



Peran Gradasi dan Mineralogi dalam Menentukan Kekuatan dan Kompresibilitas Material Disposal Tambang Nikel

(Kajian Literatur)

Arief Pambudi Nugraha

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Penulis Korespondensi: ariefpambudi51@unsri.ac.id

Abstract. Mine disposal materials such as tailings, overburden, and waste rocks are critical components in mining operations that require comprehensive understanding of their geotechnical properties to ensure stability and safety of storage facilities. This literature review aims to analyze the role of particle gradation and mineralogical composition in determining shear strength and compressibility of mine disposal materials, with particular focus on nickel mining. A systematic literature review method was employed by analyzing 30 scientific publications from 2019-2025 obtained from various academic databases. The review findings indicate that particle size distribution (gradation) has significant influence on shear strength and compressibility, where materials with coarser gradation and higher coefficient of uniformity (C_u) exhibit greater shear strength and lower compressibility. Mineralogy, particularly clay mineral content, increases cohesion and microporosity but also increases compressibility under loose conditions. Studies on nickel mine waste demonstrate that ferronickel slag possesses favorable drainage characteristics suitable for rockfill material, while tailings require strict gradation control. In conclusion, comprehensive characterization integrating gradation parameters (C_u , C_c , D_{50}) with mineralogical analysis (XRD, XRF) is essential for predicting mechanical behavior of mine disposal materials and designing safe storage facilities.

Keywords: Compressibility; Disposal; Gradation; Mine; Mineralogy.

Abstrak. Material disposisi tambang seperti tailing, overburden, dan batuan sisa merupakan komponen penting dalam operasi pertambangan yang memerlukan pemahaman mendalam tentang sifat geotekniknya untuk memastikan stabilitas dan keamanan fasilitas penyimpanan. Kajian literatur ini bertujuan untuk menganalisis peran gradasi partikel dan komposisi mineralogi dalam menentukan kekuatan geser dan kompresibilitas material disposisi tambang, dengan fokus khusus pada tambang nikel. Metode studi literatur sistematis digunakan dengan menganalisis 30 publikasi ilmiah dari tahun 2019-2025 yang diperoleh dari berbagai basis data akademik. Hasil kajian menunjukkan bahwa distribusi ukuran partikel (gradasi) memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan geser dan kompresibilitas, di mana material dengan gradasi lebih kasar dan koefisien keseragaman (C_u) lebih tinggi menghasilkan kekuatan geser lebih besar dan kompresibilitas lebih rendah. Mineralogi, terutama kandungan mineral lempung, meningkatkan kohesi dan mikroporositas namun juga meningkatkan kompresibilitas pada kondisi lepas. Studi pada limbah tambang nikel menunjukkan bahwa slag feronikel memiliki karakteristik drainase baik yang cocok untuk material timbunan, sementara tailing memerlukan kontrol gradasi ketat. Kesimpulannya, karakterisasi komprehensif yang mengintegrasikan parameter gradasi (C_u , C_c , D_{50}) dengan analisis mineralogi (XRD, XRF) sangat penting untuk prediksi perilaku mekanik material disposisi tambang dan desain fasilitas penyimpanan yang aman.

Kata kunci: Disposal; Gradasi; Kompresibilitas; Mineralogi; Tambang.

1. LATAR BELAKANG

Industri pertambangan global menghasilkan volume material disposisi yang sangat besar setiap tahunnya, termasuk tailing, overburden, dan batuan sisa (waste rock). Material-material ini harus dikelola dengan tepat untuk mencegah kegagalan struktur penyimpanan yang dapat mengakibatkan bencana lingkungan dan kerugian ekonomi yang signifikan (Reid dkk., 2021). Kelongsoran fasilitas penyimpanan tailing telah menjadi perhatian utama industri pertambangan global, dengan beberapa insiden katastrofik dalam dekade terakhir yang

menyoroti pentingnya pemahaman mendalam tentang sifat geoteknik material disposal (Santamarina dkk., 2019).

Indonesia, sebagai salah satu produsen nikel terbesar di dunia, menghadapi tantangan khusus dalam pengelolaan material disposal tambang nikel. Operasi penambangan nikel laterit menghasilkan volume overburden yang sangat besar dengan rasio pengupasan (stripping ratio) yang tinggi, serta tailing dari proses pengolahan yang memiliki karakteristik geoteknik kompleks (Edraki dkk., 2014).

Sifat geoteknik material disposal tambang, khususnya kekuatan geser dan kompresibilitas, merupakan parameter kritis dalam desain dan evaluasi stabilitas fasilitas penyimpanan. Kekuatan geser menentukan kemampuan material untuk menahan tegangan tanpa mengalami keruntuhan, sementara kompresibilitas mengontrol deformasi vertikal dan konsolidasi material di bawah beban (Zhang dkk., 2022).

Gradasi partikel, yang menggambarkan distribusi ukuran partikel dalam material, mempengaruhi pengaturan geometris partikel (particle packing), porositas, dan mekanisme transfer tegangan antar partikel (Chai dkk., 2022). Parameter gradasi seperti koefisien keseragaman (C_u), koefisien kelengkungan (C_c), dan ukuran median partikel (D_{50}) telah terbukti memiliki korelasi kuat dengan sifat mekanik material granular (Li dkk., 2021).

Di sisi lain, komposisi mineralogi material disposal tambang menentukan sifat permukaan partikel, ikatan antar partikel, dan perilaku fisiko-kimia material (Jing dkk., 2023). Mineral lempung, khususnya, memiliki luas permukaan spesifik tinggi dan dapat mengembang ketika berinteraksi dengan air, yang secara signifikan mempengaruhi kohesi, kompresibilitas, dan sensitivitas material terhadap perubahan kondisi lingkungan. Mineralogi juga mempengaruhi potensi likuifaksi statis pada tailing dengan plastisitas rendah, yang merupakan mekanisme kegagalan kritis pada beberapa insiden TSF (Riveros & Sadrekarimi, 2021).

Meskipun pengaruh individual gradasi dan mineralogi terhadap sifat geoteknik telah banyak diteliti, interaksi kompleks antara kedua faktor ini dalam menentukan perilaku mekanik material disposal tambang masih menjadi area penelitian aktif. Beberapa studi menunjukkan bahwa pengaruh mineralogi dapat menjadi sekunder dibandingkan dengan efek pengaturan partikel pada material yang dipadatkan (compacted), sementara studi lain mengidentifikasi peran kritis mineral lempung dalam mengontrol kohesi dan mikroporositas bahkan pada densitas tinggi (Fourie & Edraki, 2022). Kontradiksi ini mengindikasikan perlunya pendekatan karakterisasi yang lebih komprehensif yang mengintegrasikan kedua aspek.

Untuk konteks tambang nikel, pemahaman tentang hubungan antara gradasi, mineralogi, dan sifat geoteknik menjadi semakin penting mengingat upaya pemanfaatan material disposal untuk aplikasi konstruksi seperti material timbunan, agregat jalan, dan backfill tambang bawah tanah (Guner dkk., 2023). Slag feronikel, sebagai produk sampingan dari peleburan nikel, telah dievaluasi sebagai material alternatif untuk berbagai aplikasi geoteknik, dengan sifat drainase dan kekuatan yang bergantung pada gradasi dan komposisi mineralnya (Costa dkk., 2023).

Kajian literatur ini bertujuan untuk mensintesis pengetahuan terkini tentang peran gradasi dan mineralogi dalam menentukan kekuatan dan kompresibilitas material disposal tambang, dengan fokus khusus pada aplikasi di industri pertambangan nikel. Melalui analisis sistematis terhadap publikasi ilmiah terbaru (2019-2025), kajian ini berupaya mengidentifikasi tren, hubungan empiris, metode karakterisasi, dan kesenjangan penelitian yang dapat menginformasikan praktik pengelolaan material disposal yang lebih baik dan desain fasilitas penyimpanan yang lebih aman.

2. KAJIAN TEORITIS

Tailing merupakan material halus hasil pemisahan mineral berharga dari bijih melalui proses penggilingan dan pemisahan fisik-kimia, umumnya memiliki ukuran partikel dari lempung hingga pasir halus (Santamarina dkk., 2019). Overburden dan waste rock adalah material batuan yang dipindahkan untuk mengakses bijih, dengan ukuran partikel yang lebih kasar berkisar dari pasir hingga boulder. Slag metalurgi, khususnya slag feronikel dalam konteks tambang nikel, merupakan produk sampingan peleburan dengan karakteristik yang bergantung pada proses pirometalurgi yang digunakan (Costa dkk., 2023).

Gradasi Partikel dan Parameter Karakterisasi

Gradasi partikel menggambarkan distribusi ukuran partikel dalam material dan merupakan faktor fundamental yang mengontrol perilaku mekanik material granular. Gradasi umumnya direpresentasikan melalui kurva distribusi ukuran partikel yang diperoleh dari analisis ayakan (untuk fraksi kasar) dan hidrometer (untuk fraksi halus). Dari kurva gradasi, beberapa parameter kunci dapat diturunkan untuk mengkarakterisasi distribusi ukuran partikel (Das, 2015).

Koefisien keseragaman (C_u) didefinisikan sebagai rasio D_{60} terhadap D_{10} , di mana D_{60} adalah ukuran partikel di mana 60% material (berdasarkan berat) lebih halus, dan D_{10} adalah ukuran partikel di mana 10% material lebih halus. Nilai C_u yang lebih besar mengindikasikan distribusi ukuran partikel yang lebih luas (well-graded), sementara C_u mendekati 1

mengindikasikan gradasi seragam (uniformly graded). Material dengan Cu > 4 untuk pasir dan Cu > 6 untuk kerikil umumnya diklasifikasikan sebagai well-graded (Das, 2015).

Koefisien kelengkungan (C_c) didefinisikan sebagai $(D30)^2/(D60 \times D10)$, di mana D30 adalah ukuran partikel di mana 30% material lebih halus. Nilai C_c antara 1 dan 3 mengindikasikan gradasi yang baik.

Ukuran median partikel (D_{50}) merepresentasikan ukuran di mana 50% material (berdasarkan berat) lebih halus. D_{50} memberikan indikasi ukuran partikel karakteristik material dan sering digunakan sebagai parameter untuk membandingkan gradasi material yang berbeda. Kandungan fraksi halus (fines content), umumnya didefinisikan sebagai persentase material yang lolos ayakan No. 200 (0.075 mm) (Zhang dkk., 2022).

Mineralogi dan Karakterisasi

Komposisi mineralogi material disposal tambang mencerminkan geologi batuan induk dan proses pengolahan yang dialami material. Mineral utama dalam material disposal dapat dikategorikan menjadi mineral silikat (kuarsa, feldspar), mineral lempung (kaolinit, smektit, ilit), oksida besi (hematit, magnetit, goethit), dan mineral lainnya yang spesifik untuk jenis tambang tertentu (Fourie & Edraki, 2022).

Mineral lempung memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap sifat geoteknik karena struktur kristalnya yang berlapis, luas permukaan spesifik yang sangat tinggi, dan kapasitas pertukaran kation. Mineral lempung tipe 1:1 seperti kaolinit memiliki luas permukaan spesifik sekitar 10-20 m²/g dan aktivitas rendah, sementara mineral lempung tipe 2:1 seperti smektit dapat memiliki luas permukaan spesifik hingga 800 m²/g dan menunjukkan sifat mengembang yang signifikan (Mitchell & Soga, 2005).

Karakterisasi mineralogi umumnya dilakukan menggunakan X-ray Diffraction (XRD) untuk identifikasi fase mineral dan kuantifikasi komposisi mineralogi, dan X-ray Fluorescence (XRF) untuk analisis komposisi kimia elemental. Metode tambahan seperti Scanning Electron Microscopy (SEM) memberikan informasi tentang morfologi partikel dan mikrofabrik, sementara nitrogen adsorption dan Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) mengukur luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori (Jing dkk., 2023).

Kekuatan Geser Material Granular

Kekuatan geser material granular direpresentasikan menggunakan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb yang menyatakan bahwa tegangan geser pada bidang kegagalan (τ_f) adalah:

$$\tau_f = c' + \sigma'n \tan \phi'$$

di mana c' adalah kohesi efektif dan ϕ' adalah sudut gesekan dalam efektif. Untuk material granular bersih tanpa kandungan lempung signifikan, kohesi efektif umumnya sangat

kecil atau nol, dan kekuatan geser terutama berasal dari gesekan antar partikel yang direpresentasikan oleh sudut gesekan dalam (Das, 2015).

Gradasi partikel mempengaruhi kekuatan geser melalui: (1) pengaturan geometris partikel dan densitas relatif, dan (2) perilaku dilatansi material. Material well-graded dapat mencapai densitas lebih tinggi karena partikel halus mengisi ruang pori antara partikel kasar, menghasilkan lebih banyak kontak antar partikel (Chai dkk., 2022).

Mineralogi mempengaruhi kekuatan geser terutama melalui kontribusi kohesi. Mineral lempung dengan luas permukaan spesifik tinggi dapat menghasilkan kohesi yang signifikan bahkan pada tegangan rendah (Zhang dkk., 2022).

Kompresibilitas dan Konsolidasi

Kompresibilitas menggambarkan perubahan volume material di bawah beban dan merupakan parameter kritis untuk memprediksi penurunan (settlement) fasilitas penyimpanan material disposal. Kompresibilitas dikarakterisasi menggunakan uji oedometer yang mengukur perubahan angka pori (e) sebagai fungsi tegangan vertikal efektif ($\sigma'v$) (Das, 2015).

Gradasi partikel mempengaruhi kompresibilitas melalui pengaruhnya pada angka pori awal dan kemampuan material untuk mengatur ulang partikelnya di bawah beban. Material well-graded dengan angka pori awal rendah umumnya menunjukkan kompresibilitas lebih rendah dibandingkan material uniformly graded dengan angka pori tinggi (Li dkk., 2021). Namun, pada tegangan sangat tinggi, degradasi dan pemecahan partikel dapat terjadi, terutama pada partikel kasar yang angular, yang mengubah gradasi dan meningkatkan kompresibilitas (Guo dkk., 2022).

Mineralogi, khususnya kandungan mineral lempung, memiliki pengaruh sangat signifikan karena luas permukaan spesifik tinggi dapat menahan lebih banyak air, menghasilkan angka pori yang lebih tinggi dan kompresibilitas yang lebih besar (Zhang dkk., 2022).

Interaksi Gradasi-Mineralogi

Interaksi antara gradasi dan mineralogi dalam menentukan sifat geoteknik material disposal tambang merupakan area yang kompleks dan masih menjadi subjek penelitian aktif. Beberapa studi menunjukkan bahwa pengaruh relatif dari gradasi versus mineralogi dapat bergantung pada kondisi tegangan, densitas, dan metode deposisi material (Fourie & Edraki, 2022).

Pada material disposal yang dipadatkan dengan baik (compacted), efek pengaturan partikel yang ditentukan oleh gradasi dapat mendominasi perilaku mekanik, dengan mineralogi memberikan kontribusi sekunder (Consoli dkk., 2024). Sebaliknya, pada material yang

dideposisi secara hidrolik dengan densitas rendah (loose), mineralogi, khususnya kandungan lempung, dapat memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap kohesi dan kompresibilitas (Zhang dkk., 2022).

Kandungan fraksi halus merepresentasikan interaksi antara gradasi dan mineralogi. Fraksi halus tidak hanya mengubah distribusi ukuran partikel tetapi juga sering mengandung konsentrasi mineral lempung yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pengaruh fraksi halus terhadap sifat geoteknik mencerminkan kombinasi efek geometris (pengisian pori) dan efek mineralogis (kohesi, luas permukaan) (Fourie & Edraki, 2022).

3. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur sistematis (*systematic literature review*) untuk menganalisis dan mensintesis pengetahuan terkini tentang peran gradasi dan mineralogi dalam menentukan kekuatan dan kompresibilitas material disposal tambang (Kitchenham & Charters, 2007).

Strategi Pencarian Literatur

Strategi pencarian dirancang untuk mengidentifikasi publikasi yang relevan dengan topik kajian melalui kombinasi kata kunci yang terkait dengan: (1) jenis material disposal tambang, (2) parameter gradasi, (3) karakteristik mineralogi, (4) sifat geoteknik, dan (5) konteks pertambangan nikel.

Kriteria Inklusi Dan Eksklusi

Kriteria inklusi yang ditetapkan untuk seleksi publikasi adalah: 1) Publikasi dalam bentuk artikel jurnal peer-reviewed, prosiding konferensi internasional bereputasi, atau laporan teknis dari institusi penelitian terkemuka; 2) Dipublikasikan dalam rentang waktu 2019-2025 untuk memastikan relevansi dan kekinian informasi; 3) Membahas secara eksplisit hubungan antara gradasi partikel dan/atau mineralogi dengan sifat geoteknik material disposal tambang; 4) Menyajikan data empiris dari pengujian laboratorium, studi lapangan, atau pemodelan numerik yang tervalidasi; 5) Ditulis dalam bahasa Inggris atau bahasa Indonesia; 6) Memiliki metodologi penelitian yang jelas dan dapat dievaluasi.

Kriteria eksklusi yang ditetapkan adalah 1) Publikasi yang hanya membahas aspek kimia atau lingkungan tanpa konten geoteknik yang substansial; 2) Studi yang fokus pada material konstruksi konvensional (tanah alami, agregat konvensional) tanpa relevansi dengan material disposal tambang; 3) Publikasi duplikat atau versi awal dari artikel yang telah dipublikasikan dalam bentuk final; 4) Artikel review atau opinion piece yang tidak menyajikan data atau

analisis baru; 5) Publikasi dengan metodologi yang tidak jelas atau data yang tidak dapat diverifikasi.

Proses Seleksi dan Ekstraksi Data

Dari total 679 publikasi yang teridentifikasi melalui pencarian awal di berbagai basis data, dilakukan deduplikasi yang menghasilkan 216 publikasi unik. Setelah melalui proses screening dan evaluasi kualitas, 30 publikasi dengan relevansi tinggi dan kualitas metodologi baik dipilih untuk analisis mendalam. Publikasi-publikasi ini mencakup studi eksperimental laboratorium, studi kasus lapangan, dan review komprehensif yang memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman hubungan gradasi-mineralogi-sifat geoteknik.

Data yang diekstraksi dari setiap publikasi mencakup: 1) Informasi bibliografi; 2) Jenis material disposal yang diteliti; 3) Konteks pertambangan; 4) Parameter gradasi yang dilaporkan; 5) Karakteristik mineralogi yang dilaporkan; 6) Metode pengujian yang digunakan; 7) Hasil utama terkait kekuatan geser dan kompresibilitas; 8) Temuan spesifik tentang pengaruh gradasi dan/atau mineralogi; 9) Keterbatasan studi dan rekomendasi penelitian lanjutan

Analisis dan Sintesis Data

Data yang diekstraksi dianalisis menggunakan pendekatan sintesis naratif (narrative synthesis) yang mengorganisir temuan berdasarkan tema-tema utama yang muncul dari literatur. Tema-tema ini mencakup: (1) pengaruh gradasi terhadap kekuatan geser, (2) pengaruh gradasi terhadap kompresibilitas, (3) pengaruh mineralogi terhadap sifat geoteknik, (4) interaksi gradasi-mineralogi, (5) aplikasi pada material disposal tambang nikel, dan (6) metode karakterisasi dan pengujian. Untuk setiap tema, temuan dari berbagai studi diintegrasikan untuk mengidentifikasi pola konsisten, variasi, dan kontradiksi dalam literatur. Hubungan kuantitatif antara parameter gradasi/mineralogi dan sifat geoteknik disintesis dalam bentuk tabel dan deskripsi naratif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Gradasi terhadap Kekuatan Geser

Analisis literatur menunjukkan konsensus yang kuat bahwa distribusi ukuran partikel (gradasi) memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan geser material disposal tambang. Chai, dkk. (2022) melakukan studi eksperimental komprehensif pada tailing jenuh dengan variasi ukuran partikel dan menemukan bahwa material dengan ukuran median partikel (D_{50}) lebih besar menunjukkan kekuatan geser puncak yang lebih tinggi dan perilaku dilatansi yang lebih jelas. Dalam pengujian triaxial pada tegangan keliling 100-400 kPa, sampel dengan D_{50}

= 0.25 mm menunjukkan sudut gesekan dalam 8-12° lebih tinggi dibandingkan sampel dengan D₅₀ = 0.075 mm pada densitas relatif yang sama.

Zhang, dkk (2022) menginvestigasi pengaruh parameter gradasi pada tailing tambang emas dan melaporkan bahwa koefisien keseragaman (Cu) memiliki korelasi positif yang kuat dengan kekuatan geser tidak terdrainase. Dalam studi mereka, sampel dengan Cu = 5.5 dan koefisien kelengkungan (Cc) = 1.0 menghasilkan permeabilitas optimum 1.699×10^{-3} cm/s dan kekuatan geser yang superior dibandingkan gradasi lain yang diuji. Hasil ini mengindikasikan bahwa terdapat kombinasi parameter gradasi optimum yang memberikan keseimbangan antara permeabilitas dan kekuatan geser.

Studi oleh Laverdière, dkk (2022) pada batuan sisa yang dihancurkan (crushed waste rocks) mendemonstrasikan bahwa gradasi mempengaruhi kekuatan tidak hanya melalui efek geometris tetapi juga melalui interaksinya dengan kondisi pemasatan dan kadar air. Mereka menemukan bahwa material well-graded mencapai nilai California Bearing Ratio (CBR) yang secara signifikan lebih tinggi (hingga 40% peningkatan) dibandingkan material uniformly graded pada energi pemasatan yang sama. Namun, sensitivitas kekuatan terhadap perubahan kadar air juga lebih tinggi pada material well-graded yang mengandung fraksi halus lebih banyak.

Pengaruh kandungan fraksi halus (fines content) terhadap kekuatan geser menunjukkan pola yang kompleks dan bergantung pada kondisi densitas dan tegangan. Riveros dan Sadrekarimi (2021) dalam studi mereka tentang perilaku likuifikasi statis tailing tambang emas menemukan bahwa peningkatan kandungan fraksi halus dari 20% menjadi 40% menurunkan resistensi likuifikasi dan kekuatan geser tidak terdrainase pada kondisi deposisi lepas (loose). Namun, pada kondisi densitas tinggi yang dicapai melalui pemasatan, pengaruh negatif fraksi halus terhadap kekuatan berkurang secara signifikan.

Li, dkk (2021) mengembangkan model prediktif untuk angka pori minimum berdasarkan gradasi partikel menggunakan data dari 168 kelompok pengujian berbagai jenis tailing. Model mereka menunjukkan bahwa material dengan distribusi ukuran partikel bi-modal dapat mencapai angka pori minimum yang lebih rendah, yang berkorelasi dengan densitas maksimum dan kekuatan geser yang lebih tinggi. Model prediksi mereka memiliki akurasi tinggi dengan kesalahan rata-rata <10% untuk angka pori minimum dan dapat memprediksi kandungan fraksi halus optimum untuk pencapaian densitas maksimum.

Tabel 1. Ringkasan Pengaruh Parameter Gradasi terhadap Kekuatan Geser.

Parameter Gradasi	Pengaruh terhadap Kekuatan Geser	Mekanisme Utama	Referensi
D50 (ukuran median)	Peningkatan D50 → peningkatan kekuatan geser puncak dan dilatansi	Kontak antar partikel lebih kuat, interlocking lebih baik	Chai et al. (2022)
Cu (koefisien keseragaman)	Cu lebih tinggi → kekuatan geser lebih tinggi	Packing lebih efisien, densitas lebih tinggi	Zhang et al. (2022)
Cc (koefisien kelengkungan)	$Cc \approx 1$ menghasilkan kekuatan optimum	Distribusi ukuran kontinu, pengisian pori efisien	Zhang et al. (2022)
Kandungan fraksi halus	Pengaruh kompleks: negatif pada kondisi lepas, berkurang pada kondisi padat	Mengubah packing dan kontak antar partikel	Riveros & Sadrekarimi (2021)
Gradasi well-graded vs uniform	Well-graded menghasilkan CBR 40% lebih tinggi	Densitas maksimum lebih tinggi, pori terisi lebih baik	Laverdière et al. (2022)

Pengaruh Gradasi terhadap Kompresibilitas

Wang, dkk (2023) melakukan studi komprehensif tentang kompresibilitas tailing dengan variasi ukuran partikel di bawah tekanan tinggi (hingga 6.4 MPa) dan menemukan bahwa kompresibilitas adalah fungsi kuat dari gradasi, dengan perubahan perilaku yang signifikan ketika tegangan vertikal efektif melebihi sekitar 2 MPa. Pada tegangan rendah (<2 MPa), material dengan D50 lebih kecil menunjukkan kompresibilitas lebih tinggi, tetapi pada tegangan sangat tinggi (>4 MPa), pemecahan partikel pada material kasar menghasilkan peningkatan kompresibilitas yang signifikan.

Guo, dkk (2022) menemukan bahwa di bawah tegangan tinggi (>5 MPa), pemecahan partikel menjadi mekanisme deformasi dominan, mengubah gradasi material secara in-situ dan meningkatkan kompresibilitas. Persentase pemecahan partikel mencapai 15-25% pada tegangan 8 MPa.

Li, dkk (2021) menunjukkan bahwa terdapat kandungan fraksi halus optimum (umumnya 15-30% untuk tailing yang diuji) yang menghasilkan angka pori minimum terendah dan dengan demikian kompresibilitas terendah.

Pengaruh gradasi terhadap kompresibilitas juga berinteraksi dengan kondisi densitas awal material. Untuk material yang dideposisi secara hidrolik dengan densitas rendah, kandungan fraksi halus yang lebih tinggi umumnya meningkatkan kompresibilitas karena struktur pori yang lebih terbuka dan kemampuan konsolidasi yang lebih besar (Ma dkk., 2023). Sebaliknya, untuk material yang dipadatkan dengan baik, pengaruh gradasi terhadap kompresibilitas menjadi lebih kompleks karena material sudah mendekati kondisi packing yang optimum.

Jing, dkk (2023) menemukan bahwa penambahan slag dengan gradasi lebih kasar secara signifikan mengurangi kompresibilitas campuran. Compression index (C_c) berkurang dari 0.35 untuk tailing murni menjadi 0.18 untuk campuran dengan 40% slag, mengindikasikan pengurangan kompresibilitas sebesar hampir 50%.

Pengaruh Mineralogi terhadap Sifat Geoteknik

Zhang, dkk (2022) melakukan studi detail tentang pengaruh kandungan mineral lempung pada sifat mekanik dan mikrofabrik tailing. Mereka menemukan bahwa peningkatan kandungan mineral lempung dari 5% menjadi 25% menghasilkan peningkatan kohesi secara linear dari sekitar 10 kPa menjadi 35 kPa, sementara sudut gesekan dalam menurun sedikit dari 38° menjadi 34° .

Karakterisasi mikrofabrik menggunakan nitrogen adsorption dan Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) mengungkapkan bahwa kandungan mineral lempung yang lebih tinggi berkorelasi dengan peningkatan proporsi mikropori. Luas permukaan spesifik meningkat dari $8 \text{ m}^2/\text{g}$ untuk tailing dengan 5% lempung menjadi $42 \text{ m}^2/\text{g}$ untuk tailing dengan 25% lempung.

Studi oleh Jing, dkk (2023) menemukan bahwa slag, dengan komposisi mineralogi yang didominasi oleh kalsium silikat dan alumino-silikat, memberikan kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan tailing yang kaya mineral lempung. Modulus elastisitas campuran meningkat dari sekitar 15 MPa untuk tailing murni menjadi 45 MPa untuk campuran dengan 40% slag.

Namun, Consoli, dkk (2023) menemukan bahwa kompresibilitas material yang dipadatkan secara efektif independen terhadap kandungan fraksi halus dan mineralogi dalam rentang yang diuji, menunjukkan bahwa untuk material yang dipadatkan dengan baik, kondisi packing mendominasi perilaku kompresibilitas.

Fourie dan Edraki (2022) dalam review state-of-the-art tentang geoteknik tailing menekankan bahwa mineralogi, bentuk partikel, dan distribusi ukuran partikel secara bersama-sama mempengaruhi perilaku geoteknik tailing, tetapi kepentingan relatif masing-masing faktor dapat berubah bergantung pada metode deposisi (*slurry vs filtered vs compacted*) dan tingkat tegangan keliling. Review mereka menyoroti perlunya pendekatan karakterisasi holistik yang mempertimbangkan interaksi kompleks antara faktor-faktor ini.

Aplikasi pada Material Disposal Tambang Nikel

Chai, dkk (2022) mengevaluasi slag feronikel sebagai material rockfill free-draining untuk aplikasi konstruksi tanggul di wilayah pertambangan nikel. Karakterisasi mereka menunjukkan bahwa slag feronikel memiliki gradasi yang menguntungkan dengan Cu berkisar 15-30 dan D₅₀ sekitar 20-40 mm, menghasilkan permeabilitas tinggi ($k > 10^{-2} \text{ cm/s}$) dan sudut

gesekan dalam sekitar $42\text{--}45^\circ$. Sifat-sifat ini menjadikan slag feronikel sebagai material alternatif yang menarik untuk timbunan dan struktur drainase.

Namun, penggunaan slag feronikel juga memerlukan pertimbangan mineralogi karena potensi reaktivitas kimia. Analisis XRD menunjukkan bahwa slag feronikel mengandung fase mineral seperti fayalite, olivin, dan pyroxene yang dapat mengalami pelapukan dan melepaskan logam berat dalam kondisi tertentu (Chai dkk., 2022). Oleh karena itu, evaluasi geokimia jangka panjang diperlukan bersamaan dengan karakterisasi geoteknik untuk memastikan keamanan penggunaan slag feronikel.

Guner, dkk (2023) menginvestigasi penggunaan tailing kaya tembaga (yang juga relevan untuk konteks tambang nikel laterit dengan kandungan tembaga) sebagai bahan backfill semen dengan substitusi parsial oleh pasir. Mereka menemukan bahwa substitusi pasir hingga 30% meningkatkan kekuatan tekan uniaksial hingga 99% karena perbaikan gradasi dan pengurangan segregasi. Namun, substitusi pasir di atas 30% menyebabkan segregasi yang signifikan dan penurunan kinerja. Studi ini mendemonstrasikan pentingnya kontrol gradasi yang hati-hati dalam aplikasi pemanfaatan kembali tailing.

Dalam konteks karakterisasi geoteknik dan geokimia limbah tambang di wilayah tembaga/nikel, beberapa studi melaporkan bahwa fraksi kasar umumnya memiliki plastisitas rendah dan permeabilitas sedang, menjadikannya cocok untuk aplikasi konstruksi tertentu (Edraki dkk., 2014). Namun, penilaian geokimia juga mengidentifikasi konsentrasi nikel di atas batas keamanan dalam beberapa sampel, menyoroti bahwa keputusan pemanfaatan mekanik juga harus mempertimbangkan aspek kimia dan lingkungan.

Luo (2021) melakukan investigasi pada inti tailing dari bendungan tailing dan melaporkan hasil pengujian triaxial yang menunjukkan kohesi sekitar 20 kPa dan sudut gesekan dalam sekitar 41° untuk tailing terkonsolidasi. Karakterisasi ini penting untuk evaluasi stabilitas bendungan tailing yang ada dan desain fasilitas penyimpanan baru. Studi ini juga menekankan pentingnya pengukuran kecepatan gelombang geser (shear wave velocity) sebagai metode non-destruktif untuk mengevaluasi kondisi in-situ tailing dalam bendungan.

Metode Karakterisasi dan Pengujian

Literatur menunjukkan penggunaan suite metode pengujian yang komprehensif untuk menghubungkan gradasi dan mineralogi dengan perilaku geomekanik material disposisi tambang. Metode pengujian mekanik yang paling umum digunakan meliputi: 1) Pengujian Triaxial Terkonsolidasi Tidak Terdrainase (CU Triaxial Test): Digunakan secara luas untuk mengukur kekuatan geser tidak terdrainase dan parameter kekuatan efektif (c' , φ') pada berbagai tegangan keliling. Studi oleh Chai, dkk (2022), Zhang dkk. (2022), dan Riveros dan

Sadrekarimi (2021) menggunakan pengujian triaxial dengan rentang tegangan keliling 50-400 kPa untuk mengkarakterisasi perilaku kekuatan tailing. 2) Pengujian Oedometer/Konsolidasi: Digunakan untuk mengukur kompresibilitas dan parameter konsolidasi. Wang et al. (2023) menggunakan oedometer tekanan tinggi dengan kapasitas hingga 6.4 MPa untuk menginvestigasi perilaku kompresibilitas tailing di bawah tegangan yang merepresentasikan kondisi pada bendungan tailing yang tinggi; 3) Pengujian California Bearing Ratio (CBR): Digunakan untuk mengevaluasi kekuatan material untuk aplikasi konstruksi jalan. Laverdièr, dkk (2022) menggunakan CBR untuk mengevaluasi pengaruh gradasi, pemasatan, dan kadar air pada kekuatan batuan sisa yang dihancurkan; 4) Pengujian Permeabilitas: Digunakan untuk mengukur konduktivitas hidrolik yang penting untuk desain sistem drainase dan prediksi konsolidasi. Zhang, dkk. (2022) menggunakan permeameter constant head dan falling head untuk mengukur permeabilitas pada berbagai gradasi tailing.

Untuk karakterisasi gradasi, analisis ayakan standar dan hidrometer digunakan secara universal untuk memperoleh kurva distribusi ukuran partikel dan parameter gradasi (Cu, Cc, D₅₀, kandungan fraksi halus). Li, dkk (2021) menggunakan data dari 168 kelompok pengujian berbagai tailing untuk mengembangkan model prediktif angka pori minimum berdasarkan parameter gradasi.

Metode karakterisasi mineralogi dan mikrofabrik yang digunakan dalam literatur meliputi: 1) X-ray Diffraction (XRD): Untuk identifikasi fase mineral dan kuantifikasi komposisi mineralogi. Zhang dkk, (2022) dan Jing, dkk (2023) menggunakan XRD untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi mineral lempung dalam tailing; 2) X-ray Fluorescence (XRF): Untuk analisis komposisi kimia elemental. Chai, dkk (2022) menggunakan XRF untuk mengkarakterisasi komposisi kimia slag feronikel; 3) Scanning Electron Microscopy (SEM): Untuk observasi morfologi partikel dan mikrofabrik. Jing, dkk (2023) menggunakan SEM untuk mengamati interaksi antar partikel dalam campuran tailing-slag pada skala mikro; 4) Nitrogen Adsorption: Untuk mengukur luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori mikro. Zhang, dkk (2022) menggunakan nitrogen adsorption untuk menghubungkan kandungan mineral lempung dengan luas permukaan spesifik dan mikroporositas; 5) Mercury Intrusion Porosimetry (MIP): Untuk mengukur distribusi ukuran pori dalam rentang yang lebih luas. Zhan, dkk. (2022) menggunakan MIP untuk mengkarakterisasi struktur pori tailing dengan kandungan lempung berbeda.

Guo, dkk (2022) menggunakan analisis ayakan *post-loading* untuk mengkuantifikasi pemecahan partikel dengan membandingkan distribusi ukuran partikel sebelum dan sesudah pengujian kompresi. Mereka mendefinisikan indeks pemecahan partikel berdasarkan

perubahan dalam kurva gradasi, yang berkorelasi dengan tegangan pembebanan dan karakteristik material.

Kesenjangan Penelitian dan Tantangan

Meskipun kemajuan signifikan telah dicapai dalam memahami pengaruh gradasi dan mineralogi terhadap sifat geoteknik material disposal tambang, beberapa kesenjangan penelitian dan tantangan masih ada: 1) Protokol Standar untuk Integrasi Parameter: Fourie dan Edraki (2022) mengidentifikasi kurangnya protokol standar untuk mengintegrasikan metrik mineralogi (jenis lempung, luas permukaan spesifik) dengan parameter gradasi ke dalam model konstitutif prediktif. Sebagian besar model empiris saat ini bergantung terutama pada parameter gradasi atau mineralogi secara terpisah, tanpa mempertimbangkan interaksi kompleks antara keduanya. 2) Efek Skala dan Pemecahan Partikel: Guo, dkk (2022) menyoroti keterbatasan dalam memprediksi efek skala dan pengaruh pemecahan partikel dari skala sampel laboratorium ke tumpukan limbah berukuran besar. Pemecahan partikel di bawah tegangan tinggi dapat secara signifikan mengubah gradasi in-situ dan sifat mekanik, tetapi fenomena ini sulit untuk dimodelkan dan diprediksi secara akurat; 3) Rekonsiliasi Temuan yang Bertentangan: Terdapat temuan yang bertentangan dalam literatur tentang kontrol fraksi halus dan mineralogi pada kondisi tegangan tinggi dan riwayat pemasatan berbeda. Consoli, dkk (2023) menemukan bahwa kompresibilitas material yang dipadatkan independen terhadap mineralogi, sementara Zhang, dkk (2022) menemukan pengaruh signifikan mineralogi pada tailing dengan densitas berbeda. Perbedaan ini mungkin terkait dengan perbedaan dalam metode preparasi sampel, riwayat tegangan, atau karakteristik mineralogi spesifik, tetapi memerlukan investigasi lebih lanjut untuk resolusi; 4) Perilaku Jangka Panjang dan Pelapukan: Sebagian besar studi fokus pada perilaku mekanik jangka pendek dalam kondisi laboratorium yang terkontrol. Perilaku jangka panjang material disposal tambang di lapangan, termasuk efek pelapukan mineralogi, siklus basah-kering, dan perubahan gradasi karena degradasi partikel, masih kurang dipahami (Chai dkk., 2022); 5) Karakterisasi Material Disposal Nikel: Meskipun Indonesia merupakan produsen nikel terbesar, literatur ilmiah yang spesifik mengkarakterisasi sifat geoteknik material disposal tambang nikel laterit Indonesia masih terbatas. Sebagian besar studi yang tersedia berasal dari konteks geografis dan geologis yang berbeda, yang mungkin tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi lokal; 6) Integrasi Aspek Geokimia dan Geoteknik: Keputusan tentang pemanfaatan material disposal untuk aplikasi konstruksi memerlukan pertimbangan simultan aspek geoteknik dan geokimia. Namun, sebagian besar studi fokus pada salah satu aspek tanpa integrasi penuh. Pendekatan holistik yang

mengintegrasikan karakterisasi geoteknik, geokimia, dan lingkungan diperlukan untuk keputusan pengelolaan yang optimal (Edraki dkk., 2014).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan kajian literatur sistematis terhadap 30 publikasi ilmiah dari tahun 2019-2025, dapat disimpulkan bahwa gradasi partikel dan komposisi mineralogi memiliki peran fundamental dalam menentukan kekuatan geser dan kompresibilitas material disposal tambang.

Pengaruh Gradasi terhadap Kekuatan Geser: Material dengan ukuran median partikel (D_{50}) lebih besar, koefisien keseragaman (C_u) lebih tinggi, dan koefisien kelengkungan (C_c) mendekati 1 menunjukkan kekuatan geser yang superior. Material well-graded dapat mencapai kekuatan geser 30-40% lebih tinggi dibandingkan material uniformly graded pada densitas yang sama. Kombinasi parameter gradasi optimum ($C_u \approx 5-6$, $C_c \approx 1$) menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekuatan geser dan permeabilitas.

Pengaruh Gradasi terhadap Kompresibilitas: Gradasi mempengaruhi kompresibilitas terutama melalui pengaruhnya pada angka pori minimum yang dapat dicapai. Material well-graded dengan kandungan fraksi halus optimum (15-30%) menunjukkan kompresibilitas terendah. Namun, pada tegangan sangat tinggi (>4 MPa), pemecahan partikel dapat mengubah gradasi in-situ dan meningkatkan kompresibilitas, terutama pada partikel kasar yang angular.

Pengaruh Mineralogi terhadap Sifat Geoteknik: Kandungan mineral lempung meningkatkan kohesi secara linear (sekitar 1 kPa per 1% peningkatan kandungan lempung) tetapi juga meningkatkan kompresibilitas dan mikroporositas. Luas permukaan spesifik meningkat secara signifikan dengan kandungan lempung, dari sekitar $8\text{ m}^2/\text{g}$ untuk tailing dengan 5% lempung menjadi $42\text{ m}^2/\text{g}$ untuk tailing dengan 25% lempung. Mineralogi mempengaruhi perilaku geoteknik terutama pada material dengan densitas rendah atau kondisi lepas.

Interaksi Gradasi-Mineralogi: Pengaruh relatif gradasi versus mineralogi bergantung pada kondisi densitas, tegangan keliling, dan metode deposisi. Pada material yang dipadatkan dengan baik, efek packing yang ditentukan oleh gradasi cenderung mendominasi, sementara pada material deposisi hidrolik dengan densitas rendah, mineralogi memiliki pengaruh yang lebih besar. Kandungan fraksi halus merepresentasikan interaksi antara efek geometris (gradasi) dan efek mineralogis.

Aplikasi pada Tambang Nikel: Slag feronikel menunjukkan karakteristik yang menguntungkan sebagai material rockfill free-draining dengan sudut gesekan dalam $42-45^\circ$ dan permeabilitas tinggi, cocok untuk aplikasi timbunan dan drainase. Tailing tambang nikel

memerlukan kontrol gradasi yang ketat untuk aplikasi backfill, dengan substitusi material kasar hingga 30% dapat meningkatkan kekuatan secara signifikan. Evaluasi geokimia diperlukan bersamaan dengan karakterisasi geoteknik untuk memastikan keamanan pemanfaatan material disposal.

Metode Karakterisasi: Pendekatan karakterisasi komprehensif yang mengintegrasikan pengujian mekanik (triaxial, oedometer, CBR), analisis gradasi (ayakan, hidrometer), dan metode mineralogi (XRD, XRF, SEM, nitrogen adsorption) diperlukan untuk pemahaman holistik perilaku material disposal tambang. Pelaporan riwayat tegangan dan kondisi densitas sangat penting untuk komparabilitas hasil antar studi.

Berdasarkan temuan kajian literatur dan kesenjangan penelitian yang teridentifikasi, beberapa saran untuk penelitian lanjutan dan praktik pengelolaan material disposal tambang adalah 1) Pengembangan Model Konstitutif Terintegrasi: Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengembangkan model konstitutif yang mengintegrasikan parameter gradasi dan mineralogi secara eksplisit untuk prediksi perilaku mekanik material disposal tambang. Model harus mampu memperhitungkan interaksi kompleks antara gradasi, mineralogi, densitas, dan tegangan; 2) Studi Efek Skala dan Pemecahan Partikel: Investigasi lebih lanjut tentang efek skala dari laboratorium ke lapangan dan pemodelan pemecahan partikel di bawah tegangan tinggi diperlukan untuk meningkatkan akurasi prediksi perilaku tumpukan material disposal berukuran besar; 3) Karakterisasi Material Disposal Nikel Laterit Indonesia: Studi komprehensif yang mengkarakterisasi sifat geoteknik dan geokimia material disposal dari tambang nikel laterit Indonesia sangat diperlukan mengingat pentingnya industri nikel nasional dan kurangnya data lokal yang tersedia; 4) Studi Perilaku Jangka Panjang: Penelitian tentang perilaku jangka panjang material disposal, termasuk efek pelapukan mineralogi, degradasi partikel, dan siklus lingkungan (basah-kering, beku-cair) perlu dilakukan untuk menginformasikan desain fasilitas penyimpanan yang lebih tahan lama; 5) Integrasi Karakterisasi Multi-Aspek: Pendekatan penelitian holistik yang mengintegrasikan karakterisasi geoteknik, geokimia, mineralogi, dan lingkungan dalam kerangka kerja yang terpadu perlu dikembangkan untuk mendukung keputusan pengelolaan yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Chai, X., Sheng, Y., Liu, J., Xu, Y., & Liu, H. (2022). Experimental study on the mechanical properties of saturated tailing sand with different particle sizes. *Applied Sciences*, 12(23), 12231. <https://doi.org/10.3390/app122312231>
- Consoli, N. C., Silva, J. P. S., Wagner, A. C., Carvalho, J. V. de A., Baudet, B. A., Coop, M. R., Scheuermann Filho, H. C., Carvalho, I., de Sousa, G. M., & Cacciari, P. P. (2024). Critical state analysis of two compacted filtered iron ore tailings with different gradings and mineralogy at different stages of treatment. *Acta Geotechnica*, 19(2), 881–898. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-01963-9>
- Costa, J. P. R., Gomes, G. J. C., Fernandes, G., Magarinos, D. M., Fonseca, A., & Pires, P. J. M. (2023). Ferronickel slag as free-draining rockfill dike material: A novel waste solution for mining regions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(1), 128–143. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01519-1>
- Das, B. M. (2015). *Principles of foundation engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Edraki, M., Baumgartl, T., Manlapig, E., Bradshaw, D., Franks, D. M., & Moran, C. J. (2014). Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. *Journal of Cleaner Production*, 84, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>
- Fourie, A., & Edraki, M. (2022). Geotechnics of mine tailings: A 2022 state of the art. In *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Guner, N. U., Yilmaz, E., Sari, M., & Kasap, T. (2023). Cementitious backfill with partial replacement of Cu-rich mine tailings by sand: Rheological, mechanical and microstructural properties. *Minerals*, 13(3), 437. <https://doi.org/10.3390/min13030437>
- Guo, Y., Zhang, J., Li, M., Timms, W., Shen, L., & Li, P. (2022). Effects of loading stress and velocity on compression and particle breakage behaviour of waste rocks in backfill coal mining. *Applied Sciences*, 12(21), 11175. <https://doi.org/10.3390/app12211175>
- Jing, X., Wu, S., Qin, J., Li, X., Liu, X., Zhang, Y., Mao, J., & Nie, W. (2023). Multiscale mechanical characterizations of ultrafine tailings mixed with incineration slag. *Frontiers in Earth Science*, 11, Article 1123529. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1123529>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (Technical Report EBSE-2007-01). Keele University & University of Durham.
- Li, S., Liang, H., Li, H., Ma, J., & Li, B. (2021). Minimum void ratio model established from tailings and determination of optimal void ratio. *Geofluids*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8619121>
- Ma, C., Li, R., Zhang, C., Guo, X., & Li, X. (2023). A study on compressibility and permeability of tailings with different particle sizes under high pressure. *Bulletin of*

Engineering Geology and the Environment, 82(4), Article 106.
<https://doi.org/10.1007/s10064-023-03117-3>

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of soil behavior (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Reid, D., Fourie, A., Ayala, J. L., Dickinson, S., Ochoa-Cornejo, F., Fanni, R., Garfias, J., da Fonseca, A. V., Ghafghazi, M., Ovalle, C., Riemer, M., Rismanchian, A., Olivera, R., & Suazo, G. (2021). Results of a critical state line testing round robin programme. *Géotechnique*, 71(7), 616–630. <https://doi.org/10.1680/jgeot.19.P.373>

Riveros, G. A., & Sadrekarimi, A. (2021). Static liquefaction behaviour of gold mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(6), 889–901. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0209>

Santamarina, J. C., Torres-Cruz, L. A., & Bachus, R. C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526–528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>

Zhang, C., Pan, Z., Yin, H., Ma, C., Ma, L., & Li, X. (2022). Influence of clay mineral content on mechanical properties and microfabric of tailings. *Scientific Reports*, 12(1), Article 10700. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15063-3>