

ANALISIS DESAIN SOIL NAILING MENGGUNAKAN LOAD & RESISTANCE FACTORED DESIGN DIBANDINGKAN DENGAN ALLOWABLE STRESS DESIGN

Gianicco Irawan¹ dan Gregorius Sandjaja Sentosa²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
gianicco.325180115@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
gregoriuss@ft.untar.ac.id

Masuk: 21-01-2022, revisi: 02-02-2022, diterima untuk diterbitkan: 22-02-2022

ABSTRACT

Soil nailing, which is one of the slope reinforcement methods that has many advantages such as ease of construction, low cost, and short time, currently still lacks efficiency. These weaknesses are found in the theories and design methods currently used, such as the current soil nailing design method which only considers uncertainty in a factor based on field experience and/or engineering judgment. Until now, the design method in geotechnical construction still uses the Allowable Stress Design (ASD) approach. Design analysis using ASD tends to be less efficient and more efficient than the Load and Resistance Factored Design (LRFD) method being tested in this paper. Thus, LRFD can be an alternative to cover the shortcomings of the previous approach and provide a positive trend for land use to safety ratios as well as costs. With the same dimensions and specifications, the value approach with LRFD is able to produce an efficient one for use in the design. This can be seen when the parameter is degraded by more than 30%, where when using ASD the slope is declared unsafe ($SF \leq 1,50$), while the slope is declared safe when using LRFD (Capacity to Demand Ratio $\geq 1,0$).

Keywords: reinforcement, weakness, conservative, factor of safety, uncertainty

ABSTRAK

Soil nailing yang merupakan salah satu metode perkuatan lereng yang memiliki banyak keuntungan seperti kemudahan teknik konstruksi, rendahnya biaya, kemudian juga singkatnya waktu, pada saat ini masih memiliki kekurangan dalam efisiensi. Kelemahan tersebut ditemukan dalam teori perhitungan dan metode desain yang sekarang ini digunakan, seperti cara desain soil nailing yang sekarang ini hanya mempertimbangkan ketidakpastian hanya dalam suatu faktor yang didasarkan oleh pengalaman lapangan dan atau penilaian rekayasa. Sampai saat ini, metode perancangan atau desain dalam konstruksi geoteknik masih menggunakan pendekatan Allowable Stress Design (ASD). Analisis desain menggunakan ASD ini cenderung kurang efisien dan lebih konservatif jika dibandingkan dengan metode Load and Resistance Factored Design (LRFD) yang sedang diuji dalam tulisan ini. Dengan demikian, LRFD dapat menjadi salah satu alternatif untuk menutupi kekurangan dari pendekatan sebelumnya dan memberikan tren yang positif bagi penggunaan soil nailing terhadap rasio keamanan dan juga biaya. Dengan dimensi dan spesifikasi yang sama, pendekatan dengan LRFD mampu menghasilkan nilai yang efisien untuk digunakan dalam desain. Hal ini terlihat pada saat parameter terdegradasi lebih dari 30%, dimana pada saat menggunakan ASD lereng dinyatakan tidak aman ($SF \leq 1,50$), sementara lereng dinyatakan aman pada saat menggunakan LRFD (Capacity to Demand Ratio $\geq 1,0$).

Kata kunci: perkuatan, kelemahan, konservatif, faktor keamanan, ketidakpastian

1. PENDAHULUAN

Kegiatan konstruksi di Indonesia seringkali berhadapan dengan masalah lereng. Tidak hanya terbentuk secara alami, lereng juga dapat terbentuk akibat kegiatan manusia sendiri, seperti aktivitas penggalian untuk kebutuhan pembangunan bangunan sipil. Beragamnya kondisi geografi yang ada di Indonesia tentunya mengakibatkan masalah lereng yang berbeda-beda juga, seperti ketidakstabilan lereng. Hal ini tergantung dari besarnya kemiringan lereng,

Kondisi tanah, dan elevasi yang berbeda-beda. Ketidakstabilan lereng ini adalah suatu masalah yang harus diantisipasi karena ketidakstabilan lereng dapat menimbulkan masalah yang berbahaya seperti kelongsoran. Kelongsoran dapat membahayakan orang-orang yang berada di sekitar lereng tersebut. Tidak hanya itu, kelongsoran ini juga dapat

menyebabkan kerugian material karena dapat merusak bangunan-bangunan yang dibangun pada daerah tersebut, yang tentu saja kerugiannya tidak sedikit.

Salah satu cara untuk mencegah bencana kelongsoran ini, salah satu caranya adalah dengan menggunakan metode *Soil nailing*. *Soil nailing* adalah salah satu metode perkuatan lereng dengan cara memperbaiki tanah. *Soil nailing* ini tergolong sebagai metode perkuatan tanah in-situ, dilakukan dengan cara melaksanakan pemakuan batang-batang dengan bahan seperti cerucuk, baja, bambu, dan *mini pile* (FHWA, 2015).

Metode perkuatan lereng ini perlu dilaksanakan dengan memperhatikan segala faktor terkait mulai dari parameter tanah dan metode desain yang digunakan. Desain yang konservatif dilakukan saat ini dengan pendekatan *Allowable Stress Design* (ASD) dengan mengkonsentrasikan ketidakpastian dalam suatu nilai yang disebut sebagai faktor keamanan (*safety factor*). Nilai faktor keamanan ini diperoleh dari pengalaman proyek, penilaian rekayasa atau *engineering judgment*, dan juga praktik umum di lapangan. Hal ini memang terkesan membuat perencanaan menjadi lebih mudah karena hanya mengkonsentrasikan ketidakpastian ke dalam 1 aspek saja, namun dapat membuat desain terkesan kurang efisien karena ketidakpastian yang ada ini langsung diasumsikan dengan nilai tertentu yang cenderung konservatif.

Oleh karena itu, di dalam penelitian ini dibahas metode perkuatan tanah *Soil nailing* dengan menggunakan pendekatan *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) yang memisahkan nilai faktor kepada beban dan tahanan, juga fokus dalam mengatasi ketidakpastian dalam desain struktur geoteknik, dalam hal ini *Soil nailing*. Namun, sampai saat ini penggunaan LRFD belum begitu umum digunakan di konstruksi geoteknik dunia mengingat tanah adalah elemen yang bukan buatan manusia (*man-made*) melainkan buatan alam sehingga tentunya parameter yang diperhatikan juga jauh lebih rumit dan keadaan tanah dalam keadaan alaminya tidak pernah seragam di satu tempat dengan tempat yang lainnya.

Oleh sebab itu, hasil dari analisis dapat digunakan untuk menentukan metode perkuatan yang paling efisien dan efektif yang dibutuhkan.

Berikut batasan masalah dalam penelitian ini:

1. Jenis *soil nailing* yang digunakan adalah jenis *Grouted Nails*.
2. Analisis perkuatan dengan metode *Soil Nailing* dilakukan dengan perhitungan manual dan bantuan program Midas GTS NX.
3. Parameter tanah yang digunakan berdasarkan hasil uji laboratorium.
4. Metode perkuatan tanah *Soil Nailing* dengan spesifikasi dan lereng tertentu, dengan tambahan beban statik di atas lereng
5. Analisis stabilitas yang diperhitungkan adalah analisis stabilitas global, analisis stabilitas geser, analisis stabilitas terhadap cabut tulangan, dan analisis stabilitas terhadap tarik tulangan.

Berikut permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini:

1. Pengaruh penggunaan metode LRFD pada struktur geoteknik.
2. Pengaruh pemisahan ketidakpastian dalam desain. Ketidakpastian beban maupun tahanan yang bekerja pada struktur dipisahkan menjadi dua faktor yang berbeda.
3. Pengaruh degradasi parameter terhadap konstruksi *soil nailing* yang didesain dengan pendekatan ASD dan LRFD.
4. Perbandingan antara hasil yang didapat dengan pendekatan ASD dan LRFD.

Berikut tujuan dari penelitian ini:

1. Mengetahui praktik penggunaan *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) sebagai pengganti pendekatan *Allowable Stress Design* (ASD) pada praktik perkuatan lereng *soil nailing*.
2. Membandingkan pendekatan *Allowable Stress Design* (ASD) dan *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) dalam desain perkuatan *Soil Nailing*.
3. Mengetahui efektifitas pendekatan *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) pada konstruksi geoteknik.

Prinsip Kerja *Soil Nailing*

Secara sederhana, *soil nailing* bekerja untuk menciptakan inklusi pasif dengan jarak tertentu sehingga meningkatkan kuat geser tanah pada bidang longsor dengan adanya tambahan komponen gaya geser dan tambahan tahanan normal, yang pada akhirnya pergerakan tanah dapat ditahan serta penurunan tanah (*settlement*) dapat dibatasi selama dan setelah penggalian.

Ada dua klasifikasi metode perbaikan tanah untuk stabilisasi lereng, yaitu metode internal dan metode eksternal. Dalam hal ini, *soil nailing* termasuk dalam klasifikasi stabilitas internal. Sistem perkuatan tanah stabilitas internal ini adalah sistem perkuatan tanah yang elemen strukturnya berada di dalam tanah. Elemen struktur yang berada di dalam tanah ini berfungsi untuk menambah kuat geser tanah pada bidang kegagalan sehingga struktur tersebut dapat menahan gaya yang bersifat meruntuhkan tanah. Sistem stabilisasi internal ini berbeda dengan sistem stabilisasi eksternal yang menggunakan berat strukturnya sendiri untuk melawan beban luar yang dapat menyebabkan kegagalan.

Soil Nailing disebut sebagai struktur penahan tanah yang bekerja dengan alat perkuatan pasif, yang disebut paku (*nail*). Kata pasif dalam penjelasan sebelumnya berarti bahwa *soil nails* dipasang dengan tidak diberi gaya prategang terlebih dahulu. *Soil nailing* dipasang dengan menggunakan metode “*top-down*” dimana penggalian dilakukan dan elemen perkuatan dipasang setelah setiap siklus penggalian. *Soil nails* dipasang di setiap bibir penggalian untuk memberikan dukungan lateral untuk tanah yang ada pada setiap tingkat galian. Dikarenakan setiap penggalian umumnya memiliki kedalaman 150 cm, *nails* dipasang secara vertikal dengan jarak sekitar 150 cm. *Soil nails* juga dapat dipasang dengan jarak horizontal sekitar 150 cm juga.

Pada dasarnya penggunaan metode *soil nailing* ini dapat digunakan sebagai struktur perkuatan dinding galian dan perkuatan lereng. Perbedaan diantara keduanya adalah sebagai berikut:

- a) Pada *soil nailing* sebagai struktur perkuatan dinding, inklusi ditempatkan cenderung ke arah mendatar dan fungsi yang dominan bekerja adalah kuat tariknya.
- b) Pada *soil nailing* sebagai perkuatan lereng, inklusi ditempatkan mendekati tegak lurus dari bidang kelongsoran dan fungsi yang dominan bekerja adalah tegangan geser dan kekakuan dari inklusi tersebut.

Allowable Stress Design (ASD)

Ketidakpastian dalam desain rekayasa teknik secara tradisional diwakili dengan suatu faktor keamanan (FS) untuk suatu metode *Allowable Stress Design (ASD)*. Pada metode ASD, tegangan ijin dari suatu komponen struktural didapat dari hasil bagi antara nilai kekuatan ultimate dari komponen struktur tersebut dengan nilai faktor keamanan (FS). Desain umum dari metode ASD ini dapat digambarkan dalam persamaan:

$$\Sigma Q_i \leq R_{all} = \frac{R_n}{FS} \quad (1)$$

Keterangan:

ΣQ_i = total efek beban
 R_{all} = Tahanan
 R_n = kekuatan nominal tahanan
 FS = faktor keamanan

(Barker et al., 2011)

Load and Resistance Factored Design (LRFD)

Untuk mengetahui ketidakpastian dalam sistem desain yang diharapkan lebih baik daripada metode konvensional (ASD), metode LRFD dikembangkan dengan tujuan sebagai berikut: (1) untuk memisahkan ketidakpastian desain kepada beban dan tahanan dengan penggunaan suatu nilai faktor; (2) untuk memberikan faktor beban dan tahanan berdasarkan dengan indeks realibilitas; (3) untuk memberikan suatu pendekatan yang konsisten dan terukur dalam mendesain suatu struktur, dalam hal ini struktur perkuatan geoteknik. Dalam metode LRFD, terdapat 2 parameter yang dipertimbangkan, yaitu faktor beban (*load factor*) untuk ketidakpastian beban yang akan bekerja dan faktor tahanan untuk ketidakpastian terhadap material yang akan digunakan sebagai struktur. Oleh karena ada dua parameter yang dipertimbangkan, maka metode LRFD ini memiliki potensial untuk memberikan konsistensi dalam desain. Berikut ini adalah persamaan yang dapat mewakili kinerja metode LRFD.

$$\phi R_n \geq \sum_1^i \gamma_i Q_{ni} \quad (2)$$

Keterangan:

ϕ = faktor tahanan (resistance factor)
 R_n = kekuatan nominal tahanan (normal strength)
 Q = efek beban (load effect)

γ = faktor beban (load factor)

(Barker et al., 2011)

Nilai faktor tahanan (*resistance factor*) diatur dalam AASHTO (2007) *Article* 11.6.3. Sebagai contoh, untuk menghitung kestabilan global, *resistance factor* yang digunakan adalah sebesar 0,65 dan 0,75. Nilai *resistance factor* sebesar 0,65 digunakan jika lereng ditujukan untuk menahan struktur. Sementara, nilai *resistance factor* sebesar 0,75 digunakan jika lereng tidak ditujukan untuk menahan struktur.

Sementara itu, untuk penggunaan faktor beban (*load factor*) disesuaikan pada AASHTO (2014) *Article* 3.4.1 menurut kondisi batasan (*limit states*) dari stabilitas yang akan ditinjau. *Limit states* terbagi menjadi *service limit states* (kondisi layan/normal), *strength limit states* (kondisi kekuatan nominal), dan *extreme limit states* (kondisi luar biasa).

Service limit states adalah kondisi pada saat struktur berada dalam kondisi stabil dan mengalami pembebanan reguler/normal pada masa layan yang tidak membuat struktur mengalami kegagalan. Kondisi ini digunakan pada saat melakukan perhitungan stabilitas global. Sementara itu, *strength limit states* mengacu pada saat kondisi struktur memberikan kekuatan yang cukup untuk mengatasi kegagalan. *Strength limit states* ini digunakan dalam analisis kestabilan geser dan internal pada *soil nailing*. Kemudian, *extreme limit states* mengacu pada saat adanya beban-beban yang tidak terduga (seperti aktivitas seismik) yang bekerja pada struktur. Untuk kondisi layan/normal, *load factor* yang digunakan adalah sebesar 1,0. Di luar kondisi itu, *load factor* yang digunakan $\geq 1,0$.

Sampai saat ini, *resistance factor* dan *load factor* ini terus mengalami perkembangan kalibrasi, dan yang terakhir dirilis pada AASHTO *LRFD Bridge Design Specifications 8th Edition September 2017*.

Kestabilan Lereng

Lereng adalah permukaan bumi atau tanah yang membentuk sudut kemiringan tertentu terhadap bidang horizontal. Lereng hadir dalam tiga bentuk berbeda, yaitu lereng alami, lereng timbunan, dan lereng potongan. Lereng bisa terbentuk hanya di satu sisi (seperti pada bagian lereng pada gunung atau tepi sungai) atau terbentuk di dua sisi (seperti pada galian) ataupun beberapa sisi. Komponen-komponen pada lereng secara umum ada dasar lereng, kaki lereng, muka lereng, puncak lereng, dan sudut kemiringan lereng. Dalam praktiknya, sudut kemiringan lereng seringkali digunakan sebagai rasio antara jarak horizontal dengan jarak vertikal atau jarak vertikal dengan jarak horizontal, bergantung dari kesepakatan dari setiap negara. Sudut kemiringan lereng diekspresikan dalam bentuk rasio perbandingan atau persentase (%). Sudut kemiringan lereng maksimum terbatas oleh kekuatan tanah itu sendiri. Suatu kemiringan bisa dikategorikan sebagai lereng jika memiliki kemiringan kurang dari 70 derajat.

Selanjutnya, kondisi suatu lereng dikatakan aman terhadap bahaya kelongsoran dinyatakan dalam suatu nilai yang disebut faktor keamanan atau *factor of safety* (SF). Menurut SNI 8460:2017, untuk kestabilan global dan kestabilan geser pada lereng yang dinyatakan aman mempunyai nilai faktor keamanan sebesar 1,50.

Berikut ini adalah perhitungan faktor keamanan dengan perkuatan *soil nailing*.

$$SF = \frac{c.Lf + (W+Q) \cos \alpha \tan \phi + (\sum Ti \sin(\alpha+i) - \sum Vi \cos(\alpha+i)) \tan \phi}{(W+Q) \sin \alpha - \sum Ti \cos(\alpha+i) - \sum Vi \sin(\alpha+i)} \quad (3)$$

Keterangan:

- SF = faktor keamanan
- c = kohesi dari tanah (kN/m²)
- ϕ = sudut geser dalam tanah (°)
- α = sudut kemiringan bidang longsor terhadap garis horizontal
- W = berat irisan tanah ke-n (kN/m)
- Q = beban luar (*surchage load*) di atas lereng (kN/m)
- Lp = panjang *nail bar* yang berada di belakang bidang longsor
- β = sudut kemiringan dari lereng (°)
- i = sudut kemiringan dari *nail bar* terhadap sumbu x global atau bidang horizontal
- $\sum Ti$ = kumulatif daya dukung *nail bar* terhadap gaya tarik (kN/m)
- $\sum Vi$ = kumulatif daya dukung *nail bar* terhadap gaya geser (kN/m)

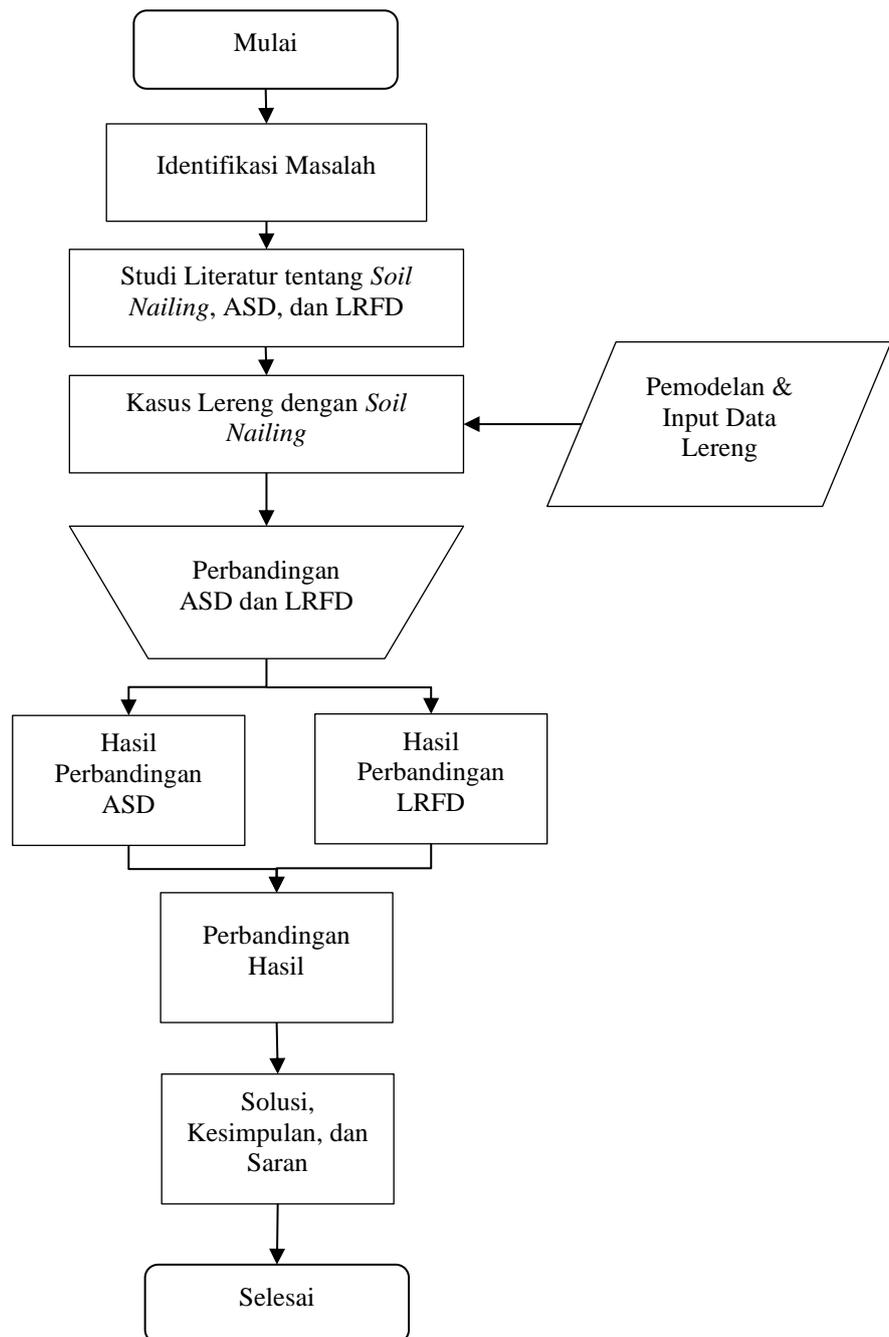
Untuk $\sum Ti$ dan $\sum Vi$ dihitung terlebih dahulu kapasitas *soil nailing* tunggal dengan keseimbangan gaya.

2. METODE PENELITIAN

Secara garis besar, prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 1 dan akan diuraikan pada bagian selanjutnya.

Uraian dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut:

1. Tahapan awal dari penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi masalah.
2. Tahap berikutnya adalah melakukan studi literatur mengenai soil nailing, ASD, dan LRFD.
3. Kemudian, dilakukan pemodelan dan memasukkan data lereng seperti tinggi lereng, kemiringan lereng, dan juga data tanah di lereng tersebut secara manual dan dibantu dengan program Midas GTS NX.
4. Data lereng yang dimasukkan tersebut merupakan contoh kasus dari lereng yang akan digunakan dalam penelitian ini.
5. Tahapan selanjutnya adalah dengan melakukan perhitungan menggunakan metode ASD dan LRFD, yang dilakukan dengan menentukan faktor keamanan yang akan digunakan dalam metode ASD dan menentukan indeks realibilitas untuk digunakan dalam metode LRFD.
6. Kemudian, dilakukan perhitungan dengan masing-masing metode dengan faktor dan indeks yang telah ditentukan dan dikalibrasikan hingga pada akhirnya mendapatkan hasil akhir berupa dimensi struktur perkuatan yang digunakan pada masing-masing metode.
7. Dari kedua hasil yang diperoleh dengan metode yang berbeda tersebut, maka dilakukan analisis perbandingan.
8. Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah menarik kesimpulan, memberikan saran, dan mengusulkan solusi bagi penelitian selanjutnya.

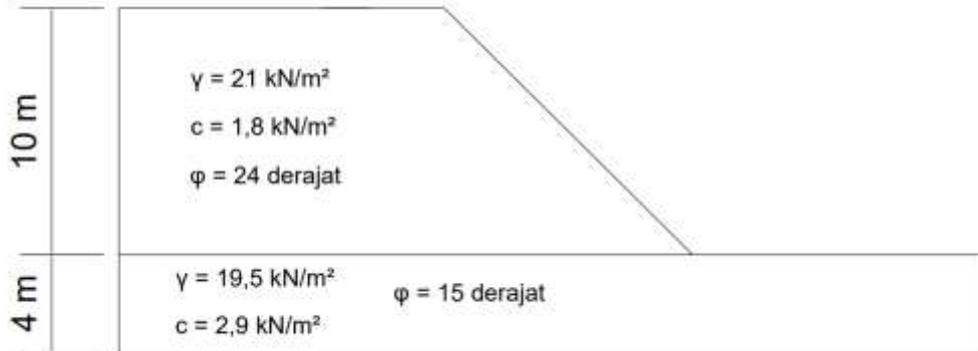


Gambar 1. Diagram Alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan Lereng

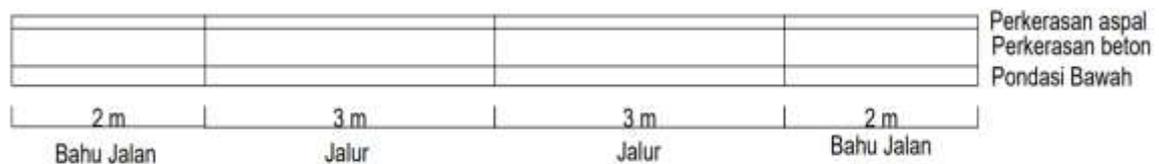
Lereng yang digunakan dalam penelitian ini berlokasi di Desa Bantas, Kecamatan Selemadeg Timur, Kabupaten Tabanan, Bali diambil dari hasil uji laboratorium oleh Suwarsa et al (2010).



Gambar 2. Sketsa Kondisi Lereng

Pembebanan di Atas Lereng

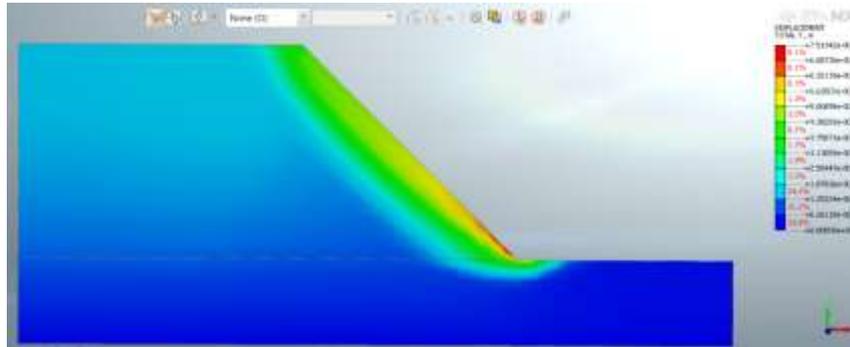
1. Perkerasan jalan yang digunakan yaitu perkerasan beton semen (perkerasan kaku). Struktur ini tersusun dari pelat beton semen yang tidak menerus atau bersambung tanpa tulangan, diletakkan di atas pondasi bawah (*subbase*) dengan lapis permukaan beraspal, sesuai dengan SNI PD T-14-2003. Dengan tebal perkerasan aspal sebesar 10 cm, tebal perkerasan beton sebesar 30 cm, dan tebal pondasi bawah sebesar 15 cm.
2. Kelas jalan yang digunakan dalam pembebanan lereng ini adalah kelas jalan III dengan asumsi VLHR sebesar 8.000 smp/hari/ Lebar jalur yang digunakan adalah 3 meter dan lebar bahu jalan sebesar 2 m seperti pada Gambar 3. Beban pada seluruh lebar permukaan jalan yang digunakan dalam lereng ini adalah sebesar 12 kN/m². Data tersebut diambil dari Jozias dan Sandjaja (2021) dan Panduan Geoteknik Pusat Litbang Prasarana Transportasi (2001).



Gambar 3. Sketsa Jalan di Atas Lereng

Analisis Kestabilan Pada Lereng Tanpa Perkuatan (Dengan beban jalan)

Hasil perhitungan yang diperoleh dari program Midas GTS NX, faktor keamanan pada lereng tersebut adalah sebesar 0,715 ($SF \leq 1,50$). Hal tersebut menunjukkan bahwa lereng yang tidak diperkuat berada dalam kondisi yang tidak aman atau tidak stabil, oleh karena itu perkuatan (*soil nailing*) diperlukan dalam upaya menstabilkan lereng. Dalam perhitungan yang dilakukan di program Midas GTS NX, metode yang digunakan adalah *Stress Analysis Method* (SAM) karena mengacu kepada *limit equilibrium* dan diterapkan pada bidang 2 dimensi.



Gambar 4. Analisis Stabilitas Global Menggunakan Program Midas GTS NX

Spesifikasi Perkuatan yang Efisien Untuk Lereng

Jenis *soil nailing* yang digunakan dalam perkuatan lereng ini adalah *Grouted Nails*. Elemen yang dianalisis adalah bagian *nail bar* dengan grouting. Penentuan spesifikasi perkuatan untuk lereng dihitung sampai diperoleh hasil spesifikasi *soil nailing* yang paling efisien yang mungkin diterapkan di lapangan. Dilakukan perhitungan dengan langkah yang sama dan diperoleh hasil faktor keamanan seperti pada tabel dan grafik di bawah ini. Diameter *soil nailing* yang digunakan adalah 25 mm dengan panjang yang bervariasi seperti Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1 Faktor keamanan dengan Panjang *Nail Bar*

L (m)	SF $\geq 1,5$
10	2,8296
9	2,5977
8	2,3892
7	2,1459
6	1,8681

Berdasarkan Tabel 1, maka dapat dilihat bahwa dengan panjang *nail bar* 6 meter, lereng sudah dapat dinyatakan aman dari bahaya kelongsoran. Oleh karena itu, perhitungan selanjutnya dapat dilakukan dengan menggunakan *nail bar* sepanjang 6 meter.

Degradasi Parameter

Parameter eksisting (tidak terdegradasi atau terdegradasi 0%) berdasarkan data awal terdiri atas $c = 1,8 \text{ kN/m}^2$ dan $\phi = 24^\circ$.

Namun, parameter tanah bisa mengalami degradasi atau penurunan. Degradasi ini disebabkan oleh jumlah kandungan air yang meningkat secara tiba-tiba. Hal ini bisa terjadi pada waktu terjadinya hujan. Namun, hal sebaliknya juga dapat terjadi, parameter tanah di titik lain bisa saja lebih baik terhadap parameter eksisting. Besaran degradasi parameter dilakukan berdasarkan asumsi dan dilampirkan pada Tabel 2. di bawah ini.

Tabel 2. Degradasi Parameter

Persentase Degradasi	c (kN/m ²)	φ'(°)
30%	2,3	31
20%	2,1	28
0%/Eksisting	1,8	24
-20%	1,4	19
-30%	1,2	16
-40%	1	14
-50%	0,9	12

Analisis Stabilitas Global dengan Pendekatan ASD dan LRFD

Mengacu pada peraturan dalam SNI 8460:2017, bahwa panjang *nail bar* yang digunakan sebagai perkuatan lereng adalah $0,6H - 1,2 H$, maka akan dicoba panjang *nail bar* sepanjang H , yaitu 6 meter dengan jarak vertikal dan horizontal masing-masing sebesar 1 m, dengan diameter 25 mm. Untuk kemiringan *nail bar* terhadap bidang horizontal (i) digunakan sebesar 10 derajat.

Sudut bidang longsor (α) yang digunakan dalam perhitungan ini adalah 35 derajat. Hal ini dikarenakan dengan sudut bidang longsor 35 derajat pada bidang longsor planar menghasilkan angka faktor keamanan yang konvergen dengan angka faktor keamanan yang diperoleh dengan program.

$$A = 26,9602 \text{ m}^2$$

A (area) adalah luas tanah yang ada di dalam area bidang longsor, nilainya dihitung dengan menggunakan program AutoCad 2016.

W = berat tanah yang ada di dalam area bidang longsor ditambah dengan beban luar

$$= (21,4074 \text{ m}^2 \times 21 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}) + (4,2815 \text{ m} \times 24,9 \text{ kN/m}) = 556,1648 \text{ kN}$$

$$L_f = \text{panjang bidang gelincir} = 10 \times \cos(90 - \alpha) = 10 \times \cos(90 - 35) = 17,4345 \text{ m}$$

$$R_n = f_y \times A_s \text{ tulangan} = 420 \text{ MPa} \times \pi 25^2 = 206,167 \text{ kN}$$

$$R_c = 0,5 R_n = 103,0835 \text{ kN}$$

$$V_1 = \frac{R_n}{2 \sqrt{1+4 \tan^2(90-(\alpha+i))}} = \frac{206,167}{2 \sqrt{1+4 \tan^2(90-(35+10))}} = 46,1003 \text{ kN}$$

$$T = 4 V \tan(90 - (\alpha + i)) = 4 (46,1003) \tan(90 - (35 + 10)) = 184,401 \text{ kN}$$

Berdasarkan API 1987, nilai C_1 , C_2 , dan C_3 secara berurutan adalah 1,1; 1,9; dan 13.

$$P_u = (C_1 Z + C_2 D) \gamma' Z = (1,1 \times 10 + 1,9 \times \frac{25}{1000}) 21 \times 10 = 2319,975 \text{ kN}$$

$$P_u = C_3 D \gamma' Z = 13 (\frac{25}{1000}) (21) (10) = 68,25 \text{ kN}$$

P_u yang dipakai adalah P_u yang memiliki nilai terkecil dari kedua perhitungan di atas. Sehingga, $P_u = 68,25 \text{ kN}$.

Dengan analisis p-y didapat *upper limit* dari tanah lateral yaitu:

$$P_{max} = P_u/2 = 34,125 \text{ kN}$$

Menghitung Panjang Penyaluran:

$$E = \text{modulus elastisitas dari } \textit{nail bar} \text{ yang berbahan dasar baja} = 2 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$$

I = momen inersia dari penampang *nail bar* (lingkaran)

$$= \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi 0,0025^4}{64} = 1,9175 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

K_s = 45000 kN/m³, modulus reaksi lateral tanah pasir padat berlempung

$$L_o = \sqrt{\frac{4EI}{K_s D}} = \sqrt{\frac{4(2 \times 10^5)(1,9175 \times 10^{-8})}{(45000)(0,0025)}} = 0,3417 \text{ m}$$

$$V_2 = P_{max} \frac{D}{2} L_o = 34,125 \times \frac{0,025}{2} \times 0,3417 = 0,14576 \text{ kN}$$

$V_1 < V_2$, maka yang digunakan adalah V yang terkecil, yaitu $V = 0,14576 \text{ kN}$

Koreksi gaya tarik ijin *nail bar*:

$$\frac{V_{max}^2}{R_c^2} + \frac{T_{max}^2}{R_n^2} = 1$$

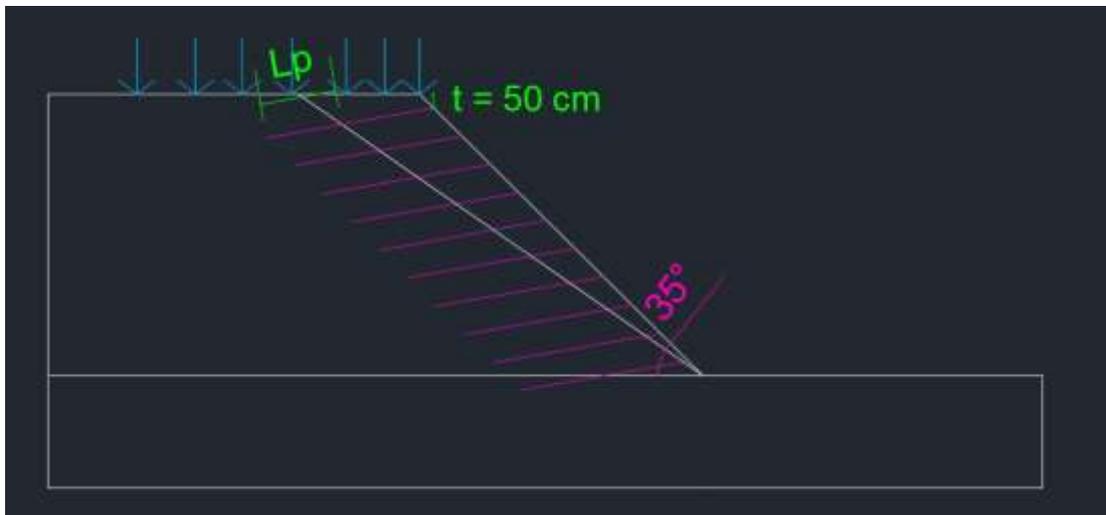
$$\frac{0,14576^2}{103,084^2} + \frac{T_{max}^2}{206,167^2} = 1$$

$$T_{max} = 206,167 \text{ kN}$$

Perhitungan T untuk T_1 :

Untuk pendekatan LRFD, FS (faktor keamanan) dibedakan menjadi CDR (*capacity to demand ratio*).

Nilai CDR (*capacity to demand ratio*) didapatkan dari proses iterasi (*trial and error*) hingga mendapatkan nilai CDR yang konvergen dengan hasil yaitu sebesar 1,58.



Gambar 5. Ilustrasi L_p

$$T_1 = \frac{\pi D L_p f_{max}}{CDR} = \frac{\pi 0,025 \cdot 2,7007 \cdot 125}{1,58} = 21,0429 \text{ kN}$$

Perhitungan dilakukan untuk semua *nail bar* seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Perhitungan Seluruh Nail

	hi (m)	lp (m)	T (kN)	V (kN)
<i>Nail 1</i>	0,5	2,7007	16,7811	0,1338
<i>Nail 2</i>	1,5	3,048	18,9390	0,1338
<i>Nail 3</i>	2,5	3,3953	21,0970	0,1338
<i>Nail 4</i>	3,5	3,7426	23,2549	0,1338
<i>Nail 5</i>	4,5	4,0899	25,4129	0,1338
<i>Nail 6</i>	5,5	4,4372	27,5709	0,1338
<i>Nail 7</i>	6,5	4,7845	29,7289	0,1338
<i>Nail 8</i>	7,5	5,1318	31,8869	0,1338
<i>Nail 9</i>	8,5	5,4791	34,0449	0,1338
<i>Nail 10</i>	9,5	5,8264	36,2029	0,1338
Total			264,9196	1,3381

Untuk menghitung CDR, diperlukan ϕ_s , yaitu faktor tahanan LRFD untuk analisis stabilitas global. Nilai $\phi_s = 0,65$ diatur dalam AASHTO (2014). Hal yang membedakan perhitungan ASD dan LRFD hanyalah pada penggunaan *resistance factor* dan *load factor*.

$$CDR = \frac{\phi_g(c \cdot Lf + (W + Q) \cos \alpha \tan \phi + (\sum Ti \sin(\alpha + i) - \sum Vi \cos(\alpha + i)) \tan \phi)}{(W + Q) \sin \alpha - \sum Ti \cos(\alpha + i) - \sum Vi \sin(\alpha + i)}$$

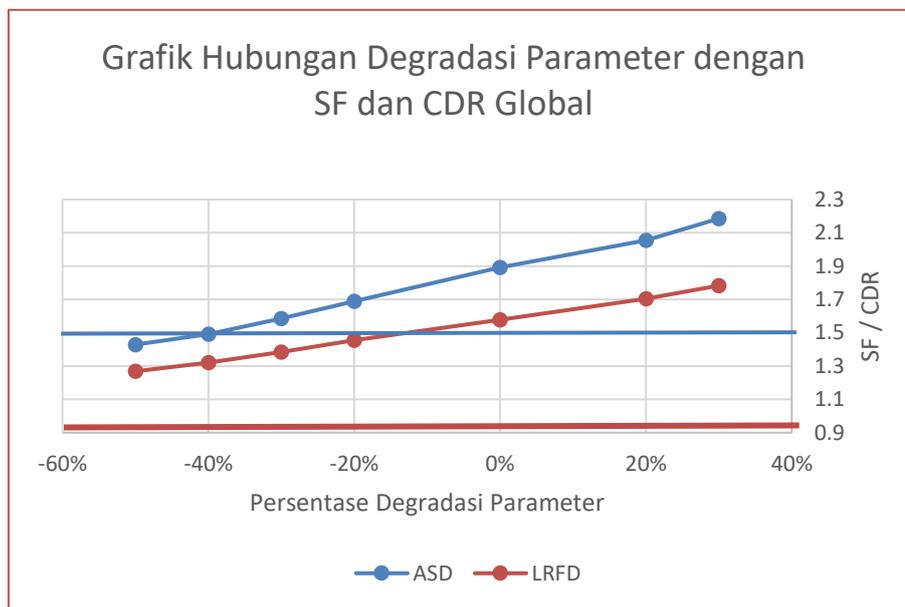
$$= \frac{0,65(1,8.17,4375 + (556,165) \cos 35 \tan 24 + \left(\frac{264,92 \sin(35 + 10) -}{1,338 \cos(35 + 10)} \right) \tan 24)}{(556,165) \sin 35 - 264,92 \cos(35 + 10) - 1,338 \sin(35 + 10)}$$

= 1,57715 \geq 1, lereng dinyatakan aman.

Berikut ini adalah Tabel 4 perbandingan SF dan CDR secara keseluruhan dengan degradasi parameter.

Tabel 4. Perbandingan ASD dan LRFD pada Stabilitas Global

Degradasi	c (kN/m ²)	ϕ' (^o)	ASD ($\geq 1,5$)	Ket	LRFD ($\geq 1,0$)	Ket
30%	2,3	31	2,1853	AMAN	1,7829	AMAN
20%	2,1	28	2,0552	AMAN	1,7043	AMAN
0%	1,8	24	1,8920	AMAN	1,5772	AMAN
-20%	1,4	19	1,6880	AMAN	1,4542	AMAN
-30%	1,2	16	1,5852	AMAN	1,3831	AMAN
-40%	1	14	1,4907	TIDAK AMAN	1,3203	AMAN
-50%	0,9	12	1,4288	TIDAK AMAN	1,2683	AMAN



Gambar 6. Grafik Hubungan Degradasi Parameter dengan SF dan CDR Global

Pada dasarnya, *safety factor* (SF) dan *capacity to demand ratio* (CDR) merupakan hal yang sama. Kedua istilah tersebut dibedakan hanya untuk memudahkan klasifikasi antara metode ASD dan LRFD. SF dan CDR, keduanya menghitung perbandingan antara besaran kekuatan struktur tanah dan beban yang bekerja.

Dari analisis stabilitas global pada lereng yang diperkuat dengan *soil nailing* di atas, dapat dinyatakan bahwa desain menggunakan ASD cenderung lebih konservatif, dikarenakan pada saat parameter tanah pada lereng terdegradasi hingga 40% dan 50%, lereng dinyatakan tidak aman. Sementara itu, lereng dinyatakan aman jika desain *soil nailing* dianalisis dengan pendekatan LRFD. Hal ini sesuai dengan faktor keamanan yang disyaratkan pada metode ASD yaitu sebesar 1,50. Sementara itu, pada metode LRFD faktor keamanan yang disyaratkan adalah sebesar 1,00.

Analisis Stabiitas Geser dengan Pendekatan ASD dan LRFD

Dapat dilihat dari analisis di atas, bahwa pada saat parameter terdegradasi sebesar 30%, lereng yang diperkuat dengan *soil nailing* sepanjang 6 meter dan diameter 25 mm dinyatakan tidak aman jika dianalisis dengan pendekatan ASD. Namun, lereng dinyatakan aman jika dianalisis dengan pendekatan LRFD. Hal ini disebabkan analisis yang digunakan pada pendekatan ASD lebih konservatif dibandingkan dengan LRFD. Sama halnya dengan analisis stabilitas global, peraturan mensyaratkan nilai faktor keamanan untuk stabilitas geser sebesar 1,50 untuk ASD dan 1,00 untuk LRFD (lihat Tabel 5).

Tabel 5. Nilai SF dan CDR yang Diperoleh Dari Perhitungan Stabilitas Geser

Degradasi	Panjang <i>Nail Bar</i> (m)					
	6 meter		9 meter		12 meter	
	ASD	LRFD	ASD	LRFD	ASD	LRFD
0%	2,9466	2,0210	3,6426	2,4850	4,3386	2,9490
-20%	1,8210	1,2491	2,2522	1,5365	2,6833	1,8239
-30%	1,4811	1,0160	1,8325	1,2503	2,1840	1,4846
-40%	1,0631	0,7294	1,3166	0,8984	1,5701	1,0673
-50%	0,8342	0,5724	1,0340	0,7055	1,2337	0,8387

Analisis Stabiitas Internal dengan Pendekatan ASD dan LRFD

Pada analisis stabilitas internal, yaitu stabilitas terhadap tarik dan cabut tulangan dengan menggunakan ASD dan LRFD, keduanya memberikan hasil faktor keamanan relatif jauh dari nilai faktor keamanan minimum. Sekalipun pada parameter yang terdegradasi, hasil faktor keamanan (SF) dari pendekatan ASD memberikan nilai $SF_{PO} = 5,68 \geq 2,0$; $SF_T = 6,2326 \geq 1,8$ dan pendekatan LRFD memberikan nilai $CDR_{PO} = 2,5096 \geq 1,0$; $CDR_T = 3,3490 \geq 1,0$.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Analisis kestabilan lereng dengan perkuatan *soil nailing* dapat dilakukan dengan 2 pendekatan, yaitu *Allowable Stress Design* dan *Load & Resistance Factored Design* yang masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan.
2. Analisis kestabilan lereng eksisting tanpa perkuatan memperoleh nilai faktor keamanan sebesar 0,748 menggunakan program Midas GTS NX. Artinya lereng yang tidak diperkuat dinyatakan berbahaya dan rentan terhadap kelongsoran.
3. Lereng dapat dinyatakan aman jika menggunakan perkuatan dengan 10 buah *soil nailing* dengan panjang minimum (6 m) dan diameter 25 mm jika parameter tidak terdegradasi. Hasil faktor keamanan yang dihasilkan adalah sebesar 1,86. ($SF \geq 1,5$).
4. Analisis stabilitas global yang dihitung menggunakan pendekatan LRFD dinilai lebih unggul dibandingkan dengan analisis menggunakan pendekatan ASD. Hal ini dapat dilihat pada hasil analisis stabilitas global lereng yang parameter tanahnya terdegradasi hingga 40% dan 50%. Pada saat hal tersebut terjadi, lereng dinyatakan aman jika dihitung menggunakan pendekatan LRFD ($CDR = 1,4288$ dan $1,2683 \geq 1,0$), sementara lereng tidak dinyatakan aman jika dihitung menggunakan pendekatan ASD ($SF = 1,4907$ dan $1,3203 \leq 1,5$).
5. Analisis stabilitas lereng terhadap penggeseran juga menghasilkan hasil yang lebih unggul jika dihitung dengan pendekatan LRFD dibandingkan dengan ASD. Pada saat parameter terdegradasi hingga 30%, lereng dinyatakan aman terhadap penggeseran jika menggunakan *soil nailing* dengan panjang 6 meter dan diameter 25 mm yang dianalisis dengan pendekatan LRFD (*Capacity to Demand Ratio* = $1,016 \geq 1,0$), sementara lereng tidak dinyatakan aman jika dianalisis dengan pendekatan ASD ($SF = 1,4811 \geq 1,5$).
6. Analisis stabilitas internal dengan pendekatan ASD dan LRFD, keduanya menyatakan bahwa lereng aman terhadap kegagalan internal ($SF_{PO} = 5,68 \geq 2,0$; $SF_T = 6,2326 \geq 1,8$ dan *Capacity to Demand Ratio* terkecil sebesar *Capacity to Demand Ratio Pullout* = $2,5096 \geq 1,0$; *Capacity to Demand Ratio Tensile* = $3,3490 \geq 1,0$).

7. Dengan aspek desain dan dimensi yang sama. Jika melakukan desain dengan metode ASD, maka perhitungan hasil desain yang diperoleh tidak dapat diijinkan. Sementara itu, dengan metode LRFD, maka hasil desain dapat diijinkan karena nilai faktor keamanan mencukupi syarat yang ada dalam peraturan.

Saran

1. Perkuatan lain selain *soil nailing*, seperti geosintetik, *ground anchor*, dan lainnya dapat dicoba untuk dilakukan pada lereng ini.
2. Kerugian akibat beban dinamik dapat diperhitungkan dalam penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2007). American American Association of State Highway and Transportation Officials. *LRFD Bridge Design Specifications, 4th*.
- AASHTO. (2014). American Association of State Highway and Transportation Officials. *LRFD Bridge Design Specifications, 7th*.
- AASHTO. (2017). American American Association of State Highway and Transportation Officials. *LRFD Bridge Design Specifications, 8th*. https://doi.org/10.1057/978-1-137-53072-1_6
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). Sni 8460-2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik, 8460*, 2017.
- Barker, J. B., Authority, T., Biehler, A. D., Dot, P., Brown, L. L., Dot, M., Conti, E. A., Transportation, S., Dot, N. C., Hammond, P. J., Dot, W. S., Helme, E. A. N., & Air, C. (2011). *Development of COOPERATIVE HIGHWAY PROGRAM*.
- FHWA. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual. *Geotechnical Engineering Circular NO. 7 - Soil Nail Walls Reference Manual, 132085*, 425. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi14007.pdf>
- Jozias, P. I., & Sandjaja, G. (2021). DAERAH PERBUKITAN MINAHASA UTARA. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil, 4*(1), 221–232.
- Pusat Litbang Prasarana Transportasi. (2001). Panduan Geoteknik 4 Desain dan Konstruksi. In *Pusat Litbang Prasarana Transportasi* (Issue 4).
- Suwarsa Putra, T., Wirya Ardana, M., & Aryati, M. (2010). Analisis Stabilitas Lereng Pada Badan Jalan Dan Perencanaan Perkuatan Dinding Penahan Tanah. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 14*(1), 36–42.