

ANALISIS DEFORMASI KOLOM TANAH GRANULAR MENGGUNAKAN METODE *SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS*

Aulina Reza Putri^{1*}, Wiwik Rahayu², R. R. Dwinanti Rika Marthanty³

^{1*,2,3} Program Studi Magister Teknik Sipil, ²Dosen Bidang Keilmuan Geoteknik, ³Dosen Bidang Keilmuan Manajemen Sumber Daya Air, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus UI Depok, Pondok Cina, Depok, Jawa Barat, 16424

¹aulina.rezaputri@gmail.com, ²wiwikftui@gmail.com, ³rr.dwinanti@ui.ac.id

Info Artikel

Abstrak

Sejarah Artikel:

Diterima: Juli 2024
Disetujui: Agt 2024
Dipublikasikan: Des 2024

Keywords:

*Smoothed Particle
Hydrodynamics; granular
soil; soil failure; Drucker-
Prager*

Gempa bumi berkekuatan besar sering memicu fenomena likuefaksi pada deposit tanah granular. Salah satu peristiwa likuefaksi besar di Indonesia terjadi saat gempa Palu 2018, yang menyebabkan kerugian ekonomi mencapai 911 juta USD. Salah satu mitigasi likuefaksi adalah mengevaluasi dampak yang ditimbulkannya. Fenomena likuefaksi dapat dimodelkan secara numerik, salah satunya menggunakan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* atau SPH. SPH adalah metode kontinum yang tidak menggunakan *mesh* dalam model numerik. Kelebihan metode SPH adalah kemampuannya memodelkan fenomena deformasi besar menggunakan pendekatan Lagrangian. Dalam penelitian ini, SPH digunakan untuk memodelkan keruntuhan tanah granular tersaturasi 2D berukuran 0,6 m x 2,0 m. Model konstitutif tanah yang digunakan adalah elasto-plastis, dimana deformasi plastis dihitung menggunakan kriteria kegagalan Drucker-Prager. Interaksi antara partikel tanah-air diwakilkan dengan gaya seepage. Pada model ini, tidak dimodelkan gaya dari luar selain gaya gravitasi. Hasil simulasi digunakan untuk menganalisis deformasi dan regangan tanah granular.

Kata Kunci: *Smoothed Particle Hydrodynamics*, tanah granular, keruntuhan tanah, Drucker-Prager

Abstract

Large magnitude earthquakes often trigger liquefaction phenomenon in granular soil deposits. One of the major liquefaction events in Indonesia occurred during the 2018 Palu earthquake, which caused economic losses around 1.1 billion USD. Liquefaction can be mitigated by evaluating the risk and impact it will cause. The events can be modeled numerically by using the Smoothed Particle Hydrodynamics or SPH method. SPH is a continuum method that doesn't need to simulate numerical model. The advantage of using SPH is its ability to model large deformation phenomenon using Lagrangian approach. In this research, SPH was used to model the failure mechanism of 2D saturated granular soil column with 0.6 m x 2.0 m dimension. Soil constitutive model used is elasto-plastic, where plastic deformation is measured using Drucker-Prager failure criterion. The interaction between soil-water particles is represented by the seepage force, following the research model of Korzani et al. (2017). In this

PENDAHULUAN

Likuefaksi disebabkan oleh kenaikan tekanan air pori dan penurunan tegangan efektif tanah sehingga tanah granular mengalami perubahan perilaku, dari kondisi padat menjadi kondisi cair [1]. Likuefaksi terjadi pada tanah granular, tanah dengan distribusi seragam, tanah pada kepadatan lepas, tanah alluvial, tanah dengan umur yang muda, dan pada deposit tanah yang dekat dengan muka air [2]. Likuefaksi menyebabkan ketidakstabilan tanah dan berbahaya bagi keselamatan manusia. Bentuk ketidakstabilan yang ditimbulkan seperti *settlement*, *lateral spreading*, dan *flow slides*. Menurut Peta Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia, potensi likuefaksi menyebar di seluruh pulau besar di Indonesia [3].

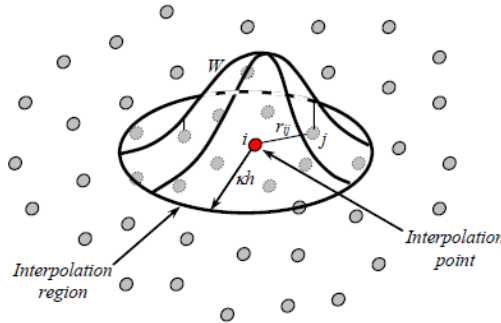
Penelitian mengenai deformasi yang ditimbulkan oleh likuefaksi akan memberikan wawasan terhadap arah kebijakan konstruksi dan mitigasi bencana Indonesia. Metode *Finite Element Method* atau FEM sudah umum digunakan dalam memodelkan fenomena geoteknik. Walaupun begitu, FEM mengalami *mesh distortion* saat memodelkan deformasi besar [4]. Terdapat metode kontinum lain bernama *Smoothed Particle Hydrodynamics* atau SPH. SPH merupakan metode numerik yang tidak membutuhkan *background mesh*. Sejauh ini, SPH sudah banyak digunakan dalam bidang geomekanik, seperti permodelan *embankment*, *slope*, pondasi dangkal, *landfill*, hingga keruntuhan tanah granular [5]-[12]

Penelitian ini menggunakan SPH untuk memodelkan perilaku tanah granular tersaturasi pasca likuefaksi. Kolom tanah granular tersaturasi berukuran 0,6 m x 2,0 m dimodelkan dalam sebuah box berukuran 1,0 m x 9,0 m. Partikel tanah diasumsikan memiliki perilaku elasto-plastis, dimana deformasi plastis mengacu pada kriteria kegagalan Drucker-Prager. Interaksi partikel tanah-air diwakilkan melalui gaya seepage [12]. Simulasi dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi kering dan kondisi jenuh. Pada kondisi jenuh, dilakukan variasi sudut geser, yaitu $\varphi=22^\circ$, 28° , dan 35° . Hasil simulasi digunakan untuk menganalisis pengaruh saturasi dan variasi sudut geser terhadap deformasi, perubahan tegangan, dan perubahan regangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep dasar SPH

SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamic*) merupakan metode kontinu dimana domain perhitungan didiskretkan menjadi serangkaian titik yang memiliki massa sesuai volume yang ditempati, Perhitungan SPH berdasar pada konsep interpolasi. Tiap partikel dalam volume sampel memiliki kontribusi terhadap perhitungan *field variable* partikel lainnya.



Gambar 1 Proses interpolasi SPH [10]

Persamaan umum SPH tertulis pada Persamaan (1) sebagai berikut:

$$\langle f(x) \rangle \approx \int_D f(x') W(x - x', h) dx' \quad (1)$$

dimana x adalah posisi partikel, D adalah volume sampel, W adalah fungsi kernel, dan h adalah *smoothing length* yang mendefinisikan domain pengaruh fungsi kernel. Persamaan integral (1) dapat didiskretkan menjadi penjumlahan *field function* dari partikel yang ada dalam support domain sebagai berikut:

$$\langle f(x) \rangle \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x - x_j, h) \quad (2)$$

dimana $j=1, 2, \dots, N$, menandakan partikel dalam support domain atau *neighboring particle*. m_j dan ρ_j adalah massa dan densitas partikel j . (m_j/ρ_j adalah volume V_j dari partikel j). Menggunakan persamaan di atas, *particle approximation* untuk fungsi pada partikel i dapat ditulis sebagai:

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (3)$$

dimana $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$. Fungsi kernel yang digunakan dalam penelitian ini adalah *cubic spline*, mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$W_{ij} = \alpha_d \times \begin{cases} \frac{2}{3} - q^2 + \frac{1}{2}q^3, & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2 - q)^3, & 1 \leq q \leq 2 \\ 0, & q \geq 2 \end{cases} \quad (4)$$

Permodelan SPH Air

Fluida dimodelkan menggunakan Weakly Compressible SPH (WCSPH) mengikuti penelitian [5],[13],[12]. Pada WCSPH, fluida bersifat sedikit lebih kompresibel dibanding air dan diberi kecepatan rambat gelombang suara lebih besar daripada kecepatan aliran fluida. Hal ini untuk mencegah terjadinya fluktuasi densitas pada model. Penelitian [12] mengadaptasi persamaan konservasi momentum untuk air dari penelitian [14] yaitu:

$$\frac{Dv_a^\alpha}{Dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} \right) \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_a^\alpha} + \sum_b \frac{4m_b(\mu_a + \mu_b)v_{ab}^\alpha}{(\rho_a + \rho_b)^2} \left(\frac{1}{r_{ab}} \frac{\partial W_{ab}}{\partial r_{ab}} \right) + f_a^\alpha \quad (5)$$

dimana indeks a dan b mewakili partikel air dan μ adalah viskositas dinamik partikel air.

Persamaan konservasi massa untuk partikel air adalah sebagai berikut:

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j (v_i^\alpha - v_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\alpha} \quad (6)$$

dimana α dan β adalah arah koordinat Cartesian, ρ adalah densitas tanah, v adalah kecepatan, dan $\sigma^{\alpha\beta}$ adalah tensor tegangan total tanah. f^α adalah komponen percepatan yang disebabkan oleh gaya eksternal,

Tensor tegangan total untuk air terdiri dari tekanan hidrostatik p dan tegangan geser deviatorik s , yaitu:

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (7)$$

dimana $\delta^{\alpha\beta}$ adalah Kronecker's delta. Tekanan hidrostatik p dihitung menggunakan *Equation of State* (EOS), yaitu fungsi perubahan densitas. Hubungan tekanan dan densitas partikel air yang digunakan dalam penelitian ini mengikuti penelitian [15] sebagai berikut:

$$P = \frac{\rho_0 C_s^2}{\gamma} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (8)$$

dimana ρ_0 adalah densitas pada kondisi inisial, ρ adalah densitas partikel, C_s adalah kecepatan rambatan gelombang suara pada material, dan $\gamma = 7$ agar EOS menjadi lebih kaku. [13] mengusulkan nilai C_s diambil sedikit lebih besar dari $10u$ (u adalah kecepatan aliran maksimum), agar fluktuasi densitas kurang dari 1%.

Permodelan SPH Tanah

Persamaan konservasi massa untuk partikel tanah mengikuti Persamaan (6). Sementara itu, persamaan konservasi momentum mengikuti persamaan berikut:

$$\frac{Dv_i^\alpha}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + f_i^\alpha \quad (9)$$

Model konstitutif tanah yang digunakan adalah elastoplastis. Tensor tegangan tanah terbagi dua jenis, yaitu tekanan isotropis p dan tegangan geser deviatoric s :

$$\sigma^{\alpha\beta} = -p\delta^{\alpha\beta} + s^{\alpha\beta} \quad (10)$$

Tekanan hidrostatik tanah dapat dihitung melalui persamaan:

$$p = -\frac{\sigma^{YY}}{3} = -\frac{1}{3}(\sigma^{xx} + \sigma^{yy} + \sigma^{zz}) = K\epsilon^{YY} \quad (11)$$

dimana ϵ adalah regangan volumetric. Sementara itu, tegangan deviatoric tanah dapat dihitung melalui persamaan laju tegangan Jaumann seperti berikut:

$$\dot{\sigma}^{\alpha\beta} - \sigma^{\alpha\gamma}\dot{\omega}^{\beta\gamma} - \sigma^{\gamma\beta}\dot{\omega}^{\alpha\gamma} = 2G\dot{e}^{\alpha\beta} + K\dot{\epsilon}^{YY}\delta^{\alpha\beta} \quad (12)$$

dimana $\dot{\epsilon}^{YY}$ adalah laju regangan volumetric, $\dot{e}^{\alpha\beta}$ adalah laju regangan deviatoric, dan $\dot{\omega}^{\alpha\beta}$ adalah laju regangan rotasi.

METODE PENELITIAN

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini merupakan tanah granular dengan parameter seperti yang tertulis pada Tabel 1. Parameter disesuaikan dengan kondisi tanah *loose*. Sketsa model dapat dilihat pada Gambar 1. Sebuah kolom tanah berukuran 0,6 m x 2,0 m berada dalam sebuah kotak berukuran 1,0 x 9,0 m. Kotak dimodelkan sebagai *solid boundary*.

Dalam kondisi inisial, tanah granular sudah tersaturasi. Selama permodelan, tidak ada gaya eksternal diberikan kecuali gaya gravitasi. Ketika simulasi mulai berjalan, sampel tanah akan menerima gaya gravitasi dan mengalami keruntuhan secara alami. Simulasi dilakukan menggunakan *open-source platform* bernama PersianSPH dan divisualisasikan VisIt.

Model konstitutif tanah yang digunakan adalah elasto-plastis. Deformasi plastis dihitung menggunakan kriteria kegagalan Drucker-Prager, *non-associated flow rule*, melewati persamaan berikut:

$$(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} + \alpha_\phi I_1 - k_c = 0 \quad (13)$$

dimana I_1 dan J_2 adalah invariant pertama dan ke-dua dari tensor tegangan. α_ϕ dan k_c adalah konstanta Drucker-Prager yang berhubungan dengan konstanta material Coulomb c (kohesi) dan ϕ (sudut geser). Dalam kondisi plane strain, konstanta Drucker-Prager menjadi:

$$\alpha_\phi = \frac{\tan \phi}{\sqrt{9+12\tan^2 \phi}} \quad (14)$$

$$k_c = \frac{3c}{\sqrt{9+12\tan^2 \phi}} \quad (15)$$

Non associated flow rule mengindikasikan bahwa fungsi potensi plastis memiliki bentuk sebagai berikut:

$$g = \sqrt{J_2} + 3 I_1 \sin\psi \quad (16)$$

dimana ψ adalah sudut dilatansi. Persamaan *particle approximation* untuk *non-associated flow rule*, yaitu:

$$\frac{D\sigma_i^{\alpha\beta}}{Dt} = \sigma_i^{\alpha\gamma}\dot{\omega}_i^{\beta\gamma} + \sigma_i^{\gamma\beta}\dot{\omega}_i^{\alpha\gamma} + 2G\dot{e}_i^{\alpha\beta} + K\dot{\epsilon}_i^{YY}\delta_i^{\alpha\beta} - \dot{\lambda}_i \left[9K\sin\psi\delta^{\alpha\beta} + \frac{G}{\sqrt{J_2}}s_i^{\alpha\beta} \right] \quad (17)$$

Fungsi kernel yang digunakan adalah *cubic spline*, dengan panjang smoothing line $h = 1.2 \Delta x$. Algoritma pencarian *neighboring particle* dan skema integrasi terhadap waktu mengikuti

penelitian [12] yaitu *Linked-Cell List* dan *Verlet Method*. Untuk menjaga kestabilan numerik selama simulasi, viskositas artifisial dan tegangan artifisial diterapkan, sesuai penelitian [6]. Penerapan parameter kestabilan numerik bertujuan untuk mengurangi osilasi non-fisis dan penetrasi antar partikel. Parameter kestabilan numerik dapat dilihat pada Tabel 2.

Interaksi partikel air-tanah diwakilkan oleh gaya seepage [12]. Menurut [12], persamaan momentum untuk fase tanah adalah sebagai berikut:

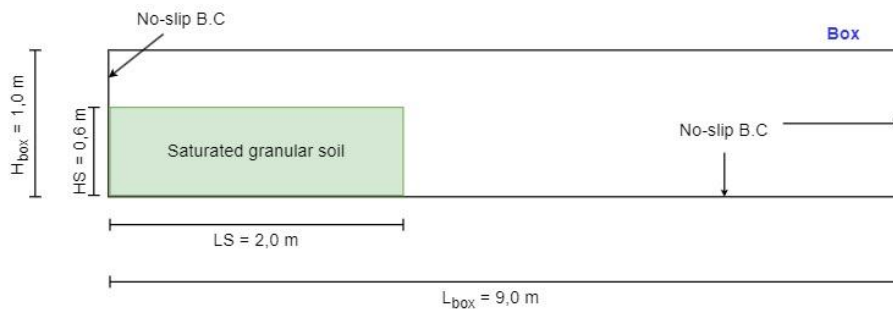
$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_j m_j \left(\frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_i^{s2}} + \frac{\sigma_j^{\prime\alpha\beta}}{\rho_j^{s2}} + R_{ij}^{\alpha\beta} f_{ij}^n + \Pi_{ij} \delta^{\alpha\beta} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + f_i^\alpha + \sum_a m_a \frac{f_{ia}^{seepage}}{\rho_i^s \rho_a} W_{ia} \quad (18)$$

Persamaan momentum untuk fase air:

$$\frac{dv_a^\alpha}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{p_a}{\rho_a^2} + \frac{p_b}{\rho_b^2} + \Pi_{ab} \right) \frac{\partial W_{ab}}{\partial x_i^\alpha} + \sum_a \frac{4m_b(\mu_a + \mu_b)v_{ab}^\alpha}{(\rho_a + \rho_b)^2} \left(\frac{1}{r_{ab}} \frac{\partial W_{ab}}{\partial r_{ab}} \right) + f_a^\alpha + \sum_i m_i \frac{f_{ia}^{seepage}}{\rho_i^s \rho_a} W_{ia} \quad (19)$$

PersianSPH memiliki keterbatasan dalam memodelkan tanah tersaturasi, yaitu hanya mampu memodelkan tanah jenuh dan tanah kering saja. Apabila partikel air berada di atas partikel tanah, partikel tanah dianggap menjadi jenuh dan densitasnya berubah menjadi densitas *submerged* atau efektif, ρ^s . PersianSPH tidak mengeluarkan output tegangan total, tetapi mengeluarkan output tegangan efektif [12].

Simulasi dilakukan dengan dua kondisi sampel yang berbeda, yaitu sampel jenuh dan sampel kering. Selain itu, pada sampel jenuh diberikan variasi sudut geser φ , yaitu $22^\circ, 28^\circ$, dan 35° untuk melihat pengaruh perubahan sudut geser terhadap deformasi. Model utama penelitian ini adalah sampel jenuh $\varphi=28^\circ$. Hasil simulasi akan digunakan untuk menganalisis pengaruh saturasi terhadap deformasi dan regangan antara sampel jenuh dengan sampel kering.



Gambar 2 Proses interpolasi SPH (Bui et al, 2010)

Tabel 1. Parameter sampel tanah granular

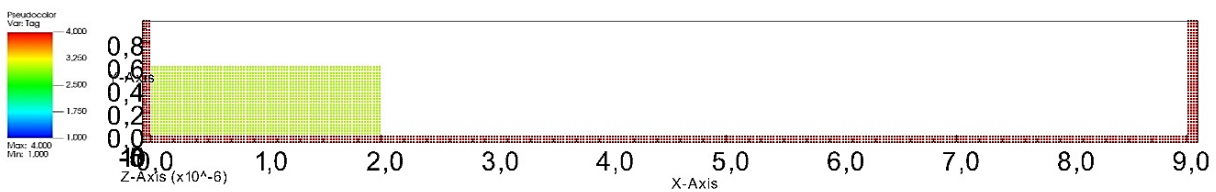
ρ_s (kg/cm ³)	φ (°)	c (kPa)	E (MPa)	ν	n	de (cm)
1800	22, 28, 35	0	10,0	0,3	0,53	2,0

Tabel 2. Parameter kestabilan numerik SPH

Viskositas artifisial		Tensile instability	
α	β	ϵ	n
0,1	0,1	0,5	2,55

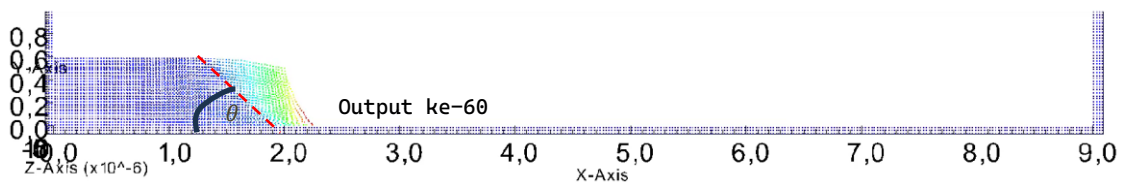
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi inisial model dapat dilihat pada Gambar 3. Warna pada model menandakan nomor tag atau identitas dari masing-masing jenis partikel. Nomor 1 berwarna biru menunjukkan partikel air (tidak terlihat pada gambar), nomor 3 berwarna hijau merupakan partikel tanah, dan nomor 4 berwarna merah merupakan solid boundary. Jumlah partikel dalam model SPH ini adalah 6602 partikel (termasuk partikel air dan boundary).



Gambar 3 Kondisi inisial model penelitian

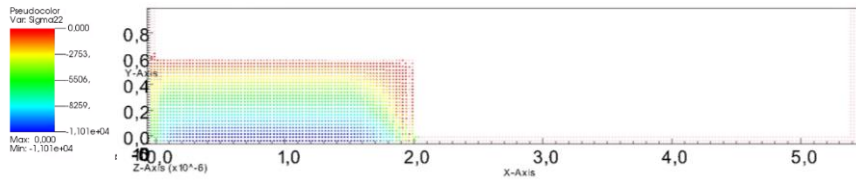
Ketika model disimulasikan, partikel menerima gaya gravitasi dan mengalami keruntuhan. *Slip line* atau garis keruntuhan kolom tanah dapat dilihat dari kontur kecepatan partikel seperti pada Gambar 4. Menurut teori Mohr-Coulomb, sudut keruntuhan kolom tanah sebesar $\theta = (45 + \frac{\phi'}{2})$ derajat terhadap sumbu horizontal, yaitu 59° untuk sudut geser 28° . Hasil simulasi menunjukkan $\theta = 47,48^\circ$. Perbedaan sudut keruntuhan ini juga ditemukan pada penelitian [16], dimana sudut keruntuhan lebih mendekati teori Roscoe, $\theta = (45 + \frac{\psi}{2})$, yaitu sekitar 45° .



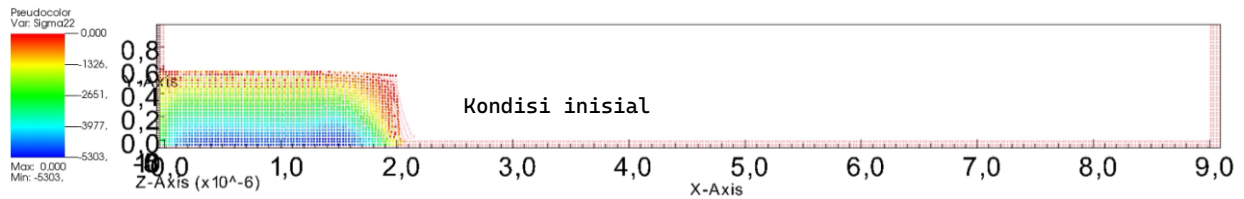
Gambar 4 Slip line pada model tanah jenuh $\phi=28^\circ$ ketika keruntuhan terjadi

Dari semua bagian kolom tanah, bagian tanah yang tidak memiliki perkuatan (pada $x=2,0$ m) memiliki tegangan efektif paling kecil, dapat dilihat pada Gambar 5. Tanda negative menunjukkan *compression* (PersianSPH tidak dapat memodelkan tanah unsaturated, dimana sering ditemukan *tensile stress*). Kontur tegangan efektif terlihat tidak simetris, dimana bagian terluar kolom memiliki tegangan efektif paling kecil. Pada kontur tersebut, warna merah menandakan tegangan efektif kecil atau mendekati nol. Semakin mengarah ke warna biru, tegangan efektif semakin bertambah. Ketika terjadi keruntuhan, partikel dengan tegangan efektif kecil (berwarna merah) mengalami perpindahan paling jauh. Partikel pada zona warna merah

memiliki tegangan geser 0 – 1,3 kPa. Terjadi penurunan tegangan efektif tanah pada kondisi jenuh, dari 11 kPa menjadi 5,3 kPa.

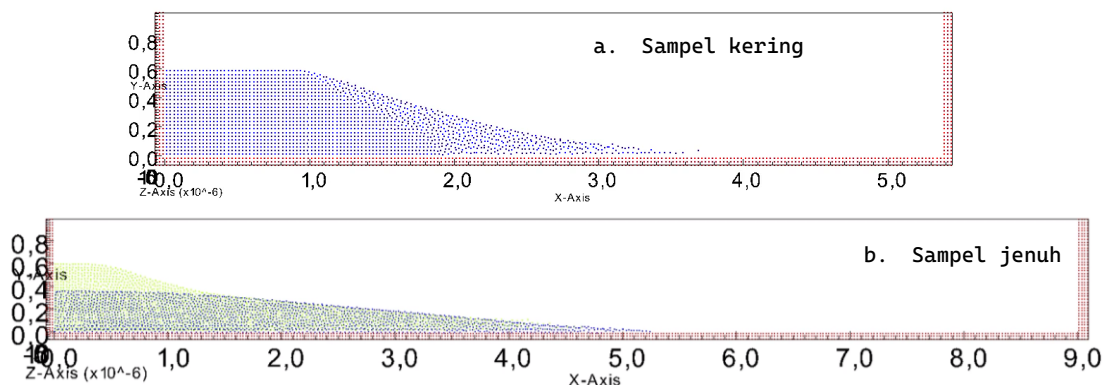


Gambar 5 Kontur tegangan efektif pada model tanah kering $\phi=28^\circ$ kondisi inisial



Gambar 6 Kontur tegangan efektif pada model tanah jenuh $\phi=28^\circ$ kondisi inisial

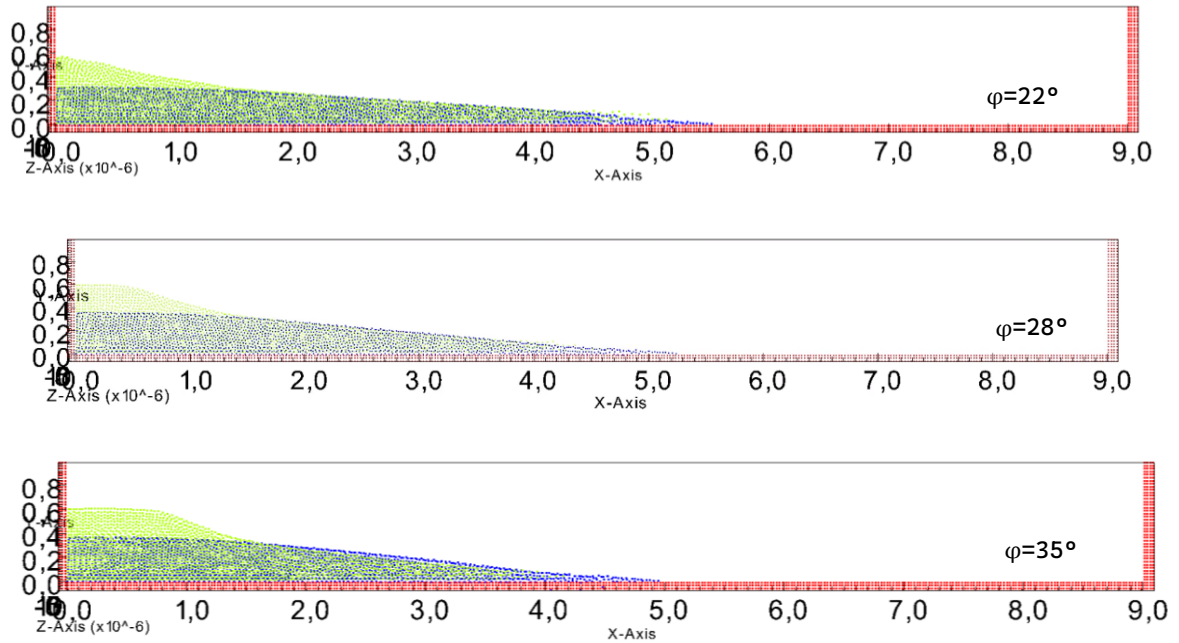
Perbedaan deformasi sampel jenuh dan sampel kering dapat dilihat pada Gambar 6. Morfologi akhir deposit kedua sampel terlihat berbeda. Sampel jenuh memiliki deformasi yang lebih besar, dapat dilihat dari jarak aliran dan settlement lebih besar. Sampel jenuh memiliki deformasi lateral hingga 4,5 m. Sementara itu, sampel kering berdeformasi hanya sampai 3,5 m. Keberadaan partikel air dalam model menimbulkan tekanan air pori pada tanah. Timbulnya tekanan air pori menurunkan tegangan efektif. Ketika tanah dalam keadaan jenuh, kuat gesernya menjadi menurun sehingga sampel jenuh memiliki deformasi lebih besar.



Gambar 7 Perbedaan deformasi sampel kering dan jenuh pada akhir simulasi

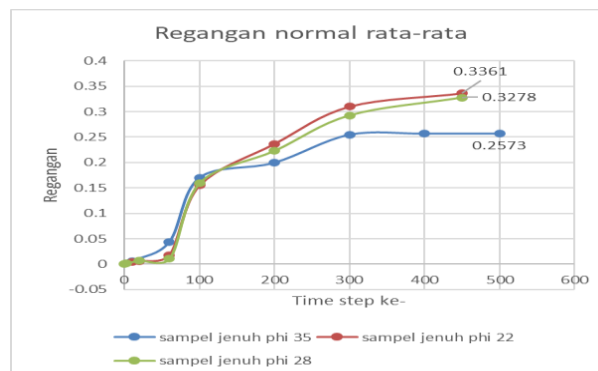
Perbedaan deformasi pada beberapa variasi sudut geser dapat dilihat pada Gambar 8. Semakin besar sudut geser, maka kapasitas aliran tanah juga semakin berkurang. Hal ini ditandai dari jarak aliran yang semakin kecil dan slope yang semakin besar. Deformasi lateral yang dialami oleh sampel $\phi = 22^\circ$ dan 35° secara berurutan adalah 5,0 m dan 4,0 m. Sampel $\phi=35^\circ$ memiliki slope paling besar dibandingkan sampel lainnya karena partikelnya mengalami settlement paling kecil. Penurunan deformasi ini sesuai dengan teori Coulomb. Kenaikan sudut geser menyebabkan

kuat geser tanah granular bertambah. Dibutuhkan gaya geser yang lebih besar untuk memobilisasi deposit granular. Pada teori Coulomb, parameter τ , σ' , dan ϕ saling terkait sesuai menurut persamaan $\tau = c + \sigma' \tan \phi$ [17]. Menurut [18], kenaikan sudut geser 11° mengakibatkan deposit akhir 30% lebih tinggi dan sebarannya 30% lebih dekat.



Gambar 7 Perbandingan deformasi akhir sampel jenuh, yaitu $\phi = 22^\circ$ (atas), 28° (tengah) dan 35° (bawah)

Gambar 8 menjelaskan perbedaan regangan normal antara variasi sudut geser. Semakin besar sudut geser, maka regangan yang diterima akan lebih kecil sesuai dengan deformasi yang diterima oleh masing-masing variasi sampel. Antara sampel jenuh, regangan paling kecil dirasakan oleh sampel dengan $\phi=35^\circ$, yaitu sebesar 25,73%. Sementara itu, regangan paling kecil dirasakan oleh sampel dengan $\phi=22^\circ$.



Gambar 8 Perbandingan regangan akhir sampel jenuh

Tabel 3. Ringkasan deformasi dan regangan pada penelitian

Jenis sampel	Sudut geser (°)	Deformasi lateral efektif (m)	Regangan normal rata-rata (%)	Sudut keruntuhan (°)
Sampel kering	28	3, 5	21,87	47,48
Sampel jenuh	35	4.0	25,73	45
	28	4.5	32,78	42,83
	22	5.0	33,6	42,7

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan. Kondisi saturasi pada kolom tanah granular mempengaruhi deformasi akhir, yaitu dengan menambah kapasitas aliran pada tanah. Sampel jenuh memiliki deformasi lateral yang lebih besar dan slope deposit akhir yang lebih landai. Hal ini disebabkan karena lebih banyak partikel yang mengalami displacement pada sampel jenuh

Kondisi saturasi juga mempengaruhi tegangan efektif tanah. Pada sampel jenuh, tegangan efektif tanah menurun karena timbulnya tekanan air pori, sehingga kuat geser tanah menurun. Bagian kolom tanah paling rentan terhadap *instability* adalah pada bagian tanah yang tidak memiliki kekuatan. Selain itu, kondisi saturasi sampel mempengaruhi regangan. Regangan merupakan fungsi dari deformasi. Dari Tabel 3, dapat dilihat regangan semakin besar jika kondisi tanah dalam keadaan jenuh.

Variasi sudut geser mempengaruhi deformasi dan regangan kolom tanah granular. Semakin besar sudut geser, kapasitas aliran kolom tanah semakin kecil. Yang ditandai dengan semakin kecilnya jarak aliran dan besarnya slope deposit tanah. Hal ini disebabkan karena makin besarnya kuat geser pada sudut geser yang lebih besar, sehingga dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk menggerakkan kolom tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Dosen Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia, khususnya pada bidang keilmuan Geoteknik dan Manajemen Sumber Daya Air, yang telah membimbing dan mengarahkan penelitian kami. Selain itu, kami juga mengucapkan terima kasih kepada para Laboran, staff Sekretariat Departemen, dan teman sejawat Program Magister Teknik Sipil yang selalu membantu dan bekerja sama dalam penyelesaian penulisan penelitian kami.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marcuson, W.F. (1978) 'Definition of terms related to liquefaction', *Journal of Geotechnical Engineering*, 104, pp. 1197–2000.

- [2] Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- [3] Badan Geologi Kementrian ESDM Indonesia (2019) *Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia*. Bandung: Kementrian ESDM.
- [4] Yuan, W. et al. (2023) ‘A dynamic large-deformation particle finite element method for geotechnical applications based on Abaqus’, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(7), pp. 1859–1871. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.09.014>.
- [5] Bui, Ha H. et al. (2008) ‘Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model’, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(12), pp. 1537–1570. Available at: <https://doi.org/10.1002/nag.688>.
- [6] Bui, Ha H et al. (2008) SPH-Based numerical simulations for large deformation of geomaterial considering soil-structure interaction. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/318275788>.
- [7] Bui, H.H. et al. (2010) Earthquake Induced Slope Failure Simulation by SPH. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/359936142>.
- [8] Bui, H.H. et al. (2011) ‘Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH)’, *Geotechnique*, 61(7), pp. 565–574. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.046>.
- [9] Bui, H.H. and Nguyen, G.D. (2021) ‘Smoothed particle hydrodynamics (SPH) and its applications in geomechanics: From solid fracture to granular behaviour and multiphase flows in porous media’, *Computers and Geotechnics*, 138. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104315>
- [10] Bui, H.H., Sako, K. and Fukagawa, R. (2007) ‘Numerical simulation of soil-water interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method’, *Journal of Terramechanics*, 44(5), pp. 339–346. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2007.10.003>.
- [11] Huang, Y. et al. (2013) ‘SPH-based numerical simulations of flow slides in municipal solid waste landfills’, *Waste Management and Research*, 31(3), pp. 256–264. Available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X12470205>.
- [12] Gholami Korzani, M. et al. (2018) ‘Smoothed Particle Hydrodynamics for investigating hydraulic and mechanical behaviour of an embankment under action of flooding and overburden loads’, *Computers and Geotechnics*, 94, pp. 31–45. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.08.014>
- [13] J. J. Monaghan (1994) ‘Simulating Free Surface Flows With SPH’, *Journal of Computational Physics*, 110, pp. 399–406.

- [14] Shao, S. and Lo, E.Y.M. (2003) 'Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface', *Advances in Water Resources*, 26(7), pp. 787–800. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(03\)00030-7](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(03)00030-7).
- [15] Monaghan, J.J. (2006) 'Smoothed particle hydrodynamic simulations of shear flow', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 365(1), pp. 199–213. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09704.x>.
- [16] Yang, E. et al. (2020) 'A scalable parallel computing SPH framework for predictions of geophysical granular flows', *Computers and Geotechnics*, 121. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103474>.
- [17] Nguyen, N.H.T., Bui, H.H. and Nguyen, G.D. (2020) 'Effects of material properties on the mobility of granular flow', *Granular Matter*, 22(3). Available at: <https://doi.org/10.1007/s10035-020-01024-y>.
- [18] Balmforth, N.J. and Kerswell, R.R. (2005) 'Granular collapse in two dimensions', *Journal of Fluid Mechanics*, 538, pp. 399–428. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0022112005005537>.
- [19] Cui, B. et al. (2023) 'SPH approach for stability analysis of soil slope with variable permeabilities', *Soils and Foundations*, 63(4). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101338>.
- [20] Dai, Z., Huang, Y. and Xu, Q. (2019) 'A hydraulic soil erosion model based on a weakly compressible smoothed particle hydrodynamics method', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(8), pp. 5853–5864. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01489-z>.
- [21] Hoang, T.N. et al. (2024) 'SPH simulation of earthquake-induced liquefaction and large deformation behaviour of granular materials using SANISAND constitutive model', *Computers and Geotechnics*, 174. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106617>.
- [22] Lu, Z., Jin, Z. and Kotronis, P. (2022) 'Numerical analysis of slope collapse using SPH and the SIMSAND critical state model', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(1), pp. 169–179. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.009>.
- [23] Sheikh, B., Qiu, T. and Ahmadipur, A. (2021) 'Comparison of SPH boundary approaches in simulating frictional soil–structure interaction', *Acta Geotechnica*, 16(8), pp. 2389–2408. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01063-y>.
- [24] Tsuji, K. et al. (2024) 'A reliable SPH (2) formulation for Darcy–Forchheimer–Brinkman equation using a density-based particle shifting in the ALE description', *Computational Particle Mechanics [Preprint]*. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40571-024-00856-2>.

- [25] Wang, Y. et al. (2020) ‘Simulation of mixed-mode fracture using SPH particles with an embedded fracture process zone’, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(10), pp. 1417–1445. Available at: <https://doi.org/10.1002/nag.3069>.
- [24] Zhan, L. et al. (2020) ‘A SPH framework for dynamic interaction between soil and rigid body system with hybrid contact method’, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 44(10), pp. 1446–1471. Available at: <https://doi.org/10.1002/nag.3070>.
- [25] Wang, S. et al. (2024) ‘Simhypo-sand: a simple hypoplastic model for granular materials and SPH implementation’, *Acta Geotechnica*, 19(7), pp. 4533–4555. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02350-8>.
- [26] Mu, D. et al. (2024) ‘A coupled hydro-thermo-mechanical model based on TLF-SPH for simulating crack propagation in fractured rock mass’, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 10(1). Available at: <https://doi.org/10.1007/s40948-024-00756-y>.
- [27] Xiong, H. et al. (2024) ‘Arching development above active trapdoor: insight from multi-scale analysis using FEM–SPH’, *Acta Geotechnica*, 19(5), pp. 2419–2443. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02148-0>.