



## Analisis Stabilitas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Akibat Pengaruh Perubahan Sifat Mekanis Material Sampah

Anafi Minmahddun<sup>1)\*</sup>, Muh. Handy Dwi Adityawan<sup>2)</sup>, Ainul Fatayaatis Salaamah<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

<sup>2)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

<sup>3)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Ronggolawe

\*Corresponding author. [anafi.minmahddun@uho.ac.id](mailto:anafi.minmahddun@uho.ac.id)

### ARTICLE INFO

**Keywords:**

Landfill, Waste Material, Stability, Safety Factor

**How to cite:**

A. Minmahddun, M.H.D Adityawan, A.F. Salamaah (2023). Analisis Stabilitas Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Sampah Akibat Pengaruh Perubahan Sifat Mekanis Material Sampah



### ABSTRACT

The stability of landfill is a crucial aspect of waste management. Numerous factors influence the stability of landfill, one of which is the alteration of the mechanical properties of the waste material. This research aims to analyze landfill stability by considering the effects of changes in the mechanical properties of waste material. A construction stage analysis was conducted to model the process of altering the mechanical properties of waste material. The analysis was divided into 13 stages corresponding to the number of landfill steps. The initial five stages were modeled as waste with an age of < 5 years, stages 6-10 were modeled as waste with an age of 5-10 years, and the last three stages were modeled as waste with an age of > 10 years. Stability analysis using the finite element method was conducted using the concept of shear strength reduction. The analysis results indicated changes in the landfill's safety factor throughout its operational period. Stages 1-5 experienced changes in the safety factor, although these changes were not significant. Stages 6-10 witnessed a considerable decrease in the safety factor before experiencing an increase in stage 11, followed by a continuous decline until the end of stage 13. Despite changes in the safety factor during the operational process, the overall safety factor values obtained still met the minimum safety factor criteria required.

## 1. Pendahuluan

Pengelolaan sampah adalah salah satu isu penting dalam keberlanjutan lingkungan, terutama dalam konteks urbanisasi yang terus berkembang. Dalam pengelolaan sampah, salah satu aspek yang sangat krusial adalah pembuangan dan pengelolaan timbunan sampah (*landfill*). Timbunan sampah adalah tempat pembuangan akhir untuk sampah domestik dan komersial, serta limbah industri yang tidak dapat didaur ulang atau diuraikan dengan baik.

Perencanaan stabilitas timbunan sampah merupakan suatu aspek krusial dalam pengelolaan sampah yang memerlukan perhatian serius. Dalam mengkaji perencanaan stabilitas timbunan sampah, terdapat tiga aspek utama yang memegang peranan penting, yaitu karakteristik sampah, aspek geoteknik, dan desain struktur (Jahanfar *et al.*, 2017).

Timbunan sampah menerima berbagai jenis sampah yang dapat sangat bervariasi, termasuk sampah padat, sampah organik, limbah berbahaya, dan lain-lain. Proses degradasi sampah

(Reddy *et al.*, 2015) berperan dalam perubahan *properties* tanah seperti meningkatkan unit weight dan kekakuannya (Ismail *et al.*, 2019). Penelitian lain menyebutkan adanya penambahan nilai kuat geser sampah setelah berumur lebih dari lima tahun (Putera, 2018).

Karakteristik geoteknik dari tanah di lokasi timbunan sampah memegang peran penting (Duncan, Wright and Brandon, 2014). Kekuatan tanah, dan permeabilitasnya dapat mempengaruhi stabilitas timbunan. Tanah yang kurang stabil atau mudah tererosi dapat menimbulkan risiko keruntuhan. Selain itu, Kemiringan lereng timbunan adalah faktor geoteknik kunci dalam perencanaan stabilitas. Evaluasi yang cermat terhadap kemiringan lereng diperlukan untuk mencegah longsor dan pergerakan massa sampah yang tidak terkendali. Kondisi geoteknik akan menentukan jenis dinding penahan tanah yang akan digunakan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perencanaan dimensi timbunan sampah yang berada di daerah Manado. Analisis stabilitas dan deformasi dilakukan untuk mengetahui keamanan timbunan sampah dan struktur penahan akibat perubahan sifat fisik timbunan sampah dan beban kendaraan selama masa operasi. Analisis dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga.

## 2. Tinjauan Pustaka

### A. Analisis dengan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*finite element method*) adalah salah satu metode numeris yang mampu memecahkan masalah mekanika baik statik maupun dinamik (Potts and Zdravkovic, 2001). Konsep dasar metode elemen hingga yaitu diskritisasi elemen, pemilihan fungsi pendekatan untuk penyusunan matriks kekakuan lokal, penyusunan matriks kekakuan global, penentuan kondisi batas dan perhitungan besarnya tegangan dan regangan untuk setiap elemen (Suhendro, 2023).

Dalam analisis stabilitas lereng, lereng TPA dimodelkan 2D menggunakan model regangan bidang (*plane strain*). Regangan bidang mengasumsikan permasalahan dalam analisis mempunyai panjang tak terhingga yang normal terhadap bagian bidang analisis (Azizi, 2000). Aplikasi model *plane strain* dalam analisis lereng lazim dilakukan seperti yang dilakukan oleh Ramadhani dkk. dalam menganalisis stabilitas lereng tambang nikel (Ramadhani *et al.*, 2024).

Analisis stabilitas lereng menggunakan konsep reduksi kekuatan geser (*shear strength reduction/SSR*). Konsep dasar dari metode SSR sebenarnya cukup sederhana. Parameter-parameter kekuatan dari lereng dikurangi dengan suatu faktor tertentu (SRF), dan analisis tegangan elemen hingga dihitung. Proses ini diulang untuk nilai-nilai yang berbeda dari faktor pengurangan kekuatan (SRF), sampai model menjadi tidak stabil (hasil analisis tidak konvergen). Analisis ini menentukan faktor pengurangan kekuatan kritis yang setara dengan faktor keamanan dari lereng (Rockscience, 2024). Analisis SSR dapat dalam model 2D atau 3D dan memberikan hasil perhitungan yang baik (Shen and Karakus, 2014; Farshidfar and Nayeri, 2015).

Dalam analisis tegangan dan regangan formulasi kondisi statis (gaya dan tegangan) dan kondisi dinamis (perpindahan dan regangan) dilakukan terpisah. Untuk menghubungkan antara kedua kondisi tersebut dibutuhkan suatu hubungan yang biasa disebut *constitutive equation* (Chen and Saleeb, 1994). Dalam analisis tegangan dan regangan kondisi linear elastis, matriks konstitutif berisi modulus yang diperoleh dari pengujian laboratorium seperti modulus Young (Khenane, 2013).

### B. Kuat Geser Sampah Padat Perkotaan

Parameter kuat geser didapatkan dari uji direct shear dan triaxial dengan beragam modifikasi alat. Nilai tipikal kuat geser yang diperoleh dari pengujian triaxial UU berada pada rentang nilai kohesi 15-20 kPa dan sudut gesek internal 15-23° (Krase, 2007). Putera (2018) dalam penelitiannya pada TPST Piyungan mengelompokkan sifat fisik dan mekanis tanah dalam tiga jenis berdasarkan usia sampah yaitu:

**Tabel 1.** Parameter timbunan sampah berdasarkan usia (Putera, 2018)

Jenis Material	Engineering Properties				
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$E$ (kPa)	$\nu$
Timbunan Sampah <5 tahun	4,9	12.79	21.35	24300	0.3
Timbunan Sampah 5-10 tahun	5.98	15.54	22.2	27000	0.3
Timbunan Sampah >10 tahun	8.72	20.54	25.66	30000	0.3

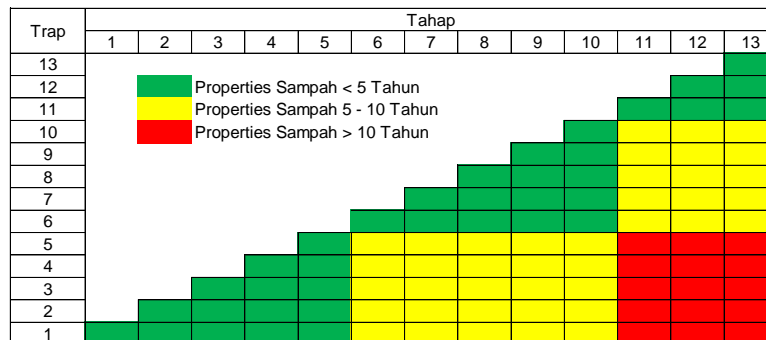
### 3. Metode Penelitian

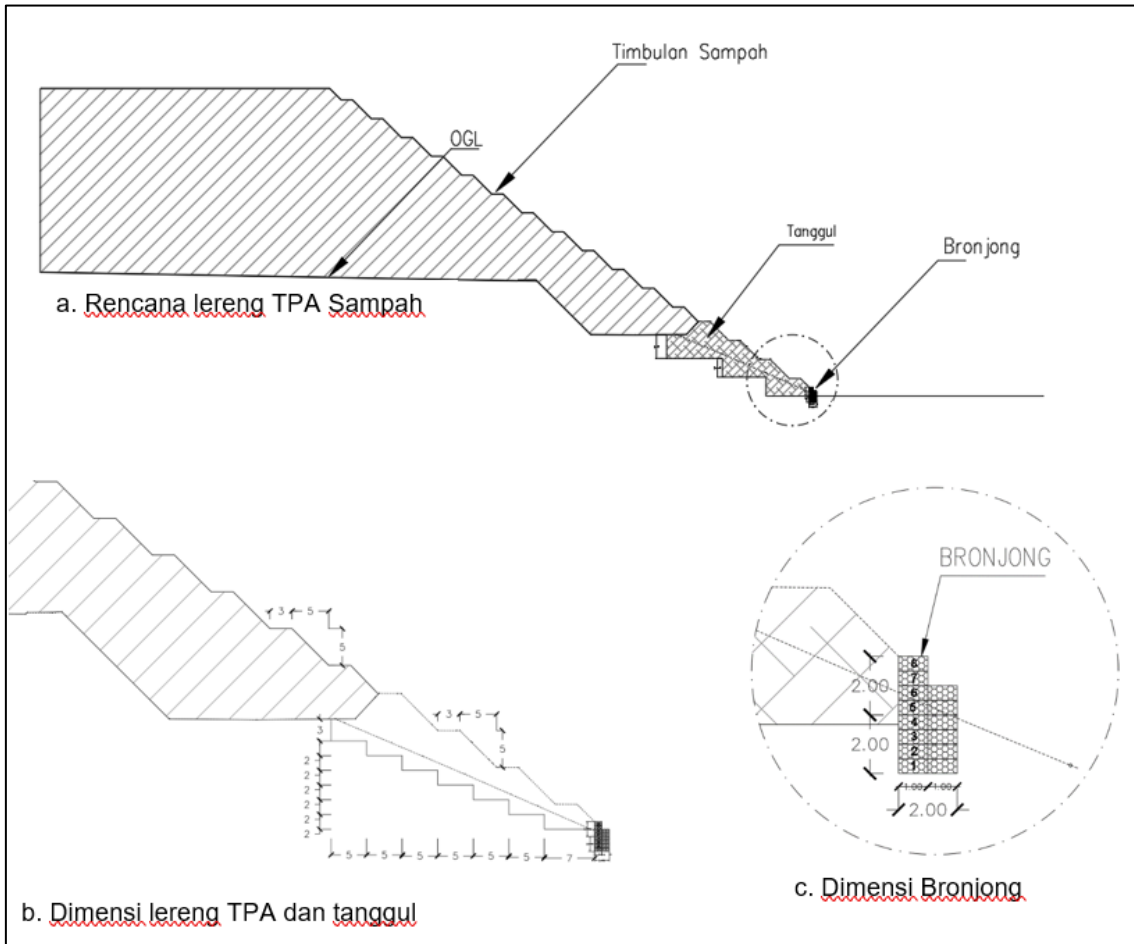
Lokasi penelitian merupakan rencana TPA yang berada di Provinsi Sulawesi Utara. Penyelidikan tanah *deep boring* dan *standard penetration test* (SPT) dilakukan sebanyak delapan titik yang letak pengujiannya terdapat pada Gambar 1. Pemodelan geometri lereng dilakukan berdasarkan gambar rencana seperti yang terdapat pada Gambar 2. Parameter tanah analisis dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu fondasi TPA menggunakan korelasi data N-SPT yang diusulkan oleh Bowles (Bowles, 1984), Adapun parameter sampah menggunakan penelitian dahulu seperti yang terdapat pada Tabel 1. Analisis tahapan konstruksi dilakukan untuk mengetahui faktor aman dan deformasi lereng TPA yang terjadi setiap masa periode penimbunan. Analisis tahapan konstruksi akan memperlihatkan pengaruh perubahan *properties* sampah terhadap stabilitas TPA. Diagram perubahan *properties* tanah dapat dilihat pada Tabel 2.



**Gambar 1.** Titik pengujian tanah

**Tabel 2.** Skema perubahan *properties* sampah





Gambar 2. Geometri lereng TPA

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### A. Hasil Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah dilakukan untuk mengetahui jenis tanah yang menjadi landasan TPA. Hal ini penting dilakukan karena salah satu faktor yang mengontrol kestabilan lereng adalah jenis tanah fondasinya (Emadi-Tafti, Ataie-Ashtiani and Hosseini, 2021). Rekap hasil penyelidikan tanah pada lokasi penelitian terdapat pada Tabel 3. Hasil penyelidikan tanah menunjukkan daerah yang akan menjadi fondasi TPA (BH 1, BH 2, BH 3 dan BH 4) terdiri dari lapisan lempung yang relatif tipis yaitu berkisar antara 0,6 – 1 m. Gambar perencanaan menunjukkan akan dilakukan penggalian sedalam lebih dari 1 m dari permukaan tanah, sehingga bisa dipastikan TPA akan berdiri pada lapisan tanah keras dengan N-SPT > 60 dan akan memperkecil kemungkinan terjadinya penurunan berlebih pada fondasi TPA.

Analisis menggunakan metode elemen hingga untuk mendapatkan deformasi dan *safety factor* (SF) lereng membutuhkan lima parameter tanah yaitu modulus young ( $E$ ), berat volume ( $\gamma$ ), kohesi ( $c$ ), sudut gesek internal ( $\phi$ ) dan angka poisson ( $\nu$ ). Untuk tanah dasar, *properties* tanah dasar diambil dari korelasi data N-SPT (Bowles, 1984) dengan semua parameter yang digunakan dan tanggul tanah dimodelkan sebagai tanah dengan *relative density* masuk dalam kategori dense. *Input properties* tanah dan sampah pada model terdapat pada Tabel 4.

**Tabel 3.** Rekap hasil penyelidikan tanah

Titik Bor	Kedalaman (m)	Jenis Tanah
BH 1	0 - 0,8	Lapisan lempung
	0,8 - 23	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 2	0 - 0,6	Lapisan lempung
	0,6 - 9,5	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 3	0 - 0,7	Lapisan lempung
	0,7 - 28	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 4	0 - 1	Lapisan lempung
	1 - 21	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 5	0 - 6	Lapisan lempung
	6 - 22	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 6	0 - 6	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 7	0 - 5,5	Lapisan lempung
	5 - 41	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir
BH 8	0 - 5,5	Lapisan lempung
	5,5 - 8	SPT>60, lapisan bongkahan batu pasir

**Tabel 4.** *Properties* tanah dan sampah

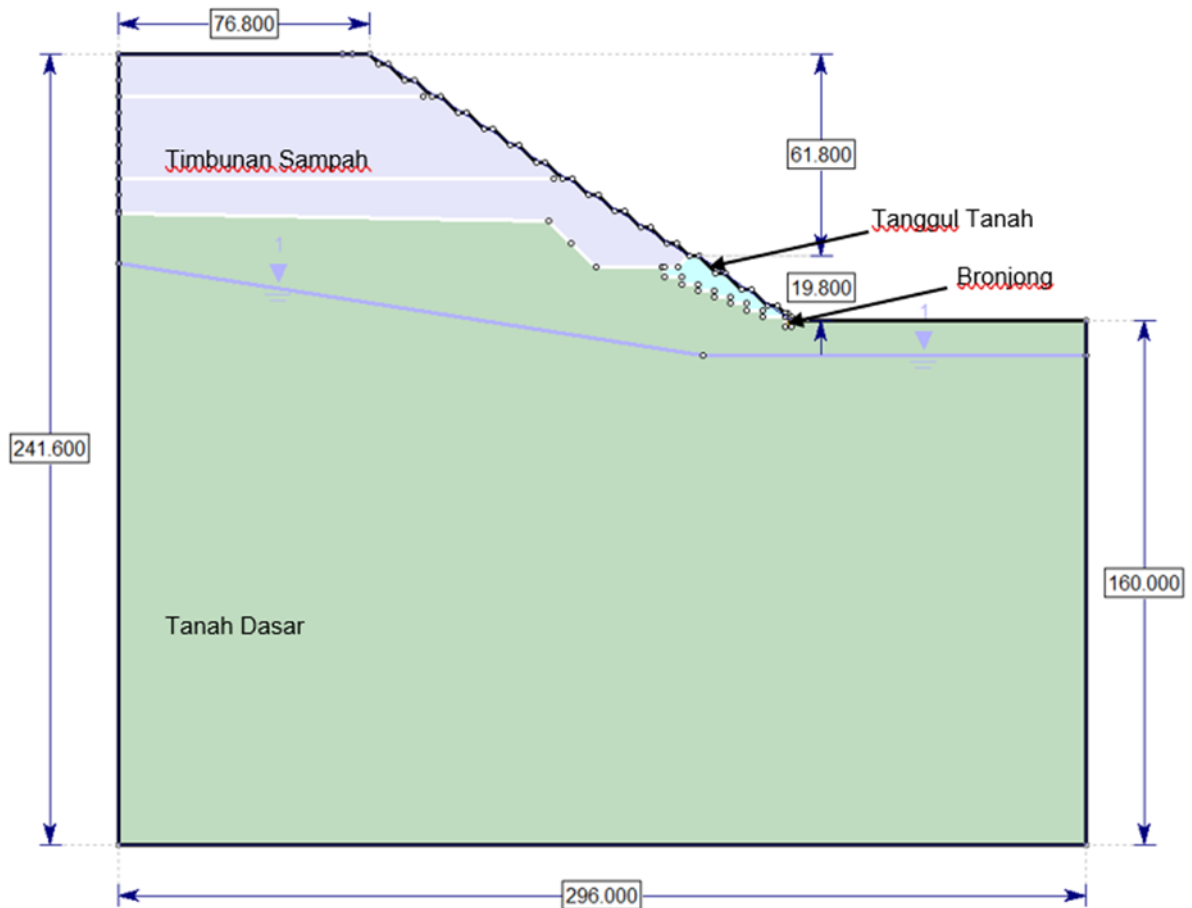
Jenis Material	Engineering Properties				
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$E$ (kPa)	$\nu$
Timbunan Sampah <5 tahun	6	12.79	21.35	25000	0.3
Timbunan Sampah 5-10 tahun	7	15.54	22.2	30000	0.3
Timbunan Sampah >10 tahun	8	20.54	25.66	35000	0.3
Tanggul Tanah	17.31	8.2	30	40000	0.3
Bronjong	18	100	30	45000	0.3
Tanah Dasar	18	250	35	450000	0.3

## B. Pemodelan Geometri Lereng

Pemodelan geometri TPA menggunakan potongan melintang lereng sisi tengah karena memiliki ketinggian yang lebih dari potongan melintang yang lain. Geometri lereng yang dimodelkan didasarkan pada Gambar 2. Terdapat 13 tingkat timbunan sampah, masing-masing tingkat setinggi 5 m dengan kemiringan 1v:1h. Setiap tingkat terdapat bench selebar 3 m. Di kaki timbunan sampah terdapat tiga tingkat tanggul penahan tanah dengan tinggi 5 m dan kemiringan 1v:1h, ditopang oleh bangunan bronjong setinggi 4 m dan lebar 2 m.

Analisis dilakukan menggunakan program Phase2. Dimensi model dibuat tidak boleh terlalu sempit sehingga mempengaruhi hasil analisis serta tidak terlalu luas sehingga membutuhkan sumber daya komputer yang besar serta waktu analisis yang lebih lama. Ukuran model menggunakan pendekatan yang diusulkan oleh Azizi (Azizi, 2000). Pemodelan bentuk lereng pada program phase2 terdapat pada Gambar 3.

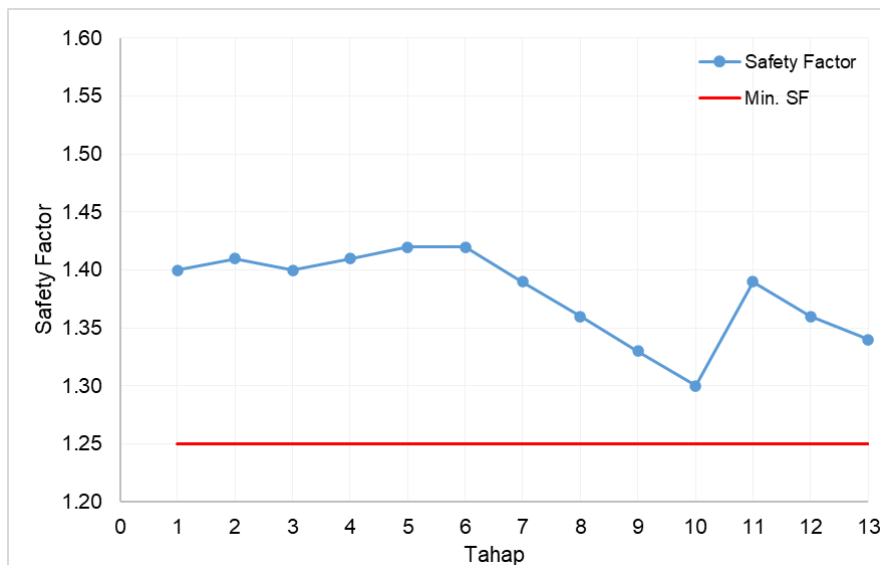
Selain perubahan *properties* sampah seperti yang terdapat pada Tabel 2, analisis tahapan konstruksi akan memodelkan beban alat berat yang bekerja dipuncak lereng pada tiap tahapan konstruksi. Hal ini untuk memodelkan penggunaan alat berat saat masa operasi nanti. Alat berat dimodelkan sebagai beban merata sebesar 10 kPa.



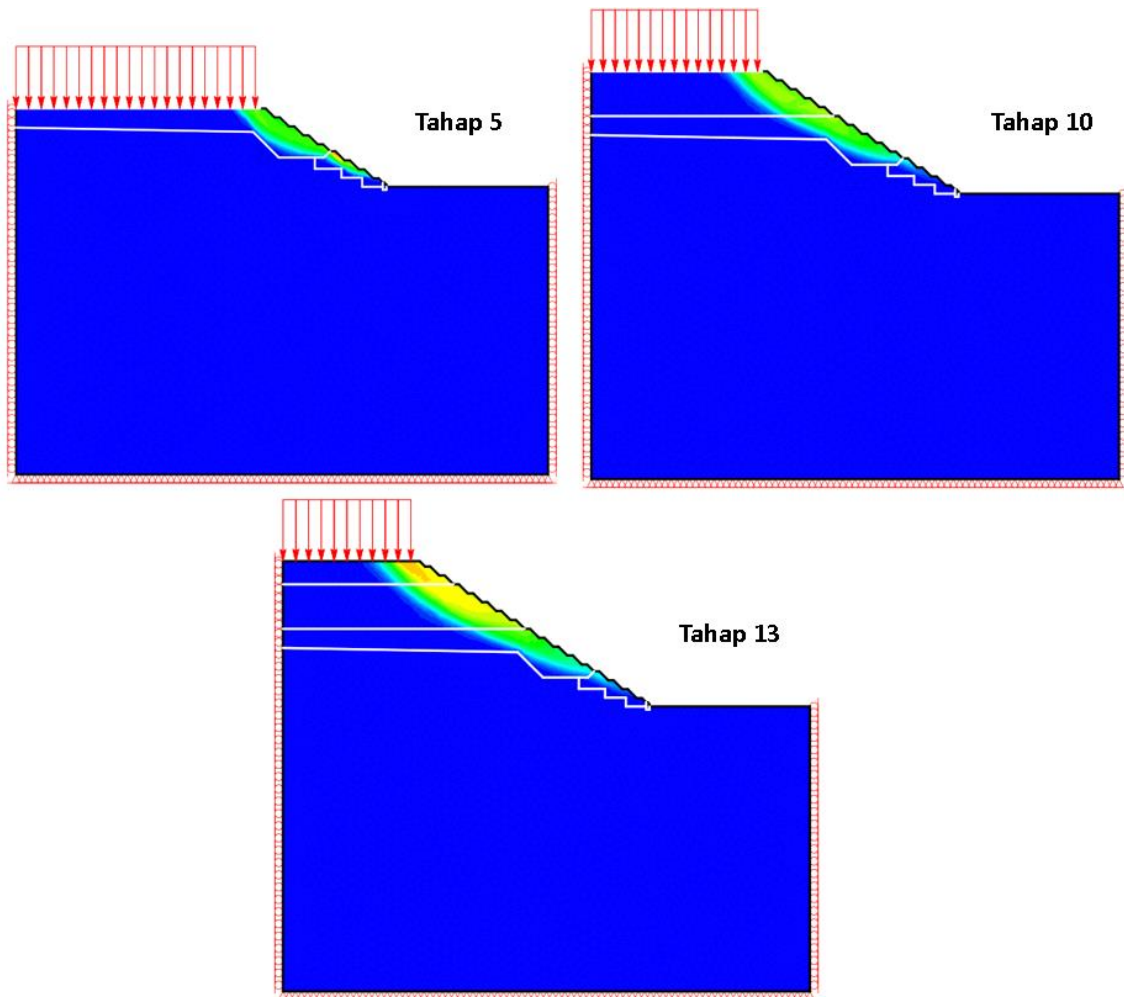
Gambar 3. Pemodelan geometri lereng

**C. Hasil Analisis Faktor Aman dan Deformasi**

Hasil analisis faktor aman setiap tahap konstruksi terdapat pada Gambar 4 dan letak bidang gelincir dapat dilihat pada Gambar 5. Gambar bidang gelincir diwakili oleh tahap 5, 10 dan 13 karena tahap ini merupakan transisi perubahan *properties* sampah.



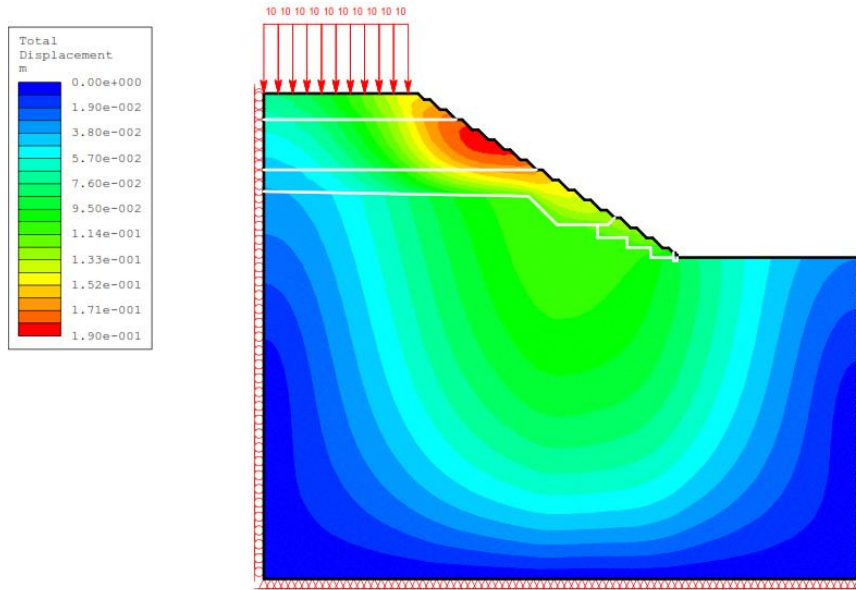
Gambar 4. Nilai faktor aman lereng TPA setiap tahap konstruksi



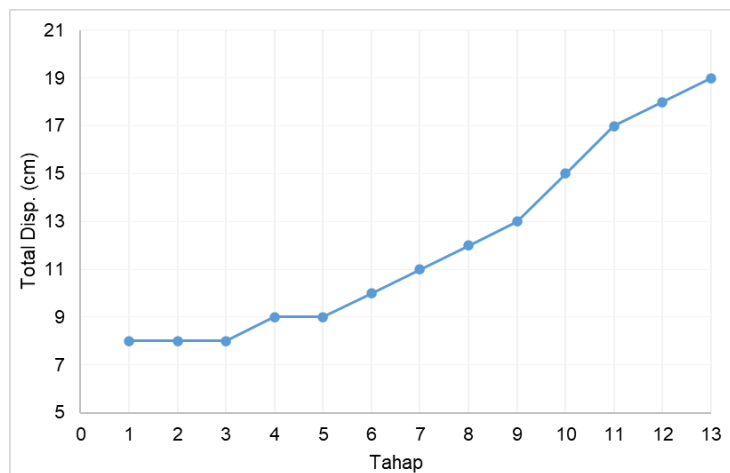
**Gambar 5.** Bidang gelincir TPA pada tahap 5, 10 dan 13

Hasil analisis pada Gambar 4 terlihat bahwa faktor aman pada tahap 1-5 tidak mengalami perubahan yang signifikan disebabkan hingga tahap 5 timbunan masih berada pada tanah dasar yang sangat keras dengan nilai N-SPT > 60. Faktor aman tahap 6-10 mengalami penurunan karena timbunan sampah semakin tinggi dan ditopang oleh sampah dibawahnya. Meskipun pada tahap ini lapisan sampah 1-5 telah mengalami peningkatan nilai kuat geser namun nilainya tidak sebesar nilai kuat geser tanah dasar yang menjadi tumpuan pada tahap 1-5. Faktor aman tahap 11-13 mengalami peningkatan karena pada tahap ini lapisan dibawahnya mengalami peningkatan nilai kuat geser yang cukup signifikan terutama pada lapisan 1-5. Meskipun mengalami perubahan, nilai faktor aman pada semua tahap masih memenuhi kriteria faktor keamanan minimum sebesar 1,25 SNI 8460:2017 (Badan Standarisasi Nasional, 2017). Bidang gelincir yang terbentuk pada Gambar 5 menunjukkan longsor yang mungkin terjadi adalah longsoran lokal yang dipengaruhi oleh *properties* sampah karena bidang gelincir tidak memotong tanah dasar yang merupakan tanah keras dengan N-SPT>60.

Hasil analisis deformasi pada tahap 13 dan rekap deformasi semua tahapan analisis berturut-turut terdapat pada Gambar 6 dan Gambar 7. Hasil analisis menunjukkan semakin bertambahnya tinggi timbunan sampah terdapat peningkatan pada total *displacement* namun besarnya masih relatif kecil (19 cm). Perbedaan pola *displacement* pada Gambar 5 dan Gambar 6 adalah pada Gambar 5 *displacement* yang ditampilkan adalah *displacement* pada saat lereng mengalami keruntuhan. Adapun, pada Gambar 6 *displacement* yang dimunculkan adalah *displacement* aktual yang terjadi akibat berat sendiri dari lereng tersebut dan beban alat berat sebesar 10 kPa.



Gambar 6. Hasil analisis deformasi tahap 13



Gambar 7. Rekap hasil analisis deformasi setiap tahapan analisis

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh *properties* sampah sangat mempengaruhi faktor keamanan lereng TPA. Terlihat pada analisis tahap 6-10, faktor aman lereng mengalami penurunan disebabkan berubahnya *properties* material tempat timbunan sampah berdiri. Pada mulanya timbunan sampah bertumpu pada tanah dasar yang keras (tahap 1-5) kemudian pada tahap 6-10 timbunan sampah bertumpu pada sampah dibawahnya yang notabene memiliki nilai kuat geser jauh lebih kecil dari tanah dasar. Perubahan faktor aman lereng selama proses konstruksi menunjukkan perubahan *properties* sampah sangat mempengaruhi stabilitas TPA secara global.

## Referensi

- Azizi, F. (2000) *Applied Analysis in Geotechnics*. London: E & FN Spon.
- Badan Standarisasi Nasional (2017) *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik, Persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Bowles, J.E. (1984) *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. 2nd edn. Auckland: McGraw-Hill.

- Chen, W.F. and Saleeb, A.F. (1994) *Constitutive Equations for Engineering Materials*. Amsterdam: Elsevier.
- Duncan, J.M., Wright, S.G. and Brandon, T.L. (2014) *Soil Strength and Slope Stability*. 2nd edn. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Emadi-Tafti, M., Ataie-Ashtiani, B. and Hosseini, S.M. (2021) 'Integrated impacts of vegetation and soil type on slope stability: A case study of Kheyroud Forest, Iran', *Ecological Modelling*, 446(March), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109498>.
- Farshidfar, N. and Nayeri, A. (2015) 'Slope Stability Analysis by Shear Strength Reduction Method', *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 5(1), pp. 35–37.
- Ismail, S. *et al.* (2019) 'Slope stability of landfill with waste degradation', *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(1), pp. 393–398. Available at: <https://doi.org/10.35940/ijitee.A4148.119119>.
- Jahanfar, A. *et al.* (2017) 'Erratum for "Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach" by Ali Jahanfar, Bahram Gharabaghi, Edward A. McBean, and Brajesh K. Dubey', *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(9), p. 8217001. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001763](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001763).
- Khenane, A. (2013) *Introduction to Finite Element Analysis Using Matlab and Abaqus*. Boca Raton: CRC Press.
- Krase, V. (2007) *Stability of Municipal Solid Waste Landfills*. Technische Universität Braunschweig.
- Potts, D.M. and Zdravkovic, L. (2001) *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*. London: Thomas Telford.
- Putera, M.A. (2018) *Analisis 3 Dimensi Stabilitas Lereng Timbunan Sampah Padat Perkotaan Pada Tpst Piyungan Yogyakarta*. Universitas Gadjah Mada.
- Ramadhani, S. *et al.* (2024) 'Analisis Stabilitas Lereng Tambang Nikel Kabupaten Morowali', *REKONSTRUKSI TADULAKO: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 5(1), pp. 65–70. Available at: <https://doi.org/10.22487/renstra.v5i1.654>.
- Reddy, K.R. *et al.* (2015) 'Effects of Degradation on Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste from Orchard Hills Landfill, USA', *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 1(3), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40891-015-0026-2>.
- Rockscience (2024) *Shear Strength Reduction Overview*. Available at: <https://www.rockscience.com/help/rs2/documentation/rs2-model/ssr-stability-analysis> (Accessed: 21 April 2024).
- Shen, J. and Karakus, M. (2014) 'Three-dimensional numerical analysis for rock slope stability using shear strength reduction method', *Canadian Geotechnical Journal*, 51(2), pp. 164–172. Available at: <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0191>.
- Suhendro, B. (2023) *Analisa Struktur Metode Elemen Hingga*. Yogyakarta: Beta Offset.