



Inovasi Rekayasa Desain Timbunan Sampah Berkelanjutan Berbasis Geoteknik Untuk Ketahanan Struktur, Efisiensi Lahan, Dan Kesejahteraan Masyarakat TPA Kabinuang

Moh. Nasril^{1*}, Sudirman Latjemma², Eka De Patmonsela Liow³, Ira Nurazizah⁴, Aldimas⁵

^{1,2,4,5}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Madako Tolitoli

³Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, Universitas Madako Tolitoli

*Penulis Korespondensi: mohnasril@umada.ac.id

Received: 07/08/2026 | Accepted: 10/09/2026 | Publication: 05/10/2026

Abstract: The management of municipal solid waste at final disposal sites (landfills) requires an engineering approach that ensures structural stability, efficient land use, and environmental sustainability. This study aims to develop a sustainable waste landfill design model based on geotechnical analysis for improving structural resilience, land-use efficiency, and environmental management at Kabinuang Landfill, Tolitoli Regency, Central Sulawesi. The study employed field surveys, laboratory testing, and numerical simulations. Primary and secondary data were collected through topographic measurements, field sampling, laboratory testing of soil and waste materials, and direct observations. Laboratory tests included grain-size analysis, moisture content, Atterberg limits, unit weight, specific gravity, and Unconfined/Undrained Triaxial testing. Numerical analysis was conducted using Rocscience Slide 2D to evaluate slope stability and safety factors under static and dynamic conditions. The results indicate that the subgrade has a cohesion value of 30.32 kN/m², an internal friction angle of 25°, and a plasticity index of 66.58%. The proposed design adopts a sanitary landfill system with 50 cm soil cover layers over 2.5 m waste lifts, terraced configurations, and 3 m-wide benches. Numerical simulation under static conditions produced a safety factor of 2.6 at a 45° slope angle, while dynamic analysis incorporating a seismic factor produced a safety factor of 1.139, which remained within the specified safety tolerance. The simulation also indicates the potential to increase landfill height to approximately 10–15 m using a terraced sanitary landfill approach. The proposed design therefore provides a technically feasible alternative for improving landfill structural stability, optimizing land utilization, and supporting more sustainable waste management at Kabinuang Landfill

Keywords: Geotechnical Engineering; Landfill Design; Slope Stability; Land-Use Efficiency; Sustainable Waste Management; Sanitary Landfill



Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open-access article under the CC-BY-SA license.

How to Cite: Nasril, M., Latjemma, S., Liow, E. D. P., Nurazizah, I., & Aldimas. (2026). Inovasi rekayasa desain timbunan sampah berkelanjutan berbasis geoteknik untuk ketahanan struktur, efisiensi lahan, dan kesejahteraan masyarakat TPA Kabinuang. *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 6(5), 2575–2588. <https://doi.org/10.53625/jirk.v6i5.13307>

PENDAHULUAN

Pengelolaan sampah perkotaan merupakan salah satu tantangan utama dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan, khususnya pada pengelolaan Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Peningkatan volume sampah yang tidak diimbangi dengan

ketersediaan lahan dan penerapan sistem pengelolaan yang memadai berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan teknis, lingkungan maupun sosial. Salah satu aspek yang selalu menjadi perhatian adalah stabilitas timbunan sampah, karena kegagalan struktur timbunan dapat memicu longsor, serta mengancam keselamatan masyarakat disekitar TPA. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan rekayasa yang mengintegrasikan aspek geoteknik dan pengelolaan lingkungan agar sistem penimbunan sampah menjadi aman, efisien dan berkelanjutan.

TPA Kabinuang di Kabupaten Tolitoli merupakan salah satu lokasi yang menghadapi masalah tersebut. Keterbatasan kapasitas lahan, rendahnya stabilitas struktur timbunan sampah, serta dampak lingkungan yang ditimbulkan menunjukkan bahwa sistem pengelolaan yang masih memerlukan penyempurnaan. Kondisi ini tidak hanya berpengaruh terhadap umur layanan TPA, tetapi juga berpotensi menimbulkan risiko terhadap kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat sekitar. Dengan demikian, diperlukan inovasi dalam perancangan model timbunan sampah yang mampu meningkatkan stabilitas lereng, mengoptimalkan penggunaan lahan, serta meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Pengelolaan sampah di TPA Kabinuang telah memasuki tahap kritis dengan kondisi fasilitas yang memprihatinkan. Sebagai contoh, laporan menyebutkan bahwa sampah “tidak diproses dengan benar dan dibiarkan menumpuk, bahkan ada yang tercecer di sekitar area TPA”[1]. Studi lain juga menunjukkan bahwa kapasitas lahan TPA Kabinuang diperkirakan akan kelebihan muatan dalam lima tahun ke depan karena intensitas timbunan yang tinggi dan ukuran lokasi yang terbatas[2]. Lebih lanjut, sistem operasional yang masih menggunakan metode *open-dumping* menjadi fokus pembahasan antara pihak pemerintah daerah dan instansi lingkungan hidup sebagai langkah perbaikan[3]. Kondisi ini memunculkan urgensi untuk mengembangkan solusi teknologi rekayasa yang dapat meningkatkan stabilitas struktur timbunan, mengoptimalkan penggunaan lahan, dan mengurangi dampak lingkungan serta sosial terhadap masyarakat sekitar[4]. Permasalahan utama yang akan diteliti mencakup tiga hal pokok. Pertama, bagaimana karakteristik geoteknik tanah dasar, timbunan, dan lapisan penutup di TPA Kabinuang dapat dijadikan dasar dalam merancang desain timbunan yang lebih stabil. Kedua, bagaimana merancang model rekayasa desain timbunan sampah berkelanjutan berbasis analisis geoteknik yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan sekaligus menjaga ketahanan struktur. Ketiga, bagaimana penerapan desain tersebut dapat mengurangi dampak lingkungan seperti longsor timbunan, pencemaran lindi, serta meningkatkan kualitas lingkungan dan kesejahteraan masyarakat di sekitar TPA[5]

Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah di atas, maka dapat ditentukan rumusan masalah penelitian ini yaitu:

- Bagaimana karakteristik geoteknik tanah dasar, timbunan, dan lapisan penutup di TPA Kabinuang dapat dijadikan dasar dalam merancang desain timbunan yang lebih stabil?
- Bagaimana merancang model rekayasa desain timbunan sampah berkelanjutan berbasis analisis geoteknik yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan sekaligus menjaga ketahanan struktur?



- Bagaimana penerapan desain model rekayasa timbunan sampah berkelanjutan dapat mengurangi dampak lingkungan serta meningkatkan kualitas lingkungan dan kesejahteraan masyarakat di sekitar TPA Kabinuang?

Waktu Dan Tempat

Penelitian ini dilakukan dari bulan Februari hingga September 2026 di TPA Kabinuang Kabupaten Tolitoli, Sulawesi Tengah. Metode yang dilaksanakan terbagi dalam beberapa tahapan :

1. Survei geoteknik lapangan untuk memetakan kondisi tanah dasar, karakteristik timbunan, dan sistem drainase. Data diperoleh melalui pengambilan sampel tanah dan sampah di beberapa titik uji, yang kemudian dianalisis di laboratorium untuk menentukan parameter hasil pengujian sifat fisik dan mekanik seperti kadar air, berat jenis, kohesi, serta sudut geser dalam. Hasilnya menjadi data input perancangan stabilitas timbunan dan kebutuhan perbaikan desain.

2. Melakukan analisis numerik dan simulasi geoteknik menggunakan perangkat lunak seperti *Rocscience Slide 2D* guna menilai deformasi timbunan, kestabilan lereng dan faktor keamanan / *safety factor* (SF). Tahap akhir mencakup perancangan model rekayasa desain berkelanjutan dengan mempertimbangkan aspek teknis, lingkungan, dan sosial, disertai uji coba skala kecil (*pilot model*) serta validasi bersama pihak terkait atau pemerintah daerah dan masyarakat. Hasilnya diharapkan menjadi acuan pengelolaan TPA yang tangguh dan berkelanjutan.

LITERATURE RIEW

- **Stabilitas Lereng:** Komponen utamanya meliputi analisis gaya geser (*shear strength*) material lereng, beban akibat berat sendiri, tekanan air pori, dan beban eksternal. Faktor keamanan (*Safety factor*) dihitung sebagai perbandingan antara gaya penahan guling (*resisting forces*) terhadap gaya penggerak guling (*driving forces*). Analisis umum meliputi metode irisan (*slice methods*) seperti Bishop, Janbu, dan Morgenstern-Price (Das, 2016). Desain timbunan sampah, terutama pada lokasi yang memiliki topografi beragam seperti TPA Kabinuang Tolitoli, sangat bergantung pada analisis stabilitas lereng. Lereng timbunan yang curam atau tidak stabil dapat menyebabkan kelongsoran yang membahayakan struktur timbunan, infrastruktur sekitar, dan keselamatan masyarakat TPA. Analisis stabilitas lereng dengan memperhitungkan sifat tanah yang dihasilkan dari klasifikasi (seperti kadar air dan kekuatan geser) dapat membantu menentukan sudut lereng yang aman dan mendeteksi potensi keruntuhan dini.

- **Klasifikasi Tanah (USCS & AASHTO):** Komponen utama USCS adalah identifikasi berdasarkan ukuran butir (kerikil, pasir, lanau, lempung) dan indeks plastisitas. Tanah dibagi menjadi kelompok besar: tanah berbutir kasar (GW, GP, GC, GM, SW, SP, SC, SM) dan tanah berbutir halus (CL, CM, CH, MH, OL, OH, PT). AASHTO mengklasifikasikan tanah berdasarkan gradasi dan plastisitas, serta perbandingan nilai Liquid Limit (LL) dan Plasticity Index (PI), dengan kelompok A-1 hingga A-7 untuk tanah granular dan kohesif, serta A-8 dan A-9 untuk tanah organik dan gambut (Holtz & Kovacs, 1981). Klasifikasi tanah sangat krusial dalam rekayasa desain timbunan sampah. Pengetahuan mengenai jenis tanah yang ada di lokasi TPA Kabinuang Tolitoli atau material yang akan digunakan sebagai penutup (*daily/final*

cover) sangat menentukan metode penanganan dan stabilitas timbunan. Misalnya, tanah dengan plastisitas tinggi lebih cocok sebagai lapisan kedap air dibandingkan tanah pasir. Pemahaman ini penting untuk memprediksi konsolidasi, permeabilitas, dan kekuatan timbunan secara keseluruhan, yang berdampak pada efisiensi lahan dan ketahanan struktur.

- **Timbunan Sampah:** Komponen kunci dari *sanitary landfill* dan *controlled landfill* meliputi sistem penampungan lindi (*leachate collection system*), sistem penangkapan gas (*gas collection system*), lapisan penutup harian (*daily cover*), lapisan penutup akhir (*final cover*), dan lapisan dasar kedap air (*liner system*) yang terbuat dari geomembran dan tanah lempung (Tchobanoglous et al., 1993). Relevansi teori timbunan sampah jelas terlihat pada operasional TPA Kabinuang Tolitoli. Dengan beralih dari *open dumping* ke *sanitary landfill* atau *controlled landfill*, dampak lingkungan seperti pencemaran tanah dan air dapat diminimalkan. Desain *sanitary landfill* dan *controlled landfill* dengan lapisan kedap air dan sistem pengumpulan lindi akan meningkatkan ketahanan struktur timbunan, mencegah kontaminasi lingkungan, dan pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan masyarakat TPA Kabinuang dengan mengurangi risiko kesehatan.

- **Simulasi Numerik (RockScience Slide 2D):** Perangkat lunak ini bekerja dengan membagi geometri lereng menjadi elemen-elemen kecil. Komponen utamanya meliputi definisi geometri lereng, pemilihan jenis tanah dan properti mekaniknya (kohesi, sudut geser dalam, berat jenis), penentuan muka air tanah, penerapan beban eksternal, dan pemilihan kriteria keruntuhan (misalnya Mohr-Coulomb). Solusi numerik kemudian dihitung untuk menentukan faktor keamanan lereng dan pola keruntuhannya (Rock Science, n.d.). Untuk TPA Kabinuang Tolitoli, simulasi numerik seperti menggunakan RockScience Slide 2D sangat berharga. Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk memodelkan stabilitas lereng timbunan sampah dengan berbagai kondisi, termasuk potensi peningkatan beban akibat akumulasi sampah, perubahan kadar air, dan efek gas. Hasil simulasi dapat memberikan wawasan mendalam mengenai faktor keamanan lereng, mengidentifikasi zona kritis yang rentan runtuh, dan membantu dalam merancang bentuk timbunan yang optimal untuk efisiensi lahan dan ketahanan jangka panjang. Hal ini juga dapat mendukung pengambilan keputusan dalam rekayasa desain timbunan sampah yang lebih aman, yang secara tidak langsung berdampak pada kesejahteraan masyarakat TPA.

Data Dan Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data primer dan sekunder, seperti pengukuran geometri TPA Kabinuang, data uji propertis tanah dan sampah, juga dokumentasi lapangan. Beberapa tahapan yang dilakukan, yaitu :

1. Survey Lapangan

Area TPA Kabinuang setelah dilakukan pengukuran dengan menggunakan alat Theodolit memiliki ketinggian ± 12 m dari permukaan tanah. Dari hasil wawancara ke pihak pengelola TPA Kabinuang, aktif beroperasi sejak tahun 90-an hingga saat ini dan volume sampah yang masuk ± 160 m³/hari. Berdasarkan data hasil pengukuran topografi area TPA khususnya timbunan badan sampah, dibagi menjadi 3 bagian dengan maksud untuk mengetahui sifat timbunan sampah dari perbedaan waktu, yang mana untuk bagian bawah mewakili sampel Timbunan Sampah Bawah (TSB) yang tertimbun paling lama, bagian tengah merupakan



sampel Timbunan Sampah Transisi (TST) yang tertimbun dalam kurun waktu menengah, dan Timbunan Sampah Atas (TSA) mewakili sampel sampah yang baru.



Gambar 1. Pengukuran timbunan sampah dan area TPA Kabinuang

2. Pengambilan Sampel

Sampel pengujian kebutuhan data uji lab diambil dalam kondisi sampel terganggu (*disturbed sample*). Pertimbangan mengingat sulitnya pengambilan sampel tak terganggu (*undisturbed sample*) pada timbunan sampah sehingga pengambilan sampel uji diambil 3 sampel menggunakan metode Sumur Uji (*test pit*) pada kedalaman 1 m³ (SNI 03-6376-2000) pada masing-masing titik pengambilan sampel.



Gambar 2. Pengambilan sampel material setelah dikemas dan ditandai, kemudian dimasukkan ke Box Sterofome.

3. Analisis Laboratorium Sifat Tanah Dan Timbunan Sampah

Pengujian sifat fisik meliputi uji Analisa Saringan, uji Kadar Air, Batas-batas Atterberg, Berat Isi Volume dan uji Berat Jenis. Sedangkan pengujian sifat mekanik sampel adalah uji Triaxial UU.



Gambar 3. Pengujian sampel di Laboratorium

Setelah melakukan uji sampel tanah dan sampah, didapatkan hasil berupa nilai parameter yang nantinya akan digunakan sebagai data input simulasi numeris pada perangkat lunak, seperti nilai Kohesi, *Poisson Ratio* dan Sudut gesek dalam, terangkum pada Tabel 1 :

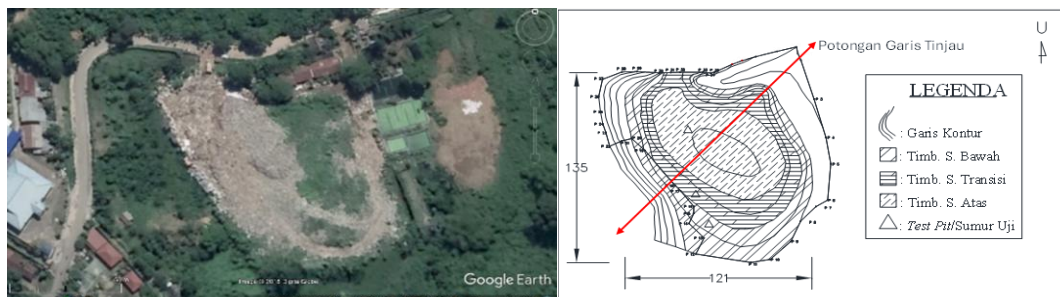
Tabel 1. Parameter hasil pengujian Lab, pengujian sifat fisik dan mekanik sampel

Jenis Sampel	c	ϕ	E	γ_b	γ_d	Kadar Air	Kadar Air Triaxial	Gs	Bulk Density γ_b	Dry Density γ_d	LL	PL	PI
	kN/m ²	°	kPa	kN/m ³	kN/m ³	%	%		kN/m ²	kN/m ²	%	%	%
Timbunan S.Bawah	24.35	23.85	30600	7.154	7.16	51.453	61.926	2.456	10.84	7.16	—	—	—
Timbunan S.Transisi	20.56	20.75	26400	6.041	6.04	69.403	67.183	2.040	10.23	6.04	—	—	—
Timbunan S.Atas	11.28	21.25	22900	4.606	4.61	75.517	70.344	1.936	8.08	4.61	—	—	—
Tanah Dasar	30.32	25.01	35300	14.8	13.30	17.055	22.825	2.650	15.59	13.30	97.66	31.08	66.58
Tanah Timbunan	33.14	21.97	30400	13.30	14.83	24.136	16.992	2.750	18.44	14.83	36.38	15.82	20.56

Sampel tanah dasar (*subgrade*) memiliki nilai kohesi 30,32 kN/m² dan nilai sudut gesek dalam 25°, indeks plastis 66,58% sehingga dalam sistem klasifikasi tanah *USCS* dan *AASHTO* (Hardiyatmo, 2012) didapatkan hasil jenis tanah bergradasi baik, lempung tak organik CH (*clay of high plasticity*).

4. Analisis Numerik (*Rocscience Slide 2D*)

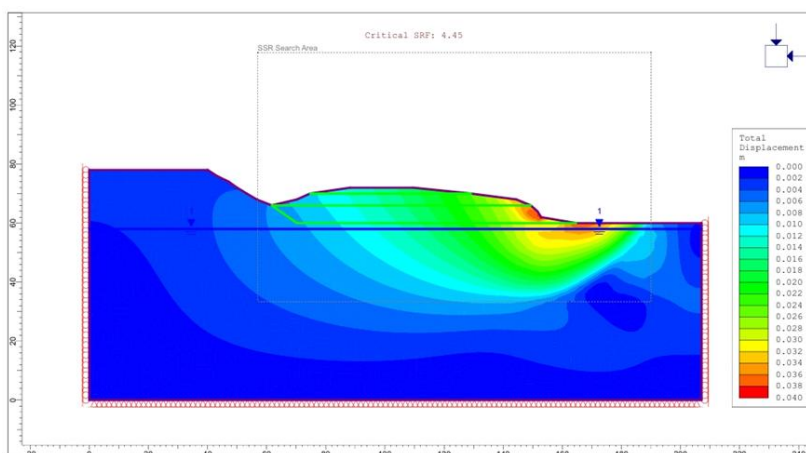
Hasil data ukur dilapangan kemudian dibuat tampilan gambar kontur luasan bidang TPA Kabinuang (Gambar. 4). Setelah itu, dibuat potongan garis peninjauan yang dianggap bidang tersebut mengalami daerah kritis pada lereng timbunan sampah. Kemudian dilakukan simulasi numerik berdasarkan desain timbunan sampah eksisting dan memasukkan data parameter hasil uji laboratorium.



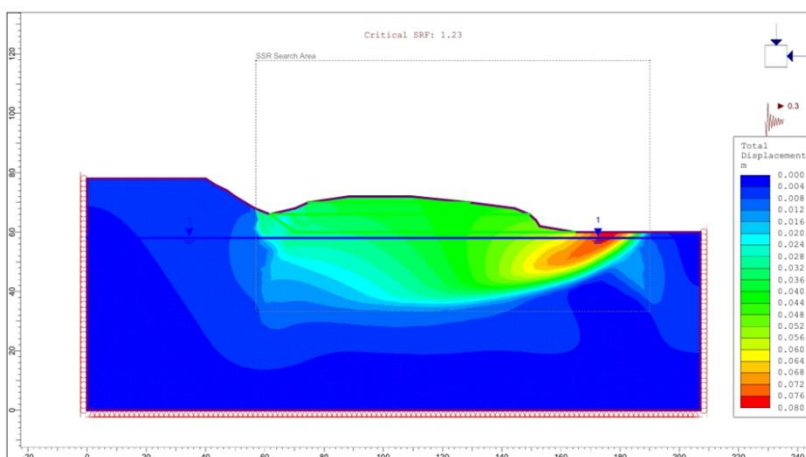
Gambar 4. Area TPA Kabinuang (Google Earth, 2026) dan kontur hasil survey lapangan.



Dari hasil simulasi numerik terlihat bahwa timbunan eksisting saat ini pada analisis statis dan dinamis masih dalam kondisi aman (Gambar 6 & 7). Data eksisting ini akan menjadi dasar acuan simulasi perencanaan desain timbunan sampah TPA Kabinuang yang berkelanjutan dan aman.



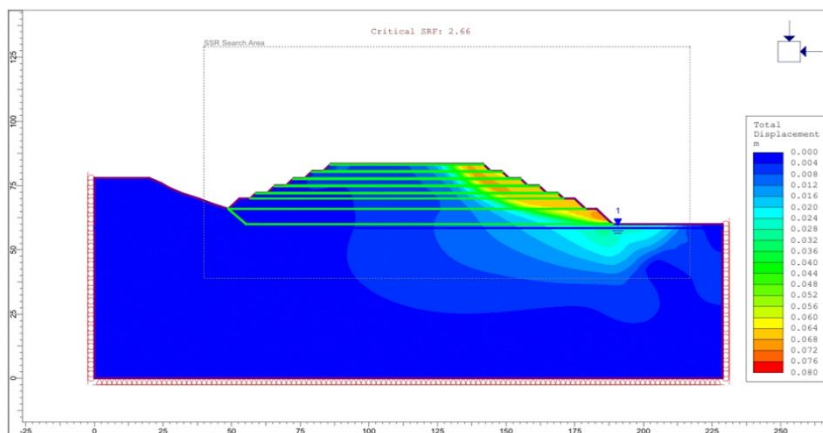
Gambar 6. Pemodelan eksisting TPA Kabinuang kondisi analisis statis.



Gambar 7. Pemodelan eksisting TPA Kabinuang kondisi analisis dinamis, menggunakan faktor gempa PGA 0,6.

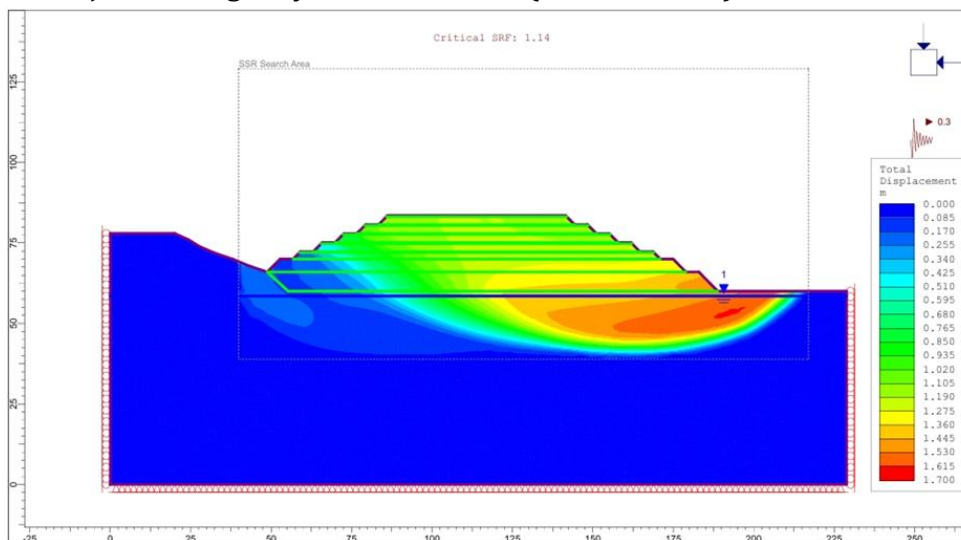
5. Perancangan Model Rekayasa Desain

Desain pemodelan timbunan sampah ini merujuk pada SNI 3964-2025 tentang perencanaan kapasitas TPA yang mengarahkan operasional ke sistem *sanitary landfill*. Berdasarkan tata cara teknis, sistem ini mensyaratkan penggunaan lapisan tanah timbunan atau penutup secara berkala agar lingkungan sekitar masih terjaga. Desain ini dirancang dengan menggunakan tanah timbunan dengan dimensi ketebalan setinggi 50 cm pada setiap lapisan timbunan sampah yang dipadatkan dengan ketebalan timbunan sampah setinggi 2,5 m dan didesain bertingkat (*Trap*). Jalur tepi pada sisi luar lapisan timbunan dibuat dengan bentuk teras bertingkat (*bench*) dengan lebar 3 m yang nanti akan difungsikan sebagai jalur bongkar muat kendaraan pengangkutan sampah baik itu truk maupun bentor.



Gambar 8. Desain pemodelan timbunan sampah, analisis statis.

Percobaan simulasi numerik dengan analisis statis menghasilkan desain yang masih cukup aman dengan nilai angka aman didapatkan 2,6 dengan kondisi sudut lereng timbunan sampah sebesar 45°. Sedangkan pada analisis dinamis atau dengan memasukkan faktor gempa didapatkan nilai 1,139 masih dalam batas toleransi aman sesuai SNI 8460-2017 tentang persyaratan perancangan geoteknik dan masih sesuai dengan persyaratan angka aman dan kejadian longsor yaitu $1,07 \leq 1,25$ (Bowles, 1987).



Gambar 9. Desain pemodelan timbunan sampah, analisis dinamis atau menggunakan faktor gempa.

Dari percobaan simulasi ini menampilkan bahwa timbunan sampah dapat dimaksimalkan ketinggiannya hingga 10 -15 m dengan metode *sanitary landfill* teras bertingkat.

Dengan demikian, hasil dari simulasi ini memungkinkan untuk merancang model rekayasa desain timbunan sampah berkelanjutan berbasis analisis geoteknik guna meningkatkan ketahanan struktur, efisiensi penggunaan lahan dan pengelolaan lingkungan di TPA Kabinuang, dengan memperhatikan karakteristik geoteknik tanah dan material timbunan, perancangan model desain stabil yang ramah lingkungan, serta evaluasi efisiensi lahan dan dampak sosial terhadap masyarakat TPA Kabinuang Tolitoli.



6. Pembuatan Dan Uji *Pilot Model*

Tahapan akhir penelitian difokuskan pada validasi dan evaluasi hasil melalui uji coba lapangan / *pilot model* di TPA Kabinuang. Proses evaluasi dilakukan dengan pengukuran deformasi lereng dan penurunan timbunan dengan cara observasi langsung.



Gambar 10. Proses penghamparan tanah timbunan di atas permukaan timbunan sampah.



Gambar 11. Proses pemadatan tanah timbunan di atas permukaan timbunan sampah.



Gambar 12. Pantauan visual ketebalan timbunan dan instalasi pipa sirkulasi gas metana

Pengaplikasian tanah timbunan pada permukaan badan sampah yang dimulai pada proses penghamparan kemudian dilanjutkan proses pemadatan. Instalasi pipa yang di tancapkan ke tanah timbunan diharapkan dapat menjadi jalur keluarnya gas metana yang ditimbulkan akibat proses pembusukan sampah organik yang berada dibagian bawah tanah

timbunan. Setelah itu dilakukan pemantauan langsung untuk mengukur apakah terjadi deformasi pada lereng timbunan sampah dan penurunan permukaan setelah pemadatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisis mengenai karakteristik geoteknik TPA Kabinuang, evaluasi efektivitas rekayasa desain dan hasil survey lapangan menunjukkan bahwa TPA Kabinuang, yang telah beroperasi sejak tahun 1990-an, memiliki ketinggian timbunan sampah rata-rata ± 12 meter dengan volume sampah masuk harian $\pm 160 \text{ m}^3/\text{hari}$. Untuk memahami variabilitas sifat timbunan sampah seiring waktu, area tersebut dibagi menjadi tiga zona: Timbunan Sampah Bawah (TSB) yang mewakili sampah tertimbun terlama, Timbunan Sampah Transisi (TST) untuk periode menengah, dan Timbunan Sampah Atas (TSA) untuk material terbaru. Pembagian zona ini krusial untuk menganalisis potensi perubahan sifat fisik dan mekanik timbunan sampah dari waktu ke waktu, yang dapat mempengaruhi stabilitas lereng secara keseluruhan.

Pengujian laboratorium meliputi sifat fisik seperti analisis saringan, kadar air, batas-batas Atterberg, berat isi volume, dan berat jenis, serta pengujian sifat mekanik melalui uji Triaksial UU. Hasil pengujian laboratorium ini menghasilkan parameter penting seperti kohesi, rasio Poisson, dan sudut gesek dalam, yang menjadi input vital untuk simulasi numerik. Berdasarkan hasil analisis, sampel tanah dasar (subgrade) menunjukkan nilai kohesi $30,32 \text{ kN/m}^2$ dan sudut gesek dalam 25° , dengan indeks plastisitas $66,58\%$. Selanjutnya, analisis numerik menggunakan perangkat lunak Rocscience Slide 2D dilakukan dengan memasukkan data topografi TPA Kabinuang dalam bentuk kontur bidang dan irisan peninjauan pada area kritis lereng. Simulasi numerik ini membandingkan stabilitas desain timbunan sampah eksisting dengan memasukkan parameter hasil uji laboratorium. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa desain timbunan sampah yang direkayasa, yang mengacu pada SNI 3964-2025 tentang sistem *sanitary landfill*, masih menunjukkan angka keamanan yang memadai. Perancangan model rekayasa desain ini melibatkan penggunaan lapisan tanah timbunan setebal 50 cm pada setiap lapisan sampah setinggi $2,5 \text{ m}$, dengan kontur bertingkat (*trap*) dan teras (*bench*) lebar 3 m di tepi lereng untuk jalur bongkar muat. Simulasi statis dengan sudut lereng 45° menghasilkan angka aman sebesar $2,6$, sementara analisis dinamis dengan memasukkan faktor gempa sesuai SNI 8460-2017 memberikan angka aman $1,139$, yang masih berada dalam batas toleransi aman ($1,07 \leq 1,25$) [cite:3, Bowles, 1987]. Hasil simulasi ini secara agregat mendukung potensi peningkatan ketinggian timbunan sampah hingga $10\text{-}15$ meter melalui metode *sanitary landfill* bertingkat.

Implikasi dari penelitian ini sangat signifikan bagi pengelolaan TPA Kabinuang. Berdasarkan hasil simulasi numerik yang menunjukkan stabilitas yang baik dimungkinkan untuk merancang model rekayasa desain timbunan sampah yang lebih efisien dalam penggunaan lahan sekaligus ramah lingkungan. Penerapan sistem *sanitary landfill* bertingkat, yang dilengkapi lapisan penutup dan teras, tidak hanya meningkatkan ketahanan struktural timbunan tetapi juga meminimalkan dampak lingkungan dengan mengelola potensi pencemaran dan emisi gas metana. Tahapan akhir penelitian, yaitu pembuatan dan uji pilot model, merupakan validasi penting terhadap desain rekayasa yang diusulkan. Proses ini melibatkan penghamparan dan pemadatan lapisan tanah timbunan,

instalasi pipa sirkulasi gas metana, serta pemantauan deformasi lereng dan penurunan timbunan secara langsung. Pengukuran dan observasi pasca-pemadatan akan memberikan data empiris mengenai kinerja model dalam kondisi nyata, sekaligus mengevaluasi efisiensi lahan dan dampak sosial-lingkungan.

Hasil validasi diharapkan dapat memperkuat dasar ilmiah rekayasa timbunan sampah yang efisien, aman dan ramah lingkungan juga menjadi dasar penyusunan rekomendasi teknis bagi instansi terkait dalam hal ini Dinas Lingkungan Hidup dan Pemerintah Daerah Kabupaten Tolitoli agar terwujudnya pengelolaan TPA yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Kadir., "Kepala Bidang Wilayah I Pusdal LH SUMA-KLH bersama Pemkab Tolitoli Bahas Langkah Penutupan TPA Open Dumping Kabinuang," PUSDAL LH SUMA.
- A. Kiersnowska and Z. Zi, "Sustainability of Geosynthetics-Based Solutions,"
- B. Okonta, F. N., Tchani-Ngankoue, Frank., & Karimi, "In-situ and Laboratory Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste from South Eastern Johannesburg," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 8, pp. 3151–3161, 2024, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-024-1272-4>.
- Badan Standardisasi Nasional. SNI 3964-2025. (2025). *Tata cara perencanaan kapasitas teknis tempat pemrosesan akhir sampah*.
- Badan Standardisasi Nasional. SNI 8460-2017. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik untuk bangunan sipil*. Badan Standarisasi Nasional.
- Bowles, J. E. (1987). *Engineering properties of soils and their measurement*. McGraw-Hill.
- Bowles, J. E., 1984. *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. 2nd penyunt. Auckland: McGraw-Hill.
- Chihi & Varga. (2024) "View of Optimizing Landfill Capacity_ A... Safety Factors under Different Models.pdf," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 1, pp. 88–96, 2024, [Online]. Available: <https://pp.bme.hu/ci/article/view/22790>.
- Danang Setiya Raharja*, "PARAMETRIC STUDY OF LANDFILL STABILITY BY USING LIMIT," *JCEBT*, vol. 8, no. 2, pp. 221–227, 2024.
- Das, B. M. (2016). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Datra, "Kondisi TPA Kabinuang Tolitoli Memprihatinkan, Warga Minta Solusi," RRI. [Online]. Available: <https://rri.co.id/toli-toli/daerah/1413399/kondisi-tpa-kabinuang-tolitoli-memprihatinkan-warga-minta-solusi>.
- E. S. Widjaja, A. Ahmad, M. Kumar, and V. Anggraini, "Physical and Numerical
- E. W. Ånes, S. Ritter, and G. Okkenhaug, "Use of numerical modelling when designing a full-scale field test of landfill top covers," *Int. Soc. SOIL Mech. Geotech. Eng.*, vol. 4, pp. 303–313, 2023.
- F. Chihi and G. Varga, "Optimizing Landfill Capacity : A Numerical Study of the Slope Inclination Variation Impact on Landfill Storage Capacity and Its influence on the Safety Factors under Different Models," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 1, pp. 88–96, 2024.
- H. K. Behnam Fatahi1, "view of predicting settlement of chemically stabilised landfills.pdf," *int. j. geomate*, vol. 5, no. 2, pp. 700–705, 2024

- Hardiyatmo, H. C. (2012). *Mekanika tanah: Edisi ke-3*. UGM PRESS. SNI 03-6376-2000. (2000). *Metode pengujian tanah dengan tabung belah (split-spoon sampler)*.
- Hardiyatmo, H. C., 2012. *Mekanika Tanah 1*. 6th penyunt. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnology*. Prentice-Hall.
- I. D. W. Nurul Lailia Sya'bani^{1*}, Yusup Saktiawan², "View of PENGARUH PENGELOLAAN SAMPAH RED...MPAH MENUJU TPA DI TPS3R MITRA PATEMON.pdf," J. Kesehat. TAMBUSAI, vol. 5, no. 3, pp. 8857–8867, 2024.
- J. I. Lingkungan, K. Misrawati, and Z. Zaim, "Semi-Aerobic Landfill System as Alternative Solution for Indonesian Landfill," *ejournal.undip*, vol. 22, no. 6,
- Li, R. Chen, and H. Lin, "applied sciences Limit Equilibrium Analysis of Landfill Instability Based on Actual Failure Surface," *MDPI AG*, vol. 13, no. 18,
- M. A. Nanda et al., "The Waste-to-Energy (WtE) Technology to Support Alternative Fuels for Agriculture in the Context of Effective Solid Waste Management in the Jabodetabek Area , Indonesia," *MDPI*, vol. 16, no. 24, p. 7980, 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/24/7980>.
- M. Nasril et al., "Optimasi Perancangan Timbunan Sampah Perkotaan Studi Kasus TPA Kabinuang Tolitoli," *SEMESTA Tek.*, vol. 23, no. 1, pp. 106–117, 2020, doi: 10.18196/st.231260.
- M. S. Keskin, "applied sciences Stability of MSW Landfill Slopes Reinforced with Geogrids," *MDPI*, vol. 12, no. 22, p. 11866., 2022, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/22/11866>.
- MDPI AG*, vol. 10, no. 4, p. 64, 2023.
- Modelling of Rockwool Insulated Landfill Liner Materials as a Heat Mitigation Method," <https://www.indonesian-geotechnical-journal.org/>, vol. 3, no. December, pp. 43–56, 2024, [Online]. Available: https://www.indonesian-geotechnical-journal.org/index.php/IGJ/article/view/106?utm_source=chatgpt.com
- N. Ijaz et al., "Optimizing Subsurface Geotechnical Data Integration for Sustainable Building Infrastructure," *MDPI AG*, 2025.
- NANDA VIRGINIA KIDING, "Kesesuaian Lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Kabinuang, Kabupaten Tolitoli," *Repository Univesitas Tadulako*. p. 10498, 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/18/10498>.
- pp. 1400–1411, 2024, doi: 10.14710/jil.22.6.1400-1411.
- R. A. Al-fares, "Analysis of GIS Optimal landfill site selection through the application of GIS analysis & geotechnical investigation geotechnical investigation," *Ann. GIS*, vol. 30, no. 3, pp. 383–410, 2024, doi: 10.1080/19475683.2024.2390409.
- Rock Science. (n.d.). *Slide2: 2D slope stability analysis software*. Retrieved from <https://www.rocscience.com/software/slide2>
- Rocksience, 2018. *Slide2*. [Online] Available at: <http://www.rockscience.com/software/slide2> [Diakses 1 November 2018].
- SNI 8460:2017, 2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.



- T. Olinic and E. Olinic, "Integrating Geosynthetics and Vegetation for Sustainable Erosion Control Applications †," MDPI, 2024.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
- V. Singh and T. Uchimura, "Effect of Material Composition on Geotechnical Properties — Study on Synthetic Municipal Solid Waste," MDPI AG, vol. 3, no. 2, pp. 397–415, 2023, [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-7094/3/2/23>.

2588

JIRK

Journal of Innovation Research and Knowledge

Vol.6, No.5, Oktober 2026

<https://doi.org/10.53625/jirk.v6i5.13308>

Accredited

SINTA 4



HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN