karakteristik sungai, erosi tebing, jenis-jenis struktur pengaman tebing, serta penggunaan perangkat lunak GeoStudio dalam analisis geoteknik.

3.5.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan tahapan krusial yang menentukan kualitas hasil analisis. Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder.

1. Data Primer

Data primer adalah data yang diperoleh secara langsung dari lokasi penelitian melalui observasi dan pengukuran lapangan.

Kegiatan pengumpulan data primer meliputi:

- a. Observasi Lapangan: Melakukan survei langsung ke lokasi penelitian di tepian Sungai Kali Subang, Desa Bulaklo, untuk mengamati kondisi eksisting tebing, pola aliran sungai, serta indikasi kerusakan seperti retakan, longsoran, dan erosi yang terjadi.
- b. Dokumentasi: Mengambil foto dan video kondisi tebing sungai untuk mendokumentasikan keadaan aktual di lapangan sebagai bahan pendukung analisis.
- c. Pengukuran Geometri Tebing: Melakukan pengukuran langsung terhadap dimensi tebing meliputi tinggi tebing, kemiringan lereng, dan lebar puncak tebing menggunakan alat ukur waterpass.

2. Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber-sumber yang telah tersedia dan relevan dengan lokasi penelitian. Data sekunder yang dikumpulkan

- a. Data Tanah: Parameter tanah yang diperlukan dalam analisis stabilitas lereng dan konsolidasi meliputi:
 1. Berat volume tanah (γ)
 2. Kohesi (c)
 3. Sudut geser dalam (ϕ)
 4. Angka pori (e_0)
 5. Kadar air (w)
- b. Data Geometri Tebing: Data mengenai bentuk dan dimensi tebing sungai yang diperoleh dari pengukuran topografi atau peta situasi lokasi penelitian.
- c. Data Muka Air Tanah: Data kedalaman dan fluktuasi muka air tanah (water table) di lokasi penelitian yang mempengaruhi tekanan air pori dalam tanah.
- d. Peta dan Citra Satelit: Peta topografi, peta geologi, dan citra satelit lokasi penelitian untuk mendukung analisis spasial.

3.5.3 Pengolahan Data

Setelah seluruh data terkumpul, tahap selanjutnya adalah melakukan pengolahan data untuk menyiapkan input yang diperlukan dalam analisis. Pengolahan data meliputi:

1. Validasi Data: Memeriksa kelengkapan dan keakuratan data yang diperoleh, serta melakukan koreksi jika ditemukan ketidaksesuaian.
2. Klasifikasi Tanah: Mengelompokkan jenis tanah berdasarkan parameter yang diperoleh untuk menentukan karakteristik mekanis tanah yang tepat sesuai sistem klasifikasi USCS atau AASHTO.
3. Penentuan Parameter Desain: Menetapkan nilai parameter tanah yang akan digunakan dalam analisis, termasuk nilai kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), berat volume tanah (γ), serta parameter konsolidasi untuk setiap lapisan tanah yang ada.
4. Pemodelan Geometri: Membuat model geometri tebing berdasarkan data pengukuran lapangan untuk diinput ke dalam perangkat lunak GeoStudio.

3.6 Analisis Stabilitas Lereng GeoStudio

3.6.1 Pengenalan Software GeoStudio

Tebing sungai adalah bagian sisi kiri dan kanan alur sungai yang membatasi badan sungai, biasanya berupa lereng tanah atau batuan yang terbentuk akibat proses geomorfologi seperti erosi, sedimentasi, dan aliran air. (Rama et al., 2017)

1. SLOPE/W: Modul untuk analisis stabilitas lereng menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method). Modul ini digunakan untuk menghitung angka keamanan (Safety Factor/SF) lereng sebelum dan sesudah pemasangan bronjong.
2. SEEP/W: Modul untuk analisis rembesan air tanah yang digunakan untuk menentukan kondisi muka air tanah dan tekanan air pori pada lereng.

3.6.2 Metode Analisis Stabilitas Lereng

Analisis stabilitas lereng dalam penelitian ini menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method) dengan pendekatan sebagai berikut:

1. Metode Bishop yang Disederhanakan: Metode ini mengasumsikan bahwa gaya antar irisan adalah horizontal dan memenuhi keseimbangan momen. (Octovian et al., 2014)

Metode Bishop memberikan hasil yang cukup akurat untuk lereng dengan bidang longsor berbentuk lingkaran. Nilai angka keamanan dihitung dengan persamaan:

$$SF = \frac{\sum \frac{[c'b + (W - ub)\tan \phi']}{\cos \alpha (1 + \tan \alpha \tan \phi' / SF)}}{\sum W \sin \alpha}$$

dimana:

1. c' = kohesi efektif
 2. ϕ' = sudut geser dalam efektif
 3. b = lebar irisan
 4. W = berat irisan
 5. u = tekanan air pori
 6. α = sudut kemiringan dasar irisan
2. Metode Morgenstern-Price merupakan salah satu metode Limit Equilibrium Method (LEM) yang dikembangkan oleh Morgenstern dan Price (1965). (Hedianto et al., 2022)

Metode ini termasuk metode yang paling akurat karena memenuhi dua persamaan keseimbangan sekaligus, yaitu:

1. Keseimbangan gaya horizontal
2. Keseimbangan gaya vertikal
3. Keseimbangan momen

Berbeda dengan metode Ordinary, Bishop, atau Janbu, metode Morgenstern-Price mempertimbangkan gaya antar irisan (inter-slice forces) secara lebih lengkap sehingga memberikan hasil analisis yang lebih realistis.

Metode ini banyak digunakan pada perangkat lunak geoteknik seperti:

GeoStudio SLOPE/W

Slide2 (Rocscience)

- a. Prinsip Dasar Metode Morgenstern-Price

Pada setiap irisan tanah bekerja beberapa gaya sebagai berikut:

1. Berat irisan (W)
2. Gaya normal dasar irisan (N)
3. Gaya geser dasar irisan (T)
4. Tekanan air pori (u)
5. Gaya normal antar irisan (E)
6. Gaya geser antar irisan (X)

Hubungan gaya antar irisan dinyatakan sebagai

$$X = \lambda f(x) E$$

dengan:

X = gaya geser antar irisan (kN)

E = gaya normal antar irisan (kN)

λ = faktor skala yang diperoleh melalui proses iterasi

$f(x)$ = fungsi distribusi gaya antar irisan

Fungsi distribusi $f(x)$ dapat dipilih sesuai kondisi analisis, misalnya:

1. Constant
2. Half-sine
3. Trapezoidal
4. Linear

b. Kriteria Kuat Geser Tanah

Metode Morgenstern-Price menggunakan kriteria kuat geser Mohr-Coulomb, yaitu:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi$$

Keterangan:

T = kuat geser tanah (kPa)

c = kohesi tanah (kPa)

σ' = tegangan normal efektif (kPa)

ϕ = sudut geser dalam tanah ($^{\circ}$)

c. Faktor Keamanan (Factor of Safety)

Faktor keamanan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya penahan terhadap gaya penggerak.

Dengan Persamaan :

$$FS = \frac{\text{Gaya Penggerak}}{\text{Gaya Penahan}}$$

Atau

$$FS = \frac{\text{Shear Strength Required}}{\text{Shear Strength Available}}$$

Apabila:

$FS < 1,0 \rightarrow$ lereng gagal

$FS = 1,0 \rightarrow$ kondisi batas

$FS > 1,25 \rightarrow$ lereng stabil

$FS > 1,50 \rightarrow$ aman untuk desain permanen

3. Metode Spencer Analisis stabilitas lereng pada perencanaan tebing yang diperkuat dengan menggunakan bronjong (gabion) dilakukan dengan Metode Spencer. Metode ini merupakan salah satu teknik dari Limit Equilibrium Method (LEM) yang secara bersamaan memenuhi keseimbangan gaya (force equilibrium) dan keseimbangan momen (moment equilibrium), sehingga menghasilkan nilai Faktor Keamanan (Safety Factor/SF) yang lebih tepat dibandingkan dengan metode yang hanya memerhatikan salah satu kondisi keseimbangan. (WoroSundari., 2024)
1. Dalam analisis ini, massa tanah yang berpotensi mengalami longsor dibagi menjadi beberapa irisan vertikal (slices). Setiap irisan dianalisis berdasarkan gaya-gaya yang berpengaruh, termasuk berat tanah, tekanan air pori, gaya normal, gaya geser, serta gaya antaririsan. Metode Spencer mengasumsikan bahwa resultan gaya antaririsan memiliki sudut kemiringan yang tetap pada semua irisan. Melalui proses iterasi, diperoleh nilai Faktor Keamanan yang memenuhi keseimbangan gaya dan momen secara bersamaan hingga mencapai kondisi konvergen.

a. Faktor Keamanan (Safety Factor)

Pada Metode Spencer, kuat geser tanah yang tersedia dibagi dengan Faktor Keamanan (SF), sehingga persamaan kuat geser menjadi:

$$\tau_f = \frac{c' + (\sigma - u)\tan \phi'}{F}$$

Keterangan:

τ_f = kuat geser yang bekerja (kPa)

c' = kohesi efektif (kPa)

σ = tegangan normal (kPa)

u = tekanan air pori (kPa)

ϕ' = sudut geser dalam ($^{\circ}$)

F = Faktor Keamanan (Safety Factor)

2. Prosedur Analisis Dengan GeoStudio Prosedur analisis stabilitas lereng menggunakan perangkat lunak GeoStudio dilakukan melalui tahapan berikut:

Tahap 1: Pembuatan Model Geometri

- a. Menentukan skala dan sistem koordinat yang akan digunakan
- b. Menggambar geometri lereng tebing berdasarkan data pengukuran lapangan
- c. Mendefinisikan batas-batas model (*boundary condition*)

Tahap 2: Penentuan Material dan Parameter Tanah

- a. Membuat lapisan tanah sesuai dengan kondisi stratigrafi di lokasi penelitian
- b. Memasukkan parameter tanah (γ , c , ϕ) untuk setiap lapisan
- c. Menentukan model material yang digunakan (*Mohr-Coulomb*)

Tahap 3: Penentuan Kondisi Batas

- a. Menentukan kondisi muka air tanah (*water table*) berdasarkan data hidrogeologi
- b. Menetapkan tekanan air pori (*pore water pressure*) pada setiap titik
- c. Menentukan kondisi beban yang bekerja pada lereng

Tahap 4: Penentuan Bidang Longsor Kritis

- a. Menentukan jangkauan pencarian bidang longsor (*entry and exit range*)
- b. Mengatur jumlah irisan (*slices*) untuk analisis
- c. Melakukan analisis untuk mencari bidang longsor dengan angka keamanan minimum

Tahap 5: Analisis Stabilitas Lereng Awal

- a. Menjalankan analisis stabilitas lereng tanpa struktur pengaman
- b. Mencatat nilai angka keamanan (*Safety Factor*) yang diperoleh
- c. Mengidentifikasi bidang longsor kritis dan pola keruntuhan yang mungkin terjadi

Tahap 6: Pemodelan Struktur Bronjong

- a. Mendefinisikan material bronjong dengan parameter yang sesuai

- b. Memodelkan geometri bronjong sesuai dengan dimensi yang direncanakan
- c. Menentukan interaksi antara bronjong dengan tanah dasar

Tahap 7: Analisis Stabilitas Lereng dengan Bronjong

- a. Menjalankan analisis stabilitas lereng setelah pemasangan bronjong
- b. Mencatat nilai angka keamanan yang diperoleh
- c. Membandingkan hasil analisis sebelum dan sesudah pemasangan bronjong

$$T_v = 1,781 - 0,933\log(100 - U\%)$$

3.7 Perbandingan Metode Bishop, Morgenstern-Price, dan Spencer

Metode Bishop Sederhana, Metode Morgenstern-Price, dan Metode Spencer adalah teknik analisis stabilitas lereng yang dianggap sebagai bagian dari Limit Equilibrium Method (LEM). Ketiga metode itu bertujuan sama, yaitu menghitung Faktor Keamanan (Factor of Safety/FoS) terkait potensi kelongsoran, tetapi berbeda dalam asumsi, tingkat akurasi, dan pemenuhan persamaan keseimbangan. Metode Bishop Sederhana hanya mencapai keseimbangan momen dengan menganggap gaya antarlisan bekerja secara horizontal, sehingga perhitungannya lebih mudah dan sangat cocok untuk analisis lereng dengan bidang longsor berbentuk lingkaran. Walaupun menghasilkan hasil yang cukup akurat pada kondisi lereng yang sederhana, metode ini kurang sesuai untuk diterapkan pada lereng dengan geometri yang kompleks atau yang terpengaruh oleh kondisi pembebanan yang lebih rumit.

Tidak seperti Metode Bishop, Metode Morgenstern-Price memenuhi semua persamaan keseimbangan, termasuk keseimbangan gaya horizontal, gaya vertikal, dan momen. Metode ini juga menghitung gaya antarlisan secara lebih mendetail melalui fungsi distribusi tertentu, sehingga mampu menghasilkan analisis yang lebih akurat mengenai kondisi lereng yang sesungguhnya. Oleh karena itu, Metode Morgenstern-Price diakui sebagai salah satu metode yang memiliki tingkat akurasi paling tinggi dan sering dipakai sebagai metode standar dalam perangkat lunak analisis geoteknik, seperti GeoStudio SLOPE/W dan Slide2.

Di sisi lain, Metode Spencer juga secara bersamaan menjaga keseimbangan gaya dan keseimbangan momen, menghasilkan nilai Faktor Keamanan yang sangat presisi. Perbedaannya dengan Metode Morgenstern-Price terletak pada asumsi gaya antarlisan, di mana Metode Spencer memperkirakan bahwa resultan gaya antarlisan memiliki sudut kemiringan yang tetap pada semua irisan. Anggapan tersebut menyederhanakan proses

iterasi, tetapi tetap menghasilkan nilai Faktor Keamanan yang hampir serupa dengan Metode Morgenstern-Price. Karena itu, Metode Spencer sering diterapkan dalam analisis stabilitas lereng yang membutuhkan akurasi tinggi, terutama pada perancangan lereng yang diperkuat dengan struktur seperti bronjong, dinding penahan tanah, dan perkuatan geoteknik lainnya

Secara umum, Morgenstern-Price merupakan metode yang paling komprehensif karena memenuhi seluruh persamaan keseimbangan dan menggunakan distribusi gaya antarrisan yang fleksibel. Oleh karena itu, metode ini sering dijadikan acuan (reference method) dalam analisis stabilitas lereng.

3.8 Perencanaan Struktur Bronjong dengan Metode ASD

3.7.1 Dasar Perencanaan Metode ASD

Metode Allowable Stress Design (ASD) atau metode tegangan ijin digunakan dalam perencanaan struktur bronjong dengan prinsip bahwa tegangan yang terjadi pada struktur akibat beban kerja tidak boleh melampaui tegangan ijin material. Tegangan ijin diperoleh dengan membagi tegangan leleh atau tegangan ultimit material dengan faktor keamanan.

Prinsip dasar metode ASD:

$$\sigma_{aktual} \leq \sigma_{ijin} = \frac{\sigma_{leleh}}{FS}$$

3.7.2 Beban yang Bekerja pada Struktur Bronjong

Beban-beban yang diperhitungkan dalam perencanaan struktur bronjong meliputi:

1. Beban Mati (Dead Load): Berat sendiri struktur bronjong dan batu pengisi.
2. Beban Tanah: Tekanan tanah aktif dan pasif yang bekerja pada struktur.
3. Beban Air: Tekanan hidrostatik dari air sungai dan tekanan air pori.
4. Beban Hidup: Beban kendaraan atau beban lain yang mungkin bekerja di atas struktur.

3.7.3 Analisis Tekanan Tanah

Tekanan tanah yang bekerja pada struktur bronjong dianalisis menggunakan teori Rankine atau Coulomb:

1. Tekanan Tanah Aktif (Rankine):

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a$$

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right)$$

2. Tekanan Tanah Pasif (Rankine):

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p$$

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

dimana:

P_a = tekanan tanah aktif

P_p = tekanan tanah pasif

γ = berat volume tanah

H = tinggi struktur

K_a = koefisien tekanan tanah aktif

K_p = koefisien tekanan tanah pasif

ϕ = sudut geser dalam tanah

3.7.4 Analisis Stabilitas Struktur Bronjong

Analisis stabilitas struktur bronjong dilakukan terhadap:

a. Stabilitas Terhadap Guling (Overturning)

Faktor keamanan terhadap guling dihitung dengan persamaan:

$$FS_{guling} = \frac{\sum M_R}{\sum M_O} \geq 1,5$$

dimana:

$\sum M_R$ = jumlah momen penahan

$\sum M_O$ = jumlah momen guling

b. Stabilitas Terhadap Geser (Sliding)

Faktor keamanan terhadap geser dihitung dengan persamaan:

$$FS_{geser} = \frac{\sum V \times \tan \phi + c \times B}{\sum H} \geq 1,5$$

dimana:

$\sum V$ = jumlah gaya vertikal

$\sum H$ = jumlah gaya horizontal

ϕ = sudut geser dalam tanah dasar

c = kohesi tanah dasar

B = lebar dasar struktur

c. Stabilitas Terhadap Daya Dukung Tanah

Tegangan yang terjadi pada tanah dasar dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_{maks} = \frac{\sum V}{B} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \leq \sigma_{ijin}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\sum V}{B} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) \geq 0$$

dimana:

e = eksentrisitas beban

σ_{ijin} = daya dukung ijin tanah

3.9 Kriteria Angka Keamanan

Kriteria angka keamanan (Safety Factor) yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 3.1 Kriteria Angka Keamanan

Jenis Analisis	Parameter	SF Minimum	Sumber
Stabilitas Lereng (Statis)	SF Lereng	1,25 – 1,50	SNI 03-1724-1989
Stabilitas Lereng dengan Struktur	SF Lereng	$\geq 1,50$	SNI 03-1724-1989
Stabilitas Guling Bronjong	SF Guling	$\geq 1,50$	Bowles, 1996
Stabilitas Geser Bronjong	SF Geser	$\geq 1,50$	Bowles, 1996
Daya Dukung Tanah	SF Daya Dukung	$\geq 2,0 - 3,0$	Terzaghi & Peck

Sumber : Hasil Analisis Peneliti (2026)

3.10 Validasi Hasil

Validasi hasil analisis dilakukan melalui beberapa pendekatan:

1. Perbandingan dengan Literatur: Membandingkan hasil analisis dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan untuk memastikan konsistensi hasil.
2. Verifikasi Teoritis: Memeriksa apakah hasil analisis konsisten dengan prinsip-prinsip teori Terzaghi dan metode ASD yang digunakan.
3. Konsistensi Nilai SF: Memeriksa apakah nilai angka keamanan yang dihasilkan masuk akal dan sesuai dengan kondisi lapangan.
4. Pola Bidang Longsor: Mengamati apakah bidang longsor yang dihasilkan oleh program sesuai dengan mekanisme keruntuhan yang mungkin terjadi di lapangan.