

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil

Volume 9, Nomor 3, Agustus 2026

Redaksi

Ketua Dewan Editor
(Editor-in-Chief)

Ir. Andy Prabowo, Ph.D. (Universitas Tarumanagara)

Editor Pelaksana
(Executive Editors)

Dr. Ir. Arif Sandjaya, S.T., M.T. (Universitas Tarumanagara)
Lidwina Sri Ayu DR Sianturi, S.T., M.T. (Universitas Tarumanagara)

Dewan Editor
(Editorial Board)

Prof. Ir. Leksmono Suryo Putranto, M.T., Ph.D. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Widodo Kushartomo, S.Si., M.Si. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Ir. Daniel Christianto, S.T., M.T. (Universitas Tarumanagara)
Ir. Yenny Untari Liucius, S.T., M.T. (Universitas Tarumanagara)
Ir. Arianti Sutandi, M.Eng. (Universitas Tarumanagara)
Ir. Sunarjo Leman, M.T. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Ir. Wati Asriningsih Pranoto, M.T. (Universitas Tarumanagara)
Erwin Lim, S.T., M.S., Ph.D. (Institut Teknologi Bandung)
Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D. (Institut Teknologi Sepuluh Nopember)

Advisory International
Editorial Boards

Prof. Monty Sutrisna, Ph.D. (Massey University, New Zealand)
Prof. Buntara Sthenly Ghan, Ph.D. (Nihon University, Japan)

Mitra Bestari Nasional
(National Reviewers)

Dr. Ir. Najid, M.T. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Ir. Henny Wiyanto, M.T. (Universitas Tarumanagara)
Ir. Oei Fuk Jin, S.T., M.Eng., D.Eng. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Mega Waty, M.T. (Universitas Tarumanagara)
Alfred J. Susilo, S.T., M.Eng., Ph.D. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Ir. Onnyxiforus Gondokusumo, M.Eng. (Universitas Tarumanagara)
Dr. Ida Ayu Oka Suwati Sideman, S.T., M.Sc. (Universitas Mataram)
Prof. Ir. Didi S. Agustawijaya, M.Eng., Ph.D. (Universitas Mataram)
Dr. Nurul Fajar Januriyadi (Universitas Pertamina)
Dr. Ir. Usman Wijaya, S.T., M.T. (Universitas Trisakti)
Vienti Hadsari, S.T., MCRES, Ph.D. (Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Ir. Andryan Suhendra, M.T. (Binus University)
Reynaldo Siahaan, S.T., M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas)
Helmy H. Tjahjanto, S.T., M.T., Ph.D. (Universitas Katholik Parahyangan)
Dr. Tilaka Wasanta, S.T., M.T. (Universitas Katholik Parahyangan)
Dr. Eng. Mia Wimala, S.T., M.T. (Universitas Katholik Parahyangan)
Anissa Noor Tadjudin, S.T., M.Sc., Ph.D. (cand) (Universitas Gadjah Mada)
Dr. Amelia Yuwono, S.T., S.Kom., M.T. (PT. Tarumanagara BumiYasa)
Dr. Ir. F.X. Supartono (PT Midasindo Teknik Utama)
Ir. Ali Iskandar, S.T., M.T. (PT. Solusi Andal Geointegra)

**Mitra Bestari
Internasional
(*International
Reviewers*)**

Prof. Bonaventura W. Hadikusumo (Asian Institute Technology, Bangkok)
Prof. Dr.-Ing. Joewono Prasetyo (University Tun Hussein Onn Malaysia)
Andri Setiawan, Ph.D. (DIC) (Universitat Politècnica de València, Spain)
Ir. Wong Widjaja, M.Sc. (WYN (South East Asia) Pte Ltd, Singapore)

**Alamat Redaksi
(*Editorial Address*)**

Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Tarumanagara
Alamat: Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta Barat, 11440
Kampus 1 Gedung L Lantai 5
Telepon: 021-5672548 ext.331
E-mail: jmts@untar.ac.id

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil

Volume 9, Nomor 3, Agustus 2026

Kata Pengantar

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil (E-ISSN 2622-545X) merupakan jurnal *peer-reviewed* yang dipublikasikan oleh Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara (UNTAR) sebagai wadah peneliti, mahasiswa, dan dosen dari dalam maupun luar UNTAR untuk mempublikasikan makalah hasil penelitian dan studi ilmiah dalam bidang Teknik Sipil.

JMTS mempublikasikan artikel ilmiah pada bidang Teknik Sipil dengan sub-bidang sebagai berikut:

- Struktur
- Material Konstruksi
- Geoteknik
- Sistem dan Teknik Transportasi
- Manajemen Konstruksi
- Keairan

Tim editor JMTS menerima artikel yang berisi laporan kegiatan pengujian laboratorium/lapangan disertai simulasi numerik berbasis metode teruji yang bertujuan untuk memperoleh temuan baru, evaluasi terhadap hasil temuan eksisting, kritik terhadap metode eksisting. Luaran artikel yang diterbitkan di JMTS tidak terbatas pada hasil penelitian dari metode kuantitatif, namun juga metode kualitatif dengan pembahasan dan justifikasi yang *prudent* serta dapat diterima oleh dewan editorial.

Penerbitan JMTS dilakukan secara berkala setiap 3 bulan, yaitu pada bulan Februari, Mei, Agustus, dan November.

JMTS berhasil mendapatkan peringkat 4 (Sinta 4) akreditasi jurnal ilmiah periode 3 tahun 2025.

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil terbitan Vol. 9 No. 3 bulan Agustus 2026 merupakan terbitan ke-33 sejak terbitan pertama pada Agustus 2018.

Penerbitan jurnal ini dapat berlangsung secara maksimal berkat kontribusi berbagai pihak. Terima kasih kepada tim editor yang telah membantu proses penerbitan dan Reviewer yang telah berkenan memberikan saran perbaikan untuk menjaga kualitas jurnal. Semoga jurnal ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu Teknik Sipil.

Salam,

Tim Redaksi Jurnal Mitra Teknik Sipil

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil

Vol. 9 No. 3, Agustus 2026

Daftar Isi

- | | |
|---|---------|
| IDENTIFIKASI PERILAKU TIDAK AMAN PEKERJA OPERATOR ASPHALT PAVER DENGAN METODE AHP KOTA SURABAYA
<i>Muhammad Shafiudin, Feri Harianto, dan Felicia Tria Nuciferani</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.35480 | 623-632 |
| SPT-EFFECTIVE SHEAR PARAMETER CORRELATION FOR MEDIUM STIFF TO STIFF CLAY IN JAKARTA
<i>Oei Fuk Jin, Aksan Kawanda, Ali Iskandar, Felicia Yohana dan Felicia Refalina Tantobudiono</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.36991 | 633-642 |
| ANALISIS KINERJA NONLINEAR DINDING GESER BERANGKAI BETON BERTULANG DENGAN VARIASI TINGGI BANGUNAN
<i>Shendy Saputra dan Sunarjo Leman</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37348 | 643-658 |
| PENGARUH TEMPERATUR PEMBAKARAN TERHADAP SIFAT MEKANIK SCC BERPENGUAT SERAT BAJA
<i>Louis Sutomo Limbo, Widodo Kushartomo, dan Philipus Hermawan</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37383 | 659-670 |
| PENGARUH SERBUK CANGKANG TELUR NON-KALSINASI TERHADAP PLASTISITAS DAN PEMADATAN TANAH DASAR EKSPANSIF GADING SERPONG
<i>Steve Jourdane Saputra dan Andryan Suhendra</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37390 | 671-682 |
| ANALISIS FAKTOR KEAMANAN LERENG TANAH LEMPUNG AKIBAT ELEVASI MUKA AIR TANAH
<i>Angeline Valance dan Gregorius Sandjaja Sentosa</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37393 | 683-692 |
| ANALISIS HASIL UJI TRIAXIAL TANAH LANAU KELEMPUNGAN DENGAN VARIASI KADAR KAPUR DAN WAKTU PEMERAMAN
<i>Joddie Calviano, Daniel Christianto, dan Amelia Yuwono</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37394 | 693-704 |
| ANALISIS PENGARUH STABILISASI TANAH MENGGUNAKAN KAPUR TOHOR DAN WAKTU PEMERAMAN TERHADAP NILAI CBR RENDAM
<i>Thomas Ian Zali, Daniel Christianto, dan Amelia Yuwono</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37396 | 705-714 |

- | | |
|---|---------|
| ANALISIS PENGARUH REKAYASA GRADASI CAMPURAN PASIR TERHADAP KARAKTERISTIK PERMEABILITAS DAN DAYA DUKUNG MATERIAL GRANULAR
<i>Marcellino Adam, Alfred Jonathan Susilo, dan Aniek Prihatiningsih</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37401 | 715-724 |
| ANALISIS NUMERIK PENGARUH RASIO TULANGAN TERHADAP DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG MENGGUNAKAN LS-DYNA
<i>Christopher Ngadiman dan Sunarjo Leman</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37402 | 725-738 |
| THERMAL CONSOLIDATION OF ORGANIC CLAY: COMPARATIVE ANALYSIS OF CV VIA TAYLOR'S METHOD FOR SUSTAINABLE INFRASTRUCTURE
<i>Angelyn Julita Sing, Hendy Wijaya, dan Ali Iskandar</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37403 | 739-746 |
| ANALISIS PENGARUH GRADASI CAMPURAN PASIR–KERIKIL TERHADAP KOEFISIEN PERMEABILITAS DAN SUDUT GESER DALAM
<i>Chandra Radian Yudhayanto, Alfred Jonathan Susilo, dan Aniek Prihatiningsih</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37411 | 747-760 |
| KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN AC-WC DENGAN PENAMBAHAN LIMBAH PLASTIK SACHET MULTILAYER MENGGUNAKAN METODE DRY PROCESS
<i>Cindi Natalia, Lidwina Sri Ayu DR Sianturi, dan Najid</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37315 | 761-768 |
| PENGARUH SERBUK CANGKANG KEONG SEBAGAI BAHAN PENGANTI FILLER TERHADAP KARAKTERISTIK MARSHALL CAMPURAN AC-WC
<i>Rivaldo Kurniawan, Lidwina Sri Ayu DR Sianturi, dan Najid</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37340 | 769-778 |
| KARAKTERISTIK KECELAKAAN LALU LINTAS PADA RUAS JALAN IR. SUTAMI KOTA BANDAR LAMPUNG
<i>Inaya Vidiadari, Hokbyan R.S Angkat, dan Najid</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37345 | 779-786 |
| KARAKTERISTIK PERJALANAN PENUMPANG LRT JABODEBEK RUTE HARJAMUKTI–DUKUH ATAS PADA PERIODE JAM SIBUK
<i>Alifia Cahyaningtias, Hokbyan R.S Angkat, dan Najid</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37349 | 787-800 |
| DESAIN MODULAR PRACETAK PADA REKONSTRUKSI PERKERASAN KAKU JALAN TOL TANGERANG–MERAK
<i>Agus Budiyanto, Sunarjo Leman, dan Andy Prabowo Pho</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.34570 | 801-812 |
| STUDI OVERSTRENGTH BETON MUTU FC 65 MPA PENAMBAHAN MATERIAL AKIBAT KADAR AIR AGREGAT
<i>David Wibowo, R. Basuki Anondho, Widodo Kushartomo, dan Arianti Sutandi</i>
https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37384 | 813-822 |

ANALISIS PENYEBAB <i>COST OVERRUN</i> BERDASARKAN PERBANDINGAN RAB DAN RAP PADA LIMA PROYEK GEDUNG <i>Ahmad Septian Dewanto dan Mega Waty</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37387	823-830
ANALISIS METODE <i>IMPORTANCE PERFORMANCE ANALYSIS</i> PADA PELAYANAN DAN FASILITAS DI DALAM BUS TRANSJAKARTA KORIDOR S11 <i>Alexander Christopher Sukardi dan Leksmono Suryo Putranto</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37392	831-840
ANALISIS KAPASITAS SISTEM DRAINASE EKSISTING DALAM PENGENDALIAN BANJIR DI PERUMAHAN PENGAIRAN PESING KONENG <i>Jason Tabaraka dan Wati Asriningsih Pranoto</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37398	841-852
STUDI KINERJA OPERASIONAL BENDUNG KATULAMPA SEBAGAI SISTEM PERINGATAN DINI BANJIR SUNGAI CILIWUNG <i>Shane Sebastian dan Wati Asriningsih Pranoto</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37399	853-862
PENGARUH INTEGRASI <i>MASS RAPID TRANSIT</i> DAN TRANSJAKARTA DALAM Mendukung TRANSPORTASI PUBLIK TERINTEGRASI DI DKI JAKARTA <i>Keanu Isaac Winoko dan Leksmono Suryo Putranto</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37397	863-872
ANALISIS KESESUAIAN INSTALASI CONCRETE LEVEL CROSSING PADA PERLINTASAN KERETA API SEBIDANG <i>Gilbert Matthew dan Leksmono Suryo Putranto</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37364	873-880
ANALISIS <i>CRITICAL SUCCESS FACTORS</i> PADA PERUSAHAAN KONTRAKTOR BANGUNAN GEDUNG DI INDONESIA <i>Jonathan Setiadi Pratjojo dan Arianti Sutandi</i> https://doi.org/10.24912/jmts.v9i3.37389	881-890

ANALISIS PENGARUH GRADASI CAMPURAN PASIR–KERIKIL TERHADAP KOEFISIEN PERMEABILITAS DAN SUDUT GESER DALAM

Chandra Radian Yudhayanto¹, Alfred Jonathan Susilo^{1*}, dan Aniek Prihatiningsih¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, JL. Letnan S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

*alfred@ft.untar.ac.id

Masuk: 30-05-2026, revisi: 06-07-2026, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2026

ABSTRACT

Soil gradation characteristics influence water flow and the mechanical behavior of granular materials. In coarse-grained soils, particle size distribution affects pore structure, thereby influencing the coefficient of permeability and the internal friction angle (ϕ). This study aims to analyze the effect of sand–gravel mixture gradation on the coefficient of permeability and its relationship with the internal friction angle. Laboratory testing included sieve analysis, specific gravity, constant head permeability, and direct shear tests on various sand–gravel mixture proportions. The gradation parameters analyzed were D_{10} , D_{30} , D_{60} , the coefficient of uniformity (C_u), and the coefficient of curvature (C_c). The results show that variations in mixture gradation significantly affect both permeability and the internal friction angle. Mixtures with a higher proportion of coarse particles exhibited higher permeability and greater internal friction angles than mixtures containing more fine particles. The findings also indicate a relationship between gradation characteristics, permeability, and the internal friction angle, providing valuable information for evaluating the hydraulic and mechanical behavior of granular materials. This study supports Sustainable Development Goal (SDG) 9, Industry, Innovation and Infrastructure, by providing scientific insights for sustainable geotechnical infrastructure development.

Keywords: soil gradation, coefficient of permeability, sand–gravel mixture, constant head permeability, internal friction angle (ϕ)

ABSTRAK

Karakteristik gradasi tanah berpengaruh terhadap kemampuan tanah dalam meloloskan air dan tingkat kepadatannya. Pada material berbutir kasar, distribusi ukuran butir menentukan susunan pori yang terbentuk sehingga memengaruhi nilai koefisien permeabilitas dan parameter geoteknik lainnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh karakteristik gradasi campuran pasir-kerikil terhadap nilai koefisien permeabilitas serta mengkaji hubungannya dengan nilai sudut geser dalam (ϕ). Penelitian dilakukan melalui pengujian analisis saringan untuk memperoleh distribusi ukuran butir, pengujian *specific gravity* untuk menentukan sifat fisik material, dan pengujian *constant head permeability* untuk memperoleh nilai koefisien permeabilitas pada beberapa variasi campuran pasir dan kerikil. Parameter gradasi yang dianalisis meliputi D_{10} , D_{30} , D_{60} , koefisien keseragaman (C_u), dan koefisien kelengkungan (C_c). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan komposisi campuran menghasilkan variasi karakteristik gradasi yang memengaruhi nilai koefisien permeabilitas. Campuran dengan proporsi butiran kasar yang lebih tinggi cenderung memiliki permeabilitas yang lebih besar dibandingkan campuran yang didominasi butiran halus. Analisis lebih lanjut menunjukkan adanya hubungan antara karakteristik gradasi, nilai permeabilitas, dan nilai sudut geser dalam (ϕ) yang dapat digunakan sebagai dasar evaluasi material granular pada pekerjaan geoteknik. Penelitian ini mendukung pencapaian *Sustainable Development Goal* 9, melalui pengembangan pemahaman mengenai karakteristik dapat menjadi dasar dalam perencanaan dan pembangunan infrastruktur geoteknik yang lebih andal, efisien, dan berkelanjutan.

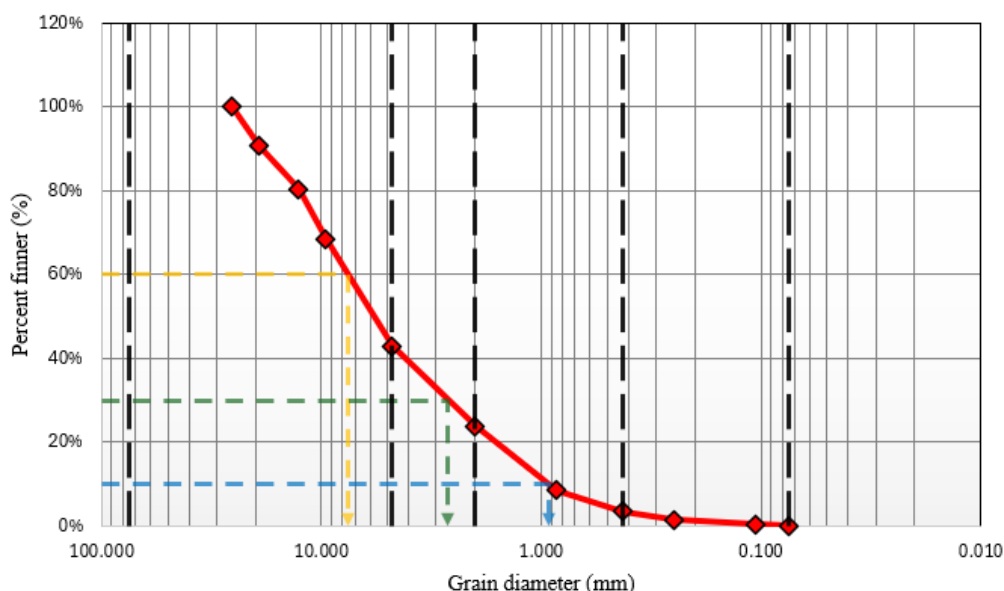
Kata kunci: gradasi tanah, permeabilitas, pasir-kerikil, *constant head*, nilai sudut geser dalam (ϕ)

1. PENDAHULUAN

Tanah merupakan material alami yang memiliki karakteristik fisik dan mekanis yang beragam tergantung pada ukuran butir, bentuk partikel, distribusi gradasi, serta kondisi kepadatannya (Das & Sobhan, 2018; Terzaghi et al., 1996). Pada bidang geoteknik, karakteristik gradasi menjadi salah satu parameter penting karena memengaruhi perilaku aliran air, kemampuan drainase, serta respons tanah terhadap beban (Das & Sobhan, 2018). Tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil umumnya digunakan sebagai material timbunan, lapisan drainase, filter, dan material pendukung konstruksi karena memiliki kemampuan meloloskan air yang relatif tinggi dibandingkan tanah berbutir

halus (Terzaghi et al., 1996). Perbedaan distribusi ukuran butir pada material granular dapat menyebabkan perubahan susunan pori sehingga memengaruhi nilai koefisien permeabilitas tanah (Li et al., 2021; Wang et al., 2024).

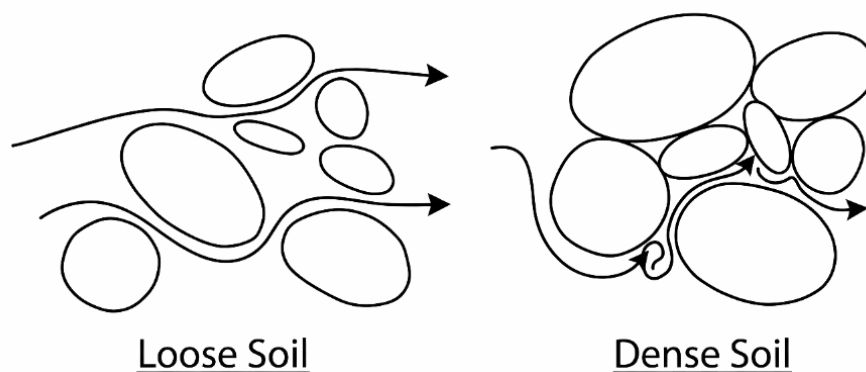
Permeabilitas merupakan kemampuan tanah untuk mengalirkan air melalui rongga pori yang saling terhubung. Nilai koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh ukuran partikel, bentuk butiran, angka pori, kepadatan, dan karakteristik gradasi material penyusun tanah. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa ukuran partikel dan distribusi gradasi memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai permeabilitas, terutama pada material granular yang tidak mengandung fraksi lempung. Contoh kurva distribusi ukuran butir pada tanah berbutir kasar ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Contoh kurva distribusi ukuran butir pada tanah berbutir kasar.

Selain memengaruhi permeabilitas, karakteristik gradasi juga berpengaruh terhadap kuat geser tanah, khususnya nilai sudut geser dalam (ϕ). Pada tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil, distribusi ukuran butir, bentuk partikel, serta susunan butiran memengaruhi mekanisme interlocking antarpartikel yang menentukan besarnya tahanan geser tanah. Perubahan komposisi campuran dapat menyebabkan perubahan struktur pori dan kontak antarbutiran, sehingga berpengaruh terhadap kemampuan tanah dalam meloloskan air maupun menahan gaya geser. Oleh karena itu, hubungan antara koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam menjadi aspek yang penting untuk dikaji dalam mengevaluasi karakteristik hidraulik dan mekanis tanah berbutir kasar.

Distribusi ukuran butir pada campuran pasir dan kerikil dapat menghasilkan kondisi gradasi yang berbeda. Gradasi yang lebih rapat memungkinkan partikel berukuran kecil mengisi rongga di antara partikel yang lebih besar sehingga menurunkan volume pori. Sebaliknya, campuran yang didominasi kerikil cenderung memiliki jalur aliran yang lebih banyak dan mempengaruhi nilai permeabilitas yang lebih tinggi. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa perubahan komposisi campuran dapat memengaruhi perilaku hidraulik maupun karakteristik kepadatan material. Mekanisme aliran air pada material granular dengan susunan butiran yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi aliran air pada susunan partikel granular dengan ukuran butir berbeda.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas hubungan antara distribusi ukuran butir dan permeabilitas tanah granular. Zhang et al. (2023) mengembangkan pendekatan granulometrik untuk memperkirakan permeabilitas berdasarkan parameter distribusi ukuran butir dan menunjukkan bahwa karakteristik gradasi memiliki pengaruh penting terhadap nilai permeabilitas material drainase. Penelitian lain yang dilakukan oleh (Liu et al., 2024) menunjukkan bahwa perubahan ukuran partikel dan komposisi campuran dapat menghasilkan perubahan signifikan terhadap kemampuan material dalam meloloskan air.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengaruh gradasi terhadap permeabilitas, kajian yang menghubungkan karakteristik gradasi campuran pasir–kerikil dengan nilai koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam masih relatif terbatas. Kedua parameter tersebut merupakan sifat hidraulik dan mekanis yang penting dalam mengevaluasi perilaku tanah berbutir kasar pada berbagai aplikasi geoteknik. Oleh karena itu, analisis hubungan antara karakteristik gradasi, koefisien permeabilitas, dan sudut geser dalam diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh distribusi ukuran butir terhadap perilaku material granular.

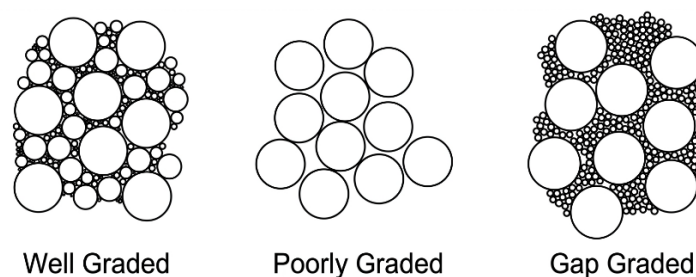
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh karakteristik gradasi campuran pasir dan kerikil terhadap nilai koefisien permeabilitas melalui pengujian *constant head permeability* serta terhadap nilai sudut geser dalam melalui pengujian *direct shear*. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengkaji hubungan antara parameter gradasi, koefisien permeabilitas, dan sudut geser dalam sehingga dapat diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai karakteristik hidraulik dan mekanis material granular sebagai dasar dalam analisis dan perencanaan geoteknik.

Karakteristik Tanah Berbutir Kasar

Tanah berbutir kasar merupakan tanah yang didominasi oleh partikel yang termasuk ke dalam pasir dan kerikil dengan sifat utama berupa kemampuan drainase yang relatif tinggi, kompresibilitas rendah, serta kekuatan geser yang umumnya lebih baik dibandingkan tanah berbutir halus. Berdasarkan sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS), tanah berbutir kasar dikategorikan sebagai tanah yang memiliki lebih dari 50% partikel tertahan pada saringan No. 200 (0,075 mm).

Pada tanah granular, parameter distribusi ukuran butir biasanya diperoleh melalui pengujian *sieve analysis* yang menghasilkan kurva gradasi tanah. Dari kurva tersebut dapat ditentukan diameter karakteristik seperti D_{10} , D_{30} , dan D_{60} yang selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien keseragaman (C_u) dan koefisien kelengkungan (C_c). Nilai-nilai tersebut digunakan untuk mengidentifikasi apakah tanah memiliki gradasi seragam (*uniform graded*) atau gradasi rapat (*well graded*). Tanah dengan gradasi rapat cenderung memiliki rongga pori yang lebih kecil karena partikel berukuran halus mengisi ruang di antara partikel yang lebih besar. Sebaliknya, tanah dengan gradasi seragam memiliki susunan pori yang relatif lebih besar sehingga kemampuan aliran air menjadi lebih tinggi (Moya et al., 2022; Liu et al., 2023).

Selain distribusi ukuran butir, bentuk partikel juga memberikan pengaruh terhadap perilaku tanah berbutir kasar. Partikel yang bersifat angular atau bersudut cenderung menghasilkan interlocking yang lebih besar dibandingkan partikel rounded sehingga memengaruhi susunan pori dan karakteristik aliran air dalam tanah. Penelitian yang dilakukan oleh Prihatiningsih et al. (2023) bahwa karakteristik fisik butiran pasir, termasuk ukuran dan distribusi partikelnya, berpengaruh terhadap nilai permeabilitas yang diperoleh baik melalui pendekatan empiris maupun pengujian laboratorium. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa nilai diameter efektif (D_{10}) memiliki peranan penting dalam estimasi koefisien permeabilitas menggunakan pendekatan Hazen. Klasifikasi tanah berdasarkan distribusi ukuran partikel disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Klasifikasi tanah berdasarkan distribusi ukuran partikel.

Karakteristik tanah berbutir kasar juga berkaitan erat dengan kuat geser tanah, yang salah satunya dinyatakan melalui nilai sudut geser dalam (ϕ). Pada material pasir dan kerikil, distribusi ukuran butir, bentuk partikel, serta susunan butiran memengaruhi mekanisme *interlocking* antarpartikel sehingga menentukan besarnya tahanan geser yang dapat dikembangkan. Di sisi lain, karakteristik gradasi juga memengaruhi struktur pori yang berperan terhadap kemampuan

tanah dalam meloloskan air. Oleh karena itu, analisis karakteristik tanah berbutir kasar tidak hanya penting untuk memahami perilaku permeabilitas, tetapi juga untuk mengevaluasi hubungan antara distribusi ukuran butir, koefisien permeabilitas, dan sudut geser dalam sebagai parameter penting dalam perencanaan geoteknik.

Koefisien Permeabilitas Tanah

Permeabilitas merupakan kemampuan tanah untuk meloloskan air melalui rongga-rongga pori (Terzaghi et al., 1996). Dalam bidang geoteknik, permeabilitas menjadi salah satu parameter penting karena memengaruhi berbagai aspek rekayasa, seperti desain sistem drainase, stabilitas lereng, rembesan pada bendungan tanah, proses konsolidasi, serta perilaku aliran air tanah Das & Sobhan, 2018; Terzaghi et al., 1996. Besarnya kemampuan tanah dalam mengalirkan air dinyatakan dengan koefisien permeabilitas (k), yang menunjukkan tingkat kemudahan air untuk bergerak melalui tanah.

Konsep aliran air dalam tanah umumnya dijelaskan menggunakan Hukum Darcy yang menyatakan bahwa aliran air melalui media berpori dipengaruhi oleh karakteristik material (Terzaghi et al., 1996). Pada tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil, kemampuan meloloskan air umumnya lebih tinggi dibandingkan tanah berbutir halus karena ukuran pori yang lebih besar dan jalur aliran yang lebih terbuka. Oleh karena itu, tanah granular banyak dimanfaatkan sebagai material drainase, filter, dan lapisan perkerasan yang memerlukan kemampuan aliran air yang baik.

Besarnya koefisien permeabilitas dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain ukuran partikel, distribusi gradasi, angka pori, bentuk butiran, tingkat kepadatan, temperatur air, serta struktur tanah. Pada material granular, ukuran butir dan distribusi gradasi merupakan faktor yang sangat dominan. Material dengan ukuran partikel yang lebih besar umumnya memiliki rongga pori yang lebih terbuka sehingga menghasilkan nilai permeabilitas yang lebih tinggi. Sebaliknya, keberadaan partikel halus dapat mengisi rongga antarbutiran dan mengurangi jalur aliran air sehingga menyebabkan penurunan nilai permeabilitas.

Penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik gradasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan aliran air pada material granular. Distribusi ukuran butir yang berbeda menghasilkan struktur pori yang berbeda pula sehingga memengaruhi nilai koefisien permeabilitas. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa parameter gradasi dapat digunakan sebagai salah satu dasar dalam memperkirakan perilaku hidraulik material granular.

Selain melalui pengujian laboratorium, nilai permeabilitas sering diperkirakan menggunakan pendekatan yang memanfaatkan parameter distribusi ukuran butir. Salah satu parameter yang banyak digunakan adalah diameter efektif tanah (D_{10}), yang dianggap mewakili ukuran butiran yang berperan penting dalam mengontrol aliran air. Penelitian yang dilakukan oleh Prihatiningsih et al. (2023) menunjukkan bahwa karakteristik ukuran butir pasir memiliki hubungan yang erat dengan nilai permeabilitas yang diperoleh baik melalui pendekatan empiris maupun pengujian laboratorium. Hasil penelitian tersebut menegaskan bahwa distribusi ukuran partikel merupakan faktor utama yang memengaruhi kemampuan aliran air pada material granular.

Dalam praktik laboratorium, nilai koefisien permeabilitas tanah berbutir kasar umumnya diperoleh melalui pengujian *constant head permeability*. Metode ini banyak digunakan untuk material pasir dan kerikil karena mampu merepresentasikan kondisi aliran air pada tanah yang memiliki permeabilitas relatif tinggi. Melalui pengujian tersebut, pengaruh variasi gradasi terhadap kemampuan meloloskan air dapat dievaluasi secara kuantitatif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh karakteristik gradasi campuran pasir dan kerikil terhadap nilai koefisien permeabilitas serta nilai sudut geser dalam (ϕ). Metode penelitian dilakukan melalui pengujian laboratorium terhadap beberapa variasi campuran pasir dan kerikil yang telah ditentukan. Pengujian yang dilakukan meliputi analisis saringan (*sieve analysis*), *specific gravity*, *constant head permeability*, dan *direct shear*. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk memperoleh hubungan antara parameter gradasi, koefisien permeabilitas, dan nilai sudut geser dalam.

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari pasir kasar, pasir sedang dan kerikil yang dicampur dengan beberapa variasi komposisi. Variasi campuran dibuat untuk menghasilkan karakteristik gradasi yang berbeda sehingga pengaruh distribusi ukuran butir terhadap permeabilitas dapat diamati. Sampel yang telah disiapkan kemudian diuji di laboratorium sesuai prosedur dan standar yang berlaku.

Tahapan penelitian diawali dengan pengujian *specific gravity* untuk menentukan berat jenis material penyusun. Selanjutnya dilakukan analisis saringan guna memperoleh distribusi ukuran butir dan parameter gradasi yang meliputi diameter efektif (D_{10}), diameter karakteristik (D_{30} dan D_{60}), koefisien keseragaman (C_u), serta koefisien kelengkungan (C_c). Setelah itu dilakukan pengujian *constant head permeability* untuk memperoleh nilai koefisien permeabilitas pada setiap variasi campuran. Tahapan pelaksanaan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir penelitian.

Material penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas kerikil, pasir kasar, dan pasir sedang. Kerikil yang digunakan dalam penelitian berfungsi sebagai fraksi kasar yang membentuk kerangka utama campuran. Material ini memiliki ukuran butir yang relatif besar sehingga menghasilkan rongga pori yang terbuka dan berpotensi meningkatkan kemampuan aliran air pada campuran. Material kerikil yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Material kerikil yang digunakan dalam penelitian.

Selain kerikil, penelitian ini menggunakan pasir kasar sebagai material pengisi dengan ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan kerikil. Keberadaan pasir kasar dalam campuran diharapkan dapat memengaruhi distribusi ukuran butir dan susunan rongga pori yang terbentuk. Material pasir kasar yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Material pasir kasar yang digunakan dalam penelitian.

Material ketiga yang digunakan adalah pasir sedang. Pasir sedang memiliki ukuran butir yang lebih kecil dibandingkan pasir kasar sehingga berpotensi mengisi rongga antarbutiran dalam campuran secara lebih efektif. Penggunaan pasir sedang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan distribusi ukuran butir terhadap karakteristik gradasi dan nilai permeabilitas. Dokumentasi pasir sedang yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Material pasir sedang yang digunakan dalam penelitian.

Sebelum dilakukan pencampuran, masing-masing material diuji melalui pengujian *specific gravity* dan analisis saringan (*sieve analysis*) untuk mengetahui karakteristik fisik serta distribusi ukuran butirnya. Selanjutnya, material disusun ke dalam beberapa variasi campuran berdasarkan persentase kerikil dan jenis pasir yang digunakan. Variasi campuran tersebut dirancang untuk menghasilkan karakteristik gradasi yang berbeda sehingga pengaruhnya terhadap nilai koefisien permeabilitas dapat diamati secara lebih jelas. Variasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi campuran kerikil dan pasir pada penelitian

Kode Sampel	Kerikil (%)	Pasir Kasar (%)	Pasir Sedang (%)
PK-50	50	50	-
PK-60	40	60	-
PK-70	30	70	-
PS-50	50	-	50
PS-60	40	-	60
PS-70	30	-	70

Setiap variasi campuran kemudian dipersiapkan dalam kondisi yang sama sebelum dilakukan pengujian di laboratorium. Sampel yang telah disiapkan selanjutnya digunakan untuk pengujian *specific gravity*, analisis saringan, dan *constant head permeability* guna memperoleh parameter yang diperlukan dalam penelitian ini.

Pengujian Sieve Analysis

Pengujian sieve analysis dilakukan untuk memperoleh distribusi ukuran butir dari setiap material dan variasi campuran yang digunakan dalam penelitian. Pengujian dilaksanakan mengacu pada ASTM D6913/D6913M yang mengatur metode penentuan distribusi ukuran partikel tanah menggunakan analisis saringan (ASTM International, 2024). Hasil pengujian disajikan dalam bentuk kurva distribusi ukuran butir yang digunakan untuk menentukan diameter karakteristik tanah, yaitu D₁₀, D₃₀, dan D₆₀. Berdasarkan parameter tersebut dihitung koefisien keseragaman (Cu) dan koefisien kelengkungan (Cc) yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik gradasi masing-masing sampel. Nilai koefisien keseragaman (Cu) dihitung menggunakan Persamaan (1) dan nilai koefisien kelengkungan (Cc) dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

dengan Cu = koefisien keseragaman, D₆₀ = diameter butir yang lolos 60%, D₁₀ = diameter butir yang lolos 10%.

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}D_{60}} \quad (2)$$

dengan Cc = koefisien kelengkungan, D₃₀ = diameter butir yang lolos 30%, D₁₀ = diameter butir yang lolos 10%, D₆₀ = diameter butir yang lolos 60%.

Pengujian Specific Gravity

Pengujian *specific gravity* dilakukan untuk menentukan berat jenis butiran tanah yang digunakan dalam penelitian. Nilai *specific gravity* diperlukan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik material penyusun dan digunakan sebagai parameter pendukung dalam analisis sifat geoteknik tanah. Pengujian dilakukan mengacu pada ASTM D854 mengenai metode pengujian specific gravity partikel tanah menggunakan piknometer (ASTM International, 2023). Nilai *specific gravity* (G_s) dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$G_s = \frac{w_2 - w_1}{(w_2 - w_1) + (w_4 - w_3)} \quad (3)$$

dengan G_s = specific gravity tanah, W₁ = berat piknometer kosong (g), W₂ = berat piknometer dan tanah kering (g), W₃ = berat piknometer, tanah, dan air hingga tanda kalibrasi (g), W₄ = berat piknometer berisi air hingga tanda kalibrasi (g).

Pengujian Constant Head Permeability

Pengujian *constant head permeability* dilakukan untuk menentukan nilai koefisien permeabilitas (k) pada setiap variasi campuran kerikil dan pasir. Metode ini dipilih karena sesuai untuk material berbutir kasar yang memiliki permeabilitas relatif tinggi. Pengujian dilakukan mengacu pada ASTM D2434 mengenai pengukuran permeabilitas

tanah granular menggunakan metode *constant head* (ASTM International, 2024). Nilai koefisien permeabilitas dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$k = \frac{Q \times L}{A \times h \times t} \quad (4)$$

Dengan k = koefisien permeabilitas (m/s), Q = volume air yang mengalir (m³), L = panjang sampel tanah (m), A = luas penampang sampel (m²), h = beda tinggi energi (m), t = waktu pengaliran (s).

Hasil pengujian permeabilitas pada setiap variasi campuran kemudian digunakan untuk menganalisis pengaruh karakteristik gradasi terhadap kemampuan tanah dalam meloloskan air serta untuk mengkaji hubungannya dengan nilai sudut geser dalam (ϕ).

Analisis Hubungan Koefisien Permeabilitas dan Sudut Geser Dalam

Analisis hubungan dilakukan untuk mengevaluasi keterkaitan antara nilai koefisien permeabilitas (k) dan sudut geser dalam (ϕ) pada setiap variasi campuran pasir–kerikil. Nilai koefisien permeabilitas diperoleh melalui pengujian *constant head permeability*, sedangkan nilai sudut geser dalam diperoleh dari hasil pengujian *direct shear*.

Hubungan antara kedua parameter dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan perubahan nilai koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam pada setiap variasi campuran. Selanjutnya dilakukan analisis menggunakan grafik hubungan antara koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan kedua parameter akibat variasi karakteristik gradasi.

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana perubahan distribusi ukuran butir pada campuran pasir–kerikil memengaruhi karakteristik hidraulik yang dinyatakan dengan koefisien permeabilitas serta karakteristik mekanis yang dinyatakan dengan sudut geser dalam.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian *Specific Gravity*

Pengujian *specific gravity* dilakukan untuk mengetahui berat jenis butiran pada setiap variasi campuran yang digunakan dalam penelitian. Hasil pengujian *specific gravity* untuk seluruh variasi campuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Specific Gravity* (Gs) pada setiap variasi campuran

Kode Sampel	Gs			Average Gs
	1	2	3	
PK-50	2,65	2,66	2,65	2,66
PK-60	2,68	2,66	2,67	2,67
PK-70	2,66	2,67	2,68	2,67
PS-50	2,65	2,64	2,66	2,65
PS-60	2,67	2,67	2,68	2,67
PS-70	2,66	2,68	2,66	2,67

Hasil pengujian *specific gravity* pada seluruh variasi campuran Pasir dan krikil menunjukkan nilai berat jenis yang relatif sama dengan rentang antara 2,65 hingga 2,67. Nilai rata-rata *specific gravity* tertinggi diperoleh pada sampel PK-60, PK-70, PS-60, dan PS-70 sebesar 2,67, sedangkan nilai terendah diperoleh pada sampel PS-50 sebesar 2,65. Perbedaan yang relatif kecil tersebut menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki karakteristik yang serupa dan layak untuk dibandingkan pada analisis permeabilitas. Nilai *specific gravity* yang berada pada kisaran 2,65 – 2,68 juga sesuai dengan karakteristik umum tanah berjenis pasir dan krikil.

Hasil Analisis Saringan (*Sieve Analysis*)

Analisis saringan dilakukan untuk memperoleh distribusi ukuran butir pada setiap variasi campuran pasir dan kerikil. Nilai parameter gradasi tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Koefisien Keseragaman (Cu) dan Koefisien Kelengkungan (Cc) setiap variasi campuran

Kode Sampel	Cu	Cc
PK-50	13,5460	0,4894
PK-60	6,9476	0,8857
PK-70	5,9539	0,9689
PS-50	42,6491	0,0582
PS-60	20,9622	0,1017
PS-70	2,9433	0,6478

Pada campuran pasir kasar, nilai Cu berkisar antara 5,95 hingga 13,55. Sampel PK-50 memiliki nilai Cu tertinggi sebesar 13,5460 yang menunjukkan rentang ukuran butir yang lebih beragam dibandingkan sampel lainnya. Sementara itu, nilai Cu pada sampel PK-60 dan PK-70 mengalami penurunan menjadi 6,9476 dan 5,9539 yang mengindikasikan distribusi ukuran butir yang lebih seragam.

Pada campuran pasir sedang, nilai Cu menunjukkan variasi yang lebih besar. Sampel PS-50 memiliki nilai Cu tertinggi sebesar 42,6491 yang mengindikasikan distribusi ukuran butir yang sangat lebar. Nilai tersebut kemudian menurun menjadi 20,9622 pada PS-60 dan 2,9433 pada PS-70 seiring meningkatnya proporsi pasir sedang dalam campuran.

Hasil Pengujian *Constant Head Permeability*

Pengujian *constant head permeability* dilakukan untuk mengetahui kemampuan setiap variasi campuran dalam meloloskan air melalui pori-pori tanah. Hasil pengujian koefisien permeabilitas pada seluruh sampel disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian koefisien permeabilitas pada setiap variasi campuran

Kode Sampel	k (cm/s)	Kategori
PK-50	0,0113	<i>Medium</i>
PK-60	0,0087	<i>Medium</i>
PK-70	0,0063	<i>Medium</i>
PS-50	0,0090	<i>Medium</i>
PS-60	0,0066	<i>Medium</i>
PS-70	0,0051	<i>Medium</i>

Hasil pengujian *constant head permeability* menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran memiliki nilai koefisien permeabilitas pada kategori sedang (*medium permeability*). Nilai koefisien permeabilitas yang diperoleh berkisar antara 0,0051 cm/s hingga 0,0113 cm/s. Rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa seluruh sampel masih memiliki kemampuan yang cukup baik dalam meloloskan air, yang merupakan karakteristik tanah yang tersusun atas campuran kerikil dan pasir.

Pada kelompok campuran kerikil–pasir kasar, nilai permeabilitas mengalami penurunan seiring meningkatnya proporsi pasir kasar dalam campuran. Sampel PK-50 menghasilkan nilai permeabilitas tertinggi sebesar 0,0113 cm/s, kemudian menurun menjadi 0,0087 cm/s pada PK-60 dan 0,0063 cm/s pada PK-70. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah pasir kasar menyebabkan sebagian rongga antarbutiran kerikil terisi sehingga jalur aliran air menjadi lebih sedikit.

Tren yang sama juga terlihat pada kelompok campuran kerikil–pasir sedang. Nilai permeabilitas menurun dari 0,0090 cm/s pada PS-50 menjadi 0,0066 cm/s pada PS-60 dan mencapai nilai terendah sebesar 0,0051 cm/s pada PS-70. Penurunan ini cenderung lebih signifikan dibandingkan campuran pasir kasar karena ukuran butir pasir sedang yang lebih kecil mampu mengisi rongga pori secara lebih efektif. Akibatnya, volume pori yang berfungsi sebagai jalur aliran air berkurang sehingga nilai permeabilitas menurun.

Hasil Pengujian *Direct Shear*

Pengujian *direct shear* dilakukan untuk memperoleh nilai sudut geser dalam (ϕ) dari masing-masing material dan variasi campuran pasir–kerikil. Pengujian dilakukan dengan memberikan tiga variasi tegangan normal, kemudian hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser dianalisis berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr–Coulomb sehingga diperoleh nilai sudut geser dalam pada setiap sampel. Hasil pengujian *direct shear* pada seluruh sampel disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian *Direct Shear* pada setiap variasi campuran

Kode Sampel	Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)
PK-50	47.9
PK-60	46.9
PK-70	44.8
PS-50	41.7
PS-60	37.7
PS-70	35.4

Berdasarkan Tabel 5, nilai sudut geser dalam tertinggi diperoleh pada campuran PK-50, yaitu sebesar $47,9^{\circ}$, sedangkan nilai terendah diperoleh pada campuran PK-70, yaitu sebesar $35,4^{\circ}$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa material dengan ukuran butir yang lebih kasar memiliki kemampuan menahan gaya geser yang lebih besar dibandingkan material berbutir lebih halus. Hal ini disebabkan oleh mekanisme *interlocking* antarbutiran yang lebih baik pada material bergradasi kasar sehingga meningkatkan tahanan terhadap pergeseran.

Pada campuran pasir pasir kasar dengan krikil, nilai sudut geser dalam menunjukkan kecenderungan menurun seiring meningkatnya proporsi pasir dalam campuran. Nilai sudut geser dalam berturut-turut sebesar $47,9^{\circ}$, $46,9^{\circ}$, dan $44,8^{\circ}$ untuk campuran pasir kasar sebesar 50%, 60%, dan 70%. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa berkurangnya proporsi kerikil menyebabkan kontak langsung antarbutiran kasar semakin sedikit sehingga kemampuan *interlocking* menurun.

Kecenderungan yang sama juga terlihat pada campuran pasir sedang dengan krikil, di mana nilai sudut geser dalam mengalami penurunan dari $41,7^{\circ}$ menjadi $37,7^{\circ}$ dan $35,4^{\circ}$ seiring bertambahnya proporsi pasir dari 50% menjadi 70%. Dibandingkan dengan campuran pasir kasar pada proporsi yang sama, campuran pasir sedang menghasilkan nilai sudut geser dalam yang lebih rendah. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik butiran pasir, seperti gradasi, bentuk, dan tekstur permukaan, turut memengaruhi besarnya tahanan geser yang dapat dikembangkan oleh campuran.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan fraksi pasir dalam campuran cenderung menurunkan nilai sudut geser dalam. Dengan demikian, komposisi gradasi pasir dengan kerikil memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik kuat geser material granular. Hasil ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis hubungan antara karakteristik gradasi, koefisien permeabilitas, dan sudut geser dalam pada setiap variasi campuran.

Hubungan Koefisien Permeabilitas dan Sudut Geser Dalam

Hubungan antara koefisien permeabilitas (k) dan sudut geser dalam (ϕ) pada setiap variasi campuran pasir–kerikil disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hubungan Koefisien Permeabilitas dan Nilai Sudut Geser dalam pada setiap variasi campuran

Kode Sampel	k (cm/s)	Sudut Geser Dalam ($^{\circ}$)
PK-50	0,0113	47.9
PK-60	0,0087	46.9
PK-70	0,0063	44.8
PS-50	0,0090	41.7
PS-60	0,0066	37.7
PS-70	0,0051	35.4

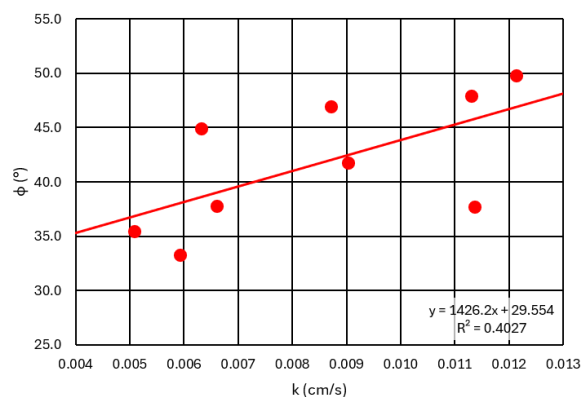
Berdasarkan Tabel 6, terlihat bahwa penurunan nilai koefisien permeabilitas diikuti oleh penurunan nilai sudut geser dalam pada kedua jenis campuran. Pada campuran pasir kasar dengan kerikil, peningkatan proporsi pasir dari 50% menjadi 70% menyebabkan nilai koefisien permeabilitas menurun dari 0,0113 cm/s menjadi 0,0063 cm/s, sedangkan nilai sudut geser dalam menurun dari 47,9° menjadi 44,8°. Kecenderungan serupa juga terjadi pada campuran pasir sedang dengan kerikil, di mana nilai koefisien permeabilitas menurun dari 0,0090 cm/s menjadi 0,0051 cm/s, sementara nilai sudut geser dalam berkurang dari 41,7° menjadi 35,4°.

Penurunan kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya proporsi pasir menghasilkan struktur campuran yang lebih rapat karena butiran pasir mengisi rongga di antara butiran kerikil. Kondisi ini menyebabkan jalur aliran air menjadi lebih sempit sehingga nilai koefisien permeabilitas menurun. Di sisi lain, meningkatnya fraksi pasir mengurangi kontak langsung antarbutiran kerikil sehingga mekanisme *interlocking* menjadi lebih lemah. Akibatnya, kemampuan material dalam menahan gaya geser juga menurun yang ditunjukkan oleh penurunan nilai sudut geser dalam.

Apabila dibandingkan pada komposisi campuran yang sama, campuran PK menghasilkan nilai koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam yang lebih tinggi dibandingkan campuran PS. Sebagai contoh, pada komposisi 50% pasir dan 50% kerikil, campuran PK-50 memiliki nilai koefisien permeabilitas sebesar 0,0113 cm/s dan sudut geser dalam sebesar 47,9°, sedangkan campuran PS-50 memiliki nilai koefisien permeabilitas sebesar 0,0090 cm/s dan sudut geser dalam sebesar 41,7°. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik gradasi dan bentuk butiran pada pasir kasar memberikan kontak antarbutiran yang lebih baik dibandingkan pasir sedang, sehingga menghasilkan kemampuan meloloskan air dan tahanan geser yang lebih tinggi.

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan gradasi campuran pasir-kerikil memberikan pengaruh terhadap koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam. Semakin besar proporsi pasir dalam campuran, nilai koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam cenderung menurun. Selain itu, pada proporsi campuran yang sama, campuran yang menggunakan pasir kasar menunjukkan karakteristik hidraulik dan mekanis yang lebih baik dibandingkan campuran yang menggunakan pasir sedang. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi perilaku material granular dalam aspek aliran air maupun ketahanan terhadap gaya geser.

Untuk melihat hubungan antara koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam secara kuantitatif, dilakukan analisis regresi linier sederhana menggunakan seluruh data hasil pengujian. Hasil analisis tersebut ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hubungan Koefisien Permeabilitas Laboratorium (k) terhadap Sudut Geser Dalam (ϕ) berdasarkan analisis regresi linier.

Berdasarkan hasil analisis regresi diperoleh persamaan $\phi = 1426,2k + 29,554$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,4027$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sekitar 40,27% variasi sudut geser dalam dapat dijelaskan oleh perubahan koefisien permeabilitas, sedangkan 59,73% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain, seperti distribusi ukuran butiran, bentuk partikel, tingkat kepadatan, serta mekanisme *interlocking* antarbutiran.

Garis regresi menunjukkan kecenderungan hubungan positif antara koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam, di mana material dengan nilai permeabilitas yang lebih tinggi cenderung memiliki sudut geser dalam yang lebih besar. Namun demikian, penyebaran titik data yang masih cukup besar mengindikasikan bahwa hubungan tersebut tidak sepenuhnya linier. Hal ini menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas bukan merupakan satu-satunya parameter yang mengendalikan kuat geser material granular. Pengaruh gradasi campuran dan karakteristik butiran tetap menjadi faktor dominan dalam menentukan besarnya sudut geser dalam.

Hasil ini sejalan dengan pembahasan sebelumnya, yaitu bahwa perubahan proporsi pasir dan kerikil tidak hanya memengaruhi kemampuan material dalam meloloskan air, tetapi juga mengubah mekanisme kontak dan interlocking antarbutiran. Oleh karena itu, hubungan antara permeabilitas dan sudut geser dalam lebih tepat dipandang sebagai hubungan yang dipengaruhi oleh karakteristik gradasi material secara keseluruhan, bukan sebagai hubungan sebab-akibat secara langsung.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan terhadap campuran kerikil dan pasir, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Karakteristik gradasi campuran pasir–kerikil memberikan dampak terhadap nilai koefisien permeabilitas. Peningkatan persentase jumlah pasir dalam campuran mengakibatkan nilai permeabilitas mengalami penurunan.
- Hasil pengujian permeabilitas menunjukkan bahwa nilai koefisien permeabilitas berkisar antara 0,0051 cm/s hingga 0,0113 cm/s dan seluruh sampel termasuk dalam kategori permeabilitas sedang (*medium permeability*). Nilai permeabilitas tertinggi diperoleh pada sampel PK-50 sebesar 0,0113 cm/s, sedangkan nilai terendah diperoleh pada sampel PS-70 sebesar 0,0051 cm/s.
- Hasil pengujian *direct shear* menunjukkan bahwa nilai sudut geser dalam (ϕ) pada variasi campuran berkisar antara 35,4° hingga 47,9°. Nilai sudut geser dalam tertinggi diperoleh pada sampel PK-50 sebesar 47,9°, sedangkan nilai terendah diperoleh pada sampel PS-70 sebesar 35,4°. Peningkatan proporsi pasir dalam campuran menyebabkan nilai sudut geser dalam cenderung menurun akibat berkurangnya mekanisme *interlocking* antarbutiran kerikil.
- Terdapat kecenderungan bahwa penurunan koefisien permeabilitas diikuti oleh penurunan nilai sudut geser dalam pada setiap variasi campuran. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan karakteristik gradasi memengaruhi sifat hidraulik dan sifat mekanis material granular secara bersamaan.
- Pada proporsi campuran yang sama, campuran yang menggunakan pasir kasar menghasilkan nilai koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam yang lebih tinggi dibandingkan campuran yang menggunakan pasir sedang. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik ukuran dan distribusi butir pada pasir kasar menghasilkan jalur aliran air yang lebih terbuka serta mekanisme *interlocking* yang lebih baik dibandingkan pasir sedang.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi komposisi campuran yang lebih beragam sehingga pengaruh karakteristik gradasi terhadap koefisien permeabilitas dan sudut geser dalam dapat dianalisis dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi.
- Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian *direct shear* dengan variasi tegangan normal yang lebih banyak atau rentang tegangan yang lebih luas sehingga nilai sudut geser dalam yang diperoleh dapat merepresentasikan karakteristik kuat geser material secara lebih akurat.
- Analisis statistik, seperti regresi linier maupun nonlinier, dapat diterapkan untuk memperoleh model hubungan yang lebih representatif antara parameter gradasi, koefisien permeabilitas, dan sudut geser dalam.
- Penelitian lanjutan dapat menambahkan parameter geoteknik lainnya, seperti kepadatan relatif (*relative density*), angka pori (*void ratio*), dan derajat kepadatan (*degree of compaction*), sehingga hubungan antara karakteristik gradasi, sifat hidraulik, dan sifat mekanis material granular dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2023). ASTM D854-23: *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>
- ASTM International. (2024). ASTM D2434-24: *Standard test method for permeability of granular soils (constant head)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2434-24>
- ASTM International. (2024). ASTM D6913/D6913M-24: *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-24
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering (9th ed.)*. Cengage Learning.
- Ferede, E. (2010). *Correlation of California Bearing Ratio (CBR) with grain size distribution parameters for granular soils*. Addis Ababa University.
- Li, Y., Song, X., Pang, Y., Yang, X., Zhang, X., Yao, L., & Sun, X. (2021). Laboratory investigation of permeability property of natural gravels with different particle sizes under different laying conditions. *Science Progress*, 104(2). <https://doi.org/10.1177/00368504211002357>
- Liu, X., Wang, L., & Chen, Z. (2023). Effect of gradation characteristics and particle morphology on internal erosion of sandy gravels: A large-scale experimental study. *Water*, 15(14), 2660. <https://doi.org/10.3390/w15142660>

- Meyerhof, G. G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 82(SM1), 1–19.
- Moya, J., Monzó, P., Pardo, G., & Ferrer, M. (2022). New granulometric expressions for estimating permeability of granular drainages. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 456. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02897-4>
- Prihatiningsih, A., Pranoto, W. A., & Yuwono, A. (2023). Analysis of sand grain characteristics and permeability using Hazen formula and laboratory test. *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, 5(2), 249–256.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Wang, Y., Zhang, Y., Liu, J., & Zhang, Z. (2024). Research on the critical value of sand permeability particle size and its permeability law after mixing. *Water*, 16(3), 393. <https://doi.org/10.3390/w16030393>
- Zhang, H., Wang, J., & Liu, Y. (2023). Experimental study on permeability characteristics of sandy gravel with high fines content. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.11779/CJGE2023S10028>

