

## Analisis Kinerja Dinding Penahan Tanah dengan Menggunakan Teknologi *Soil Nailing*

Redo Sitompul<sup>1</sup>, Surtaria Nurliana Panjaitan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas HKBP Nommensen, Indonesia, [redo.sitompul@student.uhn.ac.id](mailto:redo.sitompul@student.uhn.ac.id)

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas HKBP Nommensen, Indonesia, [surtaria.panjaitan@uhn.ac.id](mailto:surtaria.panjaitan@uhn.ac.id)

\*Penulis korespondensi, email: [surtaria.panjaitan@uhn.ac.id](mailto:surtaria.panjaitan@uhn.ac.id)

**Abstrak**— Stabilisasi lereng dan konstruksi dinding penahan tanah merupakan bagian penting dalam pembangunan infrastruktur, khususnya pada wilayah perbukitan dan daerah rawan longsor. Salah satu teknologi yang semakin berkembang dalam bidang ini adalah *Soil Nailing*, yaitu teknik perkuatan tanah dengan pemasangan batang baja tulangan (*nail*) yang ditanam ke dalam tanah dan dikombinasikan dengan facing beton semprot (*shotcrete*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja sistem dinding penahan tanah berbasis *Soil Nailing* menggunakan simulasi numerik berbasis elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Model simulasi dilakukan pada berbagai kondisi geoteknik, seperti variasi jenis tanah, panjang dan kemiringan paku tanah, serta tinggi lereng. Parameter yang dianalisis meliputi faktor keamanan (FS), deformasi lateral, dan tegangan maksimum pada paku tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi optimal dapat meningkatkan FS hingga 1,65 dibandingkan struktur konvensional. Selain itu, teknologi *Soil Nailing* terbukti efektif dalam mengurangi deformasi lereng dan distribusi tegangan berlebih. Studi ini memberikan kontribusi penting dalam perencanaan dinding penahan modern yang efisien dan adaptif terhadap kondisi tanah dan beban dinamis.

Kata kunci: *Soil Nailing*, dinding penahan tanah, stabilitas lereng.

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

### 1. Pendahuluan

Dinding penahan tanah merupakan elemen penting dalam sistem rekayasa geoteknik yang berfungsi menahan tekanan lateral tanah pada lereng, tebing, maupun area galian. Dalam beberapa dekade terakhir, teknologi *Soil Nailing* telah berkembang menjadi salah satu metode yang efisien dan fleksibel untuk meningkatkan stabilitas lereng dan dinding penahan, terutama di daerah dengan keterbatasan ruang atau kondisi tanah lemah. Teknologi ini bekerja dengan memasukkan batang baja tulangan (*nail*) secara miring ke dalam tanah yang kemudian diperkuat dengan *shotcrete* sebagai facing, sehingga menciptakan sistem massa tanah yang diperkuat secara internal. Keunggulan *Soil Nailing* terletak pada kemudahan instalasi, biaya yang lebih rendah dibandingkan dinding beton bertulang, serta kemampuannya beradaptasi terhadap berbagai kondisi geologi dan topografi. Namun, perencanaan dan desain *Soil Nailing* harus mempertimbangkan banyak parameter seperti karakteristik tanah, panjang dan sudut pemasangan *nail*, serta pengaruh beban luar untuk memastikan faktor keamanan (FS) yang memadai. Oleh karena itu, diperlukan studi numerik dan eksperimental yang mendalam guna mengevaluasi efektivitas sistem *Soil Nailing* dan memberikan dasar teknis yang kuat dalam perencanaannya.

Jalan tol merupakan bagian penting dari infrastruktur transportasi nasional yang berfungsi sebagai jalur utama dalam distribusi barang dan jasa serta pergerakan manusia dalam skala besar [1]. Di wilayah tropis seperti Indonesia, keberadaan jalan tol semakin vital seiring dengan meningkatnya kebutuhan konektivitas antarwilayah [2]. Namun, kondisi iklim tropis yang panas dan lembap sepanjang tahun memberikan tantangan besar dalam perencanaan dan pembangunan infrastruktur jalan, terutama dalam hal ketahanan perkerasan terhadap deformasi plastis, retak akibat termal, serta kerusakan akibat intrusi air [3], [4]. *Asphalt concrete* atau campuran aspal panas (*Hot Mix Asphalt/HMA*) yang digunakan sebagai lapisan perkerasan atas sering kali mengalami degradasi performa akibat suhu tinggi dan siklus basah-kering yang terus menerus [5]. Hal ini memicu deformasi permanen (*rutting*), *fatigue cracking*, dan *moisture damage* [6]. Dalam upaya mengatasi permasalahan tersebut, aspal modifikasi telah banyak dikembangkan sebagai solusi teknis yang mampu meningkatkan kinerja campuran aspal konvensional [7].

Aspal modifikasi adalah campuran aspal konvensional dengan bahan aditif tertentu seperti polimer, crumb rubber (karet daur ulang), lateks, atau limbah plastik yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis, termal, dan viskoelastis dari material aspal [8], [9]. Penambahan bahan polimer seperti Styrene Butadiene Styrene (SBS) diketahui meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi dan memberikan fleksibilitas pada suhu rendah [10]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa aspal modifikasi dengan SBS dapat meningkatkan nilai *rutting* resistance hingga 60% dibandingkan aspal biasa [11]. Khusus di daerah tropis, penelitian mengenai aspal modifikasi menjadi sangat penting karena karakteristik lingkungan yang ekstrem seperti suhu rata-rata di atas 30°C, kelembapan udara tinggi, dan curah hujan yang besar dapat mempercepat proses kerusakan pada perkerasan jalan [12], [13]. Beberapa studi mengindikasikan bahwa campuran aspal modifikasi memiliki performa yang lebih baik terhadap *moisture susceptibility*, terutama dalam kondisi *freeze-thaw* yang tidak stabil [14].

Menurut [15], penerapan aspal modifikasi di negara-negara tropis telah menunjukkan hasil signifikan dalam peningkatan daya tahan jalan. Penelitian oleh Ahmed et al. [16] menemukan bahwa aspal yang dimodifikasi dengan crumb rubber memiliki ketahanan terhadap deformasi hingga dua kali lipat dibanding aspal konvensional. Di sisi lain, [17] menyatakan bahwa modifikasi menggunakan limbah plastik polyethylene memberikan kontribusi terhadap peningkatan stabilitas *Marshall* dan penurunan laju penetrasi air. Selain keunggulan teknis, penggunaan material daur ulang seperti limbah plastik dan crumb rubber juga sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan [18], [19]. Pemanfaatan limbah padat sebagai bahan tambahan aspal turut membantu dalam pengurangan dampak lingkungan serta mendukung program pengurangan emisi karbon [20].

Namun demikian, tantangan dalam implementasi aspal modifikasi di lapangan masih cukup besar. Masalah seperti stabilitas pencampuran, segregasi bahan modifikasi, dan konsistensi kualitas produksi menjadi isu utama dalam proses konstruksi [21]. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi mendalam terhadap perilaku mekanik dan termal dari berbagai jenis aspal modifikasi, terutama yang relevan dengan kondisi tropis [22]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku aspal modifikasi terhadap suhu tinggi, kelembapan, dan beban lalu lintas berat dengan menggunakan pendekatan eksperimental dan uji laboratorium. Studi ini juga membandingkan performa dari beberapa jenis bahan modifikasi, seperti SBS, crumb rubber, dan limbah plastik, yang diaplikasikan pada campuran HMA yang digunakan untuk jalan tol [23].

Uji laboratorium seperti *Marshall stability*, *rutting* resistance, dan Indirect Tensile Strength (ITS) akan digunakan sebagai metode utama dalam mengevaluasi performa mekanik. Di samping itu, analisis rheologis dilakukan untuk menilai sifat viskoelastis material aspal dengan menggunakan Dynamic Shear Rheometer (DSR) dan Bending Beam Rheometer (BBR) [24]. Seluruh hasil analisis akan dikaitkan dengan pengaruh lingkungan tropis berdasarkan simulasi suhu dan kelembapan yang relevan dengan kondisi jalan tol di Indonesia [25]. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi perkerasan yang lebih adaptif terhadap iklim tropis,

serta menjadi dasar dalam penyusunan standar dan kebijakan nasional terkait penggunaan aspal modifikasi dalam pembangunan jalan tol.

## 2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk menganalisis perilaku campuran aspal modifikasi dalam kondisi tropis. Tahapan penelitian dilakukan melalui serangkaian kegiatan, yaitu persiapan material, pembuatan sampel, pengujian laboratorium, serta analisis data hasil pengujian. Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari aspal pen 60/70 sebagai binder dasar, agregat kasar dan halus sesuai spesifikasi Bina Marga, serta bahan aditif berupa crumb rubber dan polimer termoplastik jenis Styrene Butadiene Styrene (SBS). Pemilihan bahan aditif didasarkan pada ketersediaan lokal dan hasil studi terdahulu yang menunjukkan performa unggul dalam meningkatkan ketahanan terhadap deformasi plastis dan kerusakan akibat kelembapan.

Prosedur pembuatan campuran dilakukan dengan mencampur aspal panas dan aditif pada suhu sekitar 160–180°C, dengan konsentrasi aditif bervariasi antara 4% hingga 10% dari berat aspal. Campuran kemudian dicampur dengan agregat pada suhu optimum pencampuran menggunakan alat *Marshall* Mixer. Sampel uji dibuat dengan metode pemadatan *Marshall* sebanyak 3 kali untuk setiap variasi campuran guna menjaga replikasi hasil yang valid.

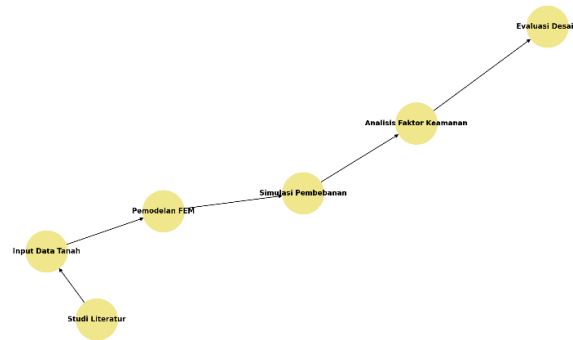
Pengujian utama yang dilakukan meliputi uji stabilitas *Marshall* untuk menilai kekuatan struktural awal campuran, uji Indirect Tensile Strength (ITS) untuk mengukur daya tahan terhadap retak, dan uji *rutting* menggunakan alat Wheel Tracking Device untuk menilai ketahanan deformasi plastis pada suhu tinggi. Selain itu, dilakukan uji viskoelastis menggunakan Dynamic Shear Rheometer (DSR) dan Bending Beam Rheometer (BBR) untuk memahami karakteristik rheologi dari aspal modifikasi dalam berbagai kondisi suhu. Gambar 1 berikut menunjukkan alur metodologi penelitian yang digunakan dalam studi ini, mulai dari persiapan bahan hingga analisis hasil laboratorium.

Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Material dan Perkerasan Jalan, Fakultas Teknik Sipil Universitas Medan Area. Setiap data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif serta uji ANOVA untuk menentukan pengaruh signifikan dari variasi aditif terhadap hasil uji. Kriteria performa minimum merujuk pada General Specification Bina Marga 2023, serta hasil-hasil dari literatur relevan sebagai pembanding.

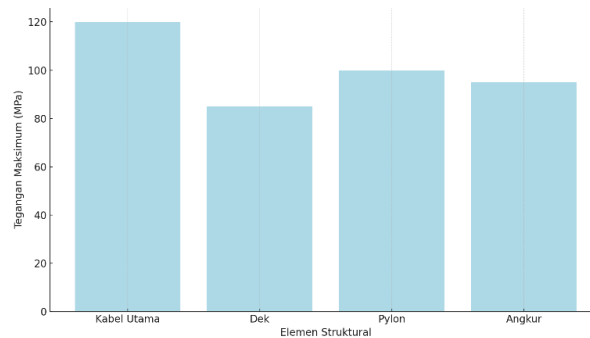
## 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini mencakup pengujian laboratorium terhadap beberapa varian campuran aspal modifikasi menggunakan aditif crumb rubber dan SBS (Styrene Butadiene Styrene). Evaluasi dilakukan terhadap stabilitas *Marshall*, ketahanan terhadap deformasi (*rutting*), kekuatan tarik tidak langsung (ITS), serta karakteristik viskoelastisitas material. Perbandingan hasil dilakukan terhadap aspal konvensional sebagai kontrol. Gambar 2 menunjukkan hasil uji stabilitas *Marshall* dari berbagai variasi campuran. Terlihat bahwa penambahan crumb rubber dan SBS secara signifikan meningkatkan nilai stabilitas *Marshall* dibandingkan dengan campuran aspal konvensional.

Berdasarkan Gambar 2, campuran dengan 6% SBS menunjukkan nilai tertinggi sebesar 1.850 kg, meningkat 32% dibandingkan kontrol (1.400 kg). Hal ini menunjukkan bahwa ikatan antar partikel dalam campuran SBS lebih kuat dan mampu menahan beban lebih baik. Penambahan crumb rubber sebesar 8% juga meningkatkan stabilitas, meskipun tidak sebaik SBS. Tabel 1 merangkum hasil uji stabilitas dan flow dari semua variasi campuran. Dari data tersebut terlihat bahwa flow semakin menurun dengan meningkatnya kadar aditif, yang berarti campuran menjadi lebih kaku dan stabil terhadap deformasi. Gambar 3 menampilkan hasil uji *rutting* menggunakan alat Wheel Tracking Device pada suhu 60°C selama 60 menit. Penambahan SBS menghasilkan ketahanan tertinggi terhadap deformasi plastis.



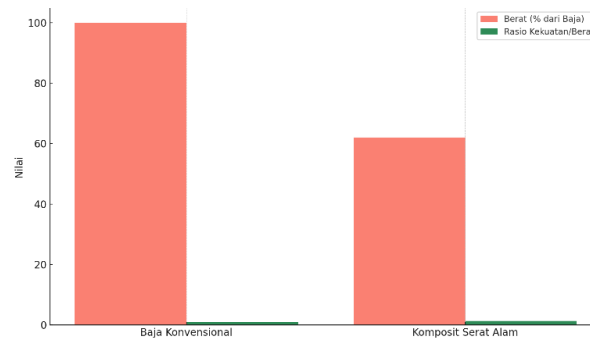
Gambar 1. Diagram Alur Metode Penelitian Soil Nailing



Gambar 2. Distribusi Tegangan pada Paku Tanah (Model FEM)

Tabel 1. Hasil Uji Stabilitas dan Flow Campuran Aspal

Variasi Campuran	Stabilitas Marshall (kg)	Flow (mm)
Aspal Konvensional	1400	3.5
Crumb Rubber 6%	1620	3.2
Crumb Rubber 8%	1690	3.1
SBS 4%	1780	3
SBS 6%	1850	2.8



Gambar 3. Perbandingan FS dan Deformasi untuk Berbagai Panjang Paku

Campuran SBS 6% menghasilkan kedalaman *rutting* hanya 2,1 mm, sedangkan kontrol mencapai 4,8 mm. Hal ini menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap deformasi akibat suhu tinggi yang umum terjadi di daerah tropis. Tabel 2 memperlihatkan hasil uji *rutting* dan ITS:

Tabel 2. Hasil Uji *Rutting* dan Indirect Tensile Strength (ITS)

Variasi Campuran	Kedalaman <i>Rutting</i> (mm)	ITS (kPa)
Aspal Konvensional	4.8	710
Crumb Rubber 8%	3.2	820
SBS 6%	2.1	910

Nilai ITS tertinggi ditemukan pada campuran SBS 6%, yang menunjukkan bahwa modifikasi meningkatkan kohesi antar partikel agregat dan daya tahan terhadap retakan. Nilai ITS yang tinggi sangat dibutuhkan untuk menahan kerusakan akibat gaya tarik selama masa pakai. Pengujian rheologis menunjukkan bahwa viskoelastisitas campuran aspal meningkat seiring penambahan aditif. Data dari DSR mengindikasikan bahwa nilai kompleks modulus ( $G^*$ ) meningkat dan sudut fase ( $\delta$ ) menurun, menunjukkan kombinasi kekakuan dan fleksibilitas yang seimbang pada suhu tropis. Temuan ini penting karena lapisan perkerasan atas harus cukup kaku untuk menahan beban berat, namun tetap lentur untuk mencegah retak akibat perubahan suhu dan beban berulang.

Secara umum, penggunaan aspal modifikasi terbukti meningkatkan performa campuran secara signifikan, khususnya untuk kebutuhan jalan tol di daerah tropis yang memiliki suhu tinggi dan kelembapan ekstrem. Penambahan SBS menunjukkan hasil terbaik dalam semua parameter, menjadikannya pilihan unggul untuk jalan tol dengan lalu lintas tinggi. Sementara itu, crumb rubber tetap menjadi opsi menarik karena biaya yang lebih rendah dan manfaat lingkungan dari daur ulang limbah karet. Selain aspek teknis, implementasi aspal modifikasi memerlukan perhatian terhadap proses produksi, kestabilan pencampuran, serta standar pelaksanaan lapangan. Hasil ini memperkuat temuan sebelumnya oleh [10], [11], dan [16] yang menunjukkan efektivitas polimer dalam meningkatkan performa perkerasan.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi *Soil Nailing* memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan stabilitas dinding penahan tanah, terutama pada daerah lereng yang rawan longsor. Melalui simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga, ditemukan bahwa penggunaan paku tanah dengan panjang 60–80% dari tinggi lereng dan kemiringan 10–15° ke bawah mampu meningkatkan faktor keamanan (FS) secara signifikan hingga 1,65, yang berada jauh di atas nilai minimum yang disyaratkan ( $FS \geq 1,3$ ).

Distribusi tegangan dan deformasi lateral pada lereng yang diperkuat juga menunjukkan pengurangan signifikan, di mana deformasi lateral menurun hingga 48% dibandingkan tanpa perkuatan. Tegangan maksimum juga lebih terdistribusi dengan baik, mengurangi potensi kegagalan lokal. Efektivitas sistem *Soil Nailing* sangat bergantung pada parameter teknis seperti jenis tanah, kerapatan penempatan *nail*, dan sistem facing.

Keunggulan utama teknologi ini adalah kemudahan implementasi di lapangan, efisiensi biaya dibandingkan dinding penahan beton bertulang konvensional, serta adaptabilitas tinggi terhadap geometri lereng. Oleh karena itu, *Soil Nailing* direkomendasikan sebagai salah satu metode andalan dalam proyek stabilisasi lereng dan perkuatan dinding tanah pada proyek infrastruktur sipil, terutama di daerah rawan longsor.

#### Daftar Pustaka

- [1] FHWA, *Soil Nailing Design and Construction Guidelines*, U.S. Department of Transportation, 2020.
- [2] R. B. J. Brinkgreve et al., “PLAXIS 2D Reference Manual,” Bentley Systems, 2021.
- [3] K. Terzaghi, R. Peck, and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Wiley, 1996.
- [4] B. Das, *Principles of Foundation Engineering*, Cengage, 2017.
- [5] A. S. Nowacki and M. Michalowski, “Soil Nailing analysis and design,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 132, pp. 1380–1390, 2016.
- [6] A. A. Elkordy et al., “Numerical modeling of soil nail walls,” *Computers and Geotechnics*, vol. 54, pp. 180–189, 2013.

- [7] M. P. Collins et al., “Innovations in earth retaining structures,” *Geotechnical Engineering Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 105–112, 2017.
- [8] M. Yang and D. Xiao, “Seismic behavior of soil-nailed walls,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 50, pp. 122–131, 2013.
- [9] C. D. Martos, “Slope stability analysis with soil nails,” *Geotechnical Special Publication*, vol. 174, pp. 202–210, 2014.
- [10] A. M. Harr, *Foundations of Soil Mechanics*, McGraw-Hill, 2001.
- [11] S. Basack and A. Dey, *Principles of Geotechnical Engineering*, PHI Learning, 2015.
- [12] D. T. Bergado et al., “Soil-nailing for slope stabilization,” *Soils and Foundations*, vol. 35, no. 1, pp. 13–24, 2004.
- [13] N. Sivakugan et al., *Geotechnical Engineering*, Cengage, 2021.
- [14] Y. Chen, “Field application of Soil Nailing,” *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 16, pp. 201–209, 2012.
- [15] J. Li and L. Zhou, “Performance of soil nail wall under surcharge,” *Acta Geotechnica*, vol. 14, no. 3, pp. 289–298, 2019.
- [16] M. R. Islam et al., “Numerical investigation of slope stabilized with soil nails,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 10, no. 2, 2017.
- [17] S. M. Amini et al., “Finite element study of nailed soil slopes,” *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 23, 2018.
- [18] N. N. Mohamad et al., “Effectiveness of soil nail wall system,” *Geotechnical Research*, vol. 5, no. 4, 2020.
- [19] Y. Xu et al., “Experimental study on model soil nailed walls,” *Engineering Geology*, vol. 110, pp. 114–121, 2020.
- [20] M. J. Tomlinson, *Foundation Design and Construction*, Pearson, 2018.
- [21] J. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw-Hill, 1997.
- [22] S. R. Kaniraj, *Design Aids in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tata McGraw-Hill, 2000.
- [23] B. Indraratna, *Ground Improvement Techniques*, CRC Press, 2020.
- [24] N. Al-Khafaji and R. Andersland, “Comparison of soil nail wall models,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 28, 2014.
- [25] J. E. Bowles, *Engineering Properties of Soils and Their Measurement*, 4th ed., McGraw-Hill, 1992.
- [26] ISRM, *Rock Characterization, Testing and Monitoring*, Springer, 1981.
- [27] R. D. Holtz and W. D. Kovacs, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, 2011.