MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL
Jurnal Ilmu dan Terapan Bidang Teknik Sipil
Website : mkts.sipil.undip.ac.id
e-ISSN : 2549 - 6778
doi: 10.14710/mkts.v31i1.69081

Perkembangan Uji Geser Langsung Skala Ukuran Besar untuk Material Acak Bendungan di Indonesia

Andhika Sahadewa
Kelompok Keahlian Rekayasa Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan,
Institut Teknologi Bandung, Bandung
sahadewa@itb.ac.id

Received: 12 Desember 2024 Revised: 13 Februari 2025 Accepted: 24 Februari 2025

Abstract

Dams offer various benefits to life. In the last decade, Indonesia built above 50 dams. These dams majorly are built from geomaterial fill, including random materials. Random materials are very economical and have a low environmental bad impact, so their use tends to be maximized. Zones of random material often affect dam stability. Unfortunately, the evaluation of random material shear strength, a crucial parameter for dam stability analysis, is challenging. The large particles in random materials become an obstacle in shear strength tests using regular size apparatus. In Indonesia, there are several large-scale direct shear test facilities in laboratory and field to reliably test random material shear strength. Each laboratory test facility is owned by Technical Implementation Unit for Hydraulics and Water Geotechnics, PT. Indra Karya (Persero), and River Basin Organization for Bengawan Solo. The field test facility, called ILSDS, was devised by the Indonesian Geotechnical Inztitute in cooperation with Institut Teknologi Bandung and Universiti Teknologi Malaysia. This paper introduces these facilities and presents the results of ILSDS tests on random materials in Rukoh Dam, Aceh. The test results showed variability in shear strength as well as a unique behavior in the stress-strain relationship related to the random material content itself, such as large-grain rich or fine-grain rich materials. This large-scale testing is cost-effective, simple, and reliable. It is greatly recommended as a regular practice in a dam construction.

Keywords: *Dam, shear strength, random material, large-scale test*

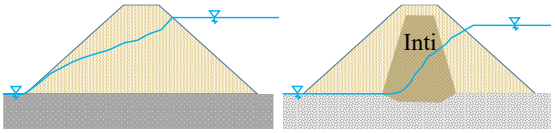
Abstrak

Bendungan menawarkan berbagai keuntungan bagi kehidupan. Satu dekade terakhir, Indonesia membangun lebih dari 50 bendungan. Bendungan tersebut mayoritas dibangun dari timbunan geomaterial, termasuk material acak. Material acak sangat ekonomis dan berdampak buruk rendah bagi lingkungan sehingga penggunaannya cenderung dimaksimalkan. Zona material acak seringkali mempengaruhi stabilitas bendungan. Sayangnya, kekuatan geser material acak, bagian penting dalam analisis kestabilan dam, sulit untuk dievaluasi secara valid. Partikel berukuran besar dalam material ini menjadi kendala pada uji kuat geser dengan ukuran biasa. Di Indonesia, terdapat beberapa fasilitas uji geser langsung skala ukuran besar di laboratorium dan lapangan untuk menguji kekuatan geser material acak dengan andal. Fasilitas uji laboratorium masing-masing dimiliki oleh Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan, PT. Indra Karya (Persero), dan Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Fasilitas uji lapangan bernama ILSDS dikembangkan oleh Indonesian Geotechnical Inztitute dengan dukungan Institut Teknologi Bandung dan Universiti Teknologi Malaysia. Tulisan ini memperkenalkan fasilitas-fasilitas tersebut dan menyajikan hasil uji ILSDS pada material acak di Bendungan Rukoh, Aceh. Hasil pengujian menunjukkan variabilitas kekuatan geser dan juga perilaku unik hubungan tegangan-regangan yang diperkirakan terkait kandungan material acak itu sendiri, seperti material kaya butiran besar atau halus. Pengujian skala ukuran besar ini hemat biaya, sederhana, dan andal. Uji ini sangat direkomendasikan menjadi bagian rutin konstruksi bendungan.

Kata kunci: *Bendungan, kuat geser, material acak, uji skala besar*

Pendahuluan

Bendungan memiliki banyak manfaat, di antaranya sebagai sarana untuk pembangkit listrik tenaga air, pasokan air irigasi, pengendalian banjir, dan pelayaran. Lebih dari 50 bendungan dibangun di Indonesia sebagai proyek strategis nasional dalam satu dekade terakhir. Sebagian besar dibangun sebagai bendungan timbunan/urugan tanah (*i.e.*, *earthfill dam*). Salah satu jenis bendungan ini adalah bendungan timbunan terzonasi. Bendungan timbunan terzonasi memungkinkan tiap jenis material ditempatkan pada zonanya masing-masing (Gambar 1). Zonasi material dipilih berdasarkan material yang ekonomis, memenuhi persyaratan stabilitas, dan menghambat rembesan. Salah satu zona timbunan bendungan adalah zona khusus untuk penempatan material acak (*random material*).



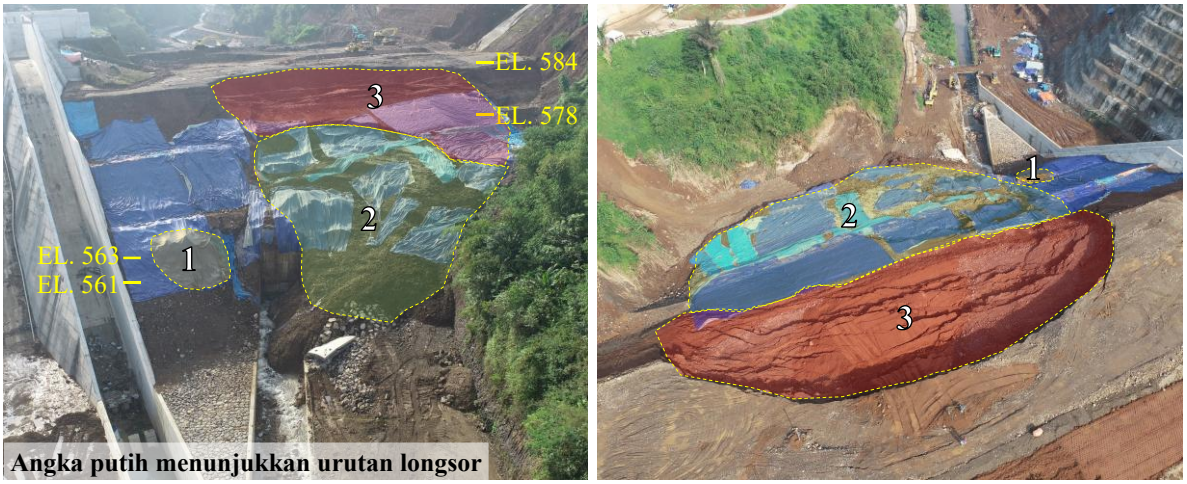
Gambar 1. Bendungan timbunan tanah: (a) homogen dan (b) terzonasi

Material acak biasanya dikumpulkan dari hasil galian bendungan atau dari sumber galian di lokasi lain. Besar kecilnya zona material acak menjadi faktor penting dalam meminimalkan biaya konstruksi. Pemilihan sumber material acak umumnya tidak terlalu ketat, mudah diperoleh, dan tidak perlu dari banyak sumber sehingga mengurangi kerusakan lingkungan. Penggunaan material acak memberikan tantangan pada konstruksi bendungan di balik keunggulan yang ditawarkan. Material acak mempunyai penyusun yang bervariasi dari tanah kohesif yang sangat halus hingga bongkahan batu dengan berbagai macam tingkat pelapukan. Butir berukuran besar dalam material acak tidak dapat disertakan dalam pengujian kuat geser dengan alat berukuran biasa. Kuat geser material acak menjadi tidak representatif jika dievaluasi menggunakan alat tersebut.

Kuat geser material bumi (*i.e.,* geomaterial), termasuk material acak, adalah salah satu parameter krusial dalam rekayasa geoteknik. Berbagai analisis geoteknik, seperti daya dukung tanah, kestabilan lereng, dan tekanan tanah lateral membutuhkan nilai kuat geser tanah. Sejak kelahiran mekanika tanah, berbagai metode evaluasi parameter kuat geser telah dikembangkan untuk dilakukan di laboratorium dan lapangan. Uji triaksial, geser langsung (*direct shear*), tekan tak terkekang (*uncofined compression*), geser sederhana langsung (*direct simple shear*), dan geser baling-baling (*vane shear*), adalah sebagian uji yang dapat dilakukan di laboratorium. Di lapangan, kuat geser dapat dievaluasi menggunakan uji geser langsung, geser baling-baling, geser lubang bor, dan penetrometer saku. Pengujian yang telah disebutkan perlu dimodifikasi sehingga dapat mengakomodasi partikel besar dalam material acak. Pengujian skala ukuran besar di lapangan sangat menarik untuk mengevaluasi sifat material acak dengan baik dan andal. Selain itu, pengujian ini dapat menilai secara langsung kinerja pemadatan lapangan.

Ketidakstabilan lereng dapat muncul di zona material acak pada bendungan. Pembangunan Bendungan X di Indonesia memberi contoh kasus kegagalan zona timbunan material acak. Bagian hilir Bendungan X mengalami keruntuhan lereng beruntun sebanyak 3 kali (Gambar 2). Peristiwa kelongsoran, investigasi, dan mitigasi longsor Bendungan X dilaporkan oleh Sahadewa *et al*. (2022) secara detail. Sejak peristiwa kelongsoran tersebut, evaluasi material acak pada konstruksi bendungan di Indonesia menjadi lebih ketat. Kuat geser material acak harus diuji menggunakan metode yang tepat dan sesuai, yaitu metode yang dapat mengakomodasi partikel berukuran besar.

Artikel ini bertujuan mengkaji fasilitas di Indonesia yang tepat dan sesuai untuk pengujian kuat geser material acak bendungan, yaitu uji geser langsung skala ukuran besar laboratorium dan lapangan. Keunggulan dan kekurangan masing-masing pengujian di laboratorium dan lapangan dijelaskan agar dapat dipilih uji yang sesuai kebutuhan. Sejak 1980-an, perkembangan uji geser langsung skala ukuran besar di Indonesia terfokus pada laboratorium. Kekurangan dari uji laboratorium adalah persiapan sampel yang tidak menggunakan alat pemadatan yang serupa alat saat konstruksi di lapangan. Dengan demikian, hasil uji laboratorium belum tentu menggambarkan kondisi di lapangan. Untuk memperbaiki kekurangan uji laboratorium tersebut, sejak tahun 2020, penulis bersama Indonesian Geotechnical Inztitute (IGI), Institut Teknologi Bandung (ITB), dan Universiti Teknologi Malaysia (UTM) mengembangkan uji geser langsung skala ukuran besar yang dapat digunakan di lapangan secara langsung (*i.e., in-situ large scale direct shear* atau ILSDS). ILSDS dikembangkan untuk menguji material acak dalam kondisi terpadatkan oleh alat pemadatan saat konstruksi. Dengan demikian, hasil uji ILSDS lebih merepresentasikan kondisi material acak di lapangan dan dapat digunakan untuk memverifikasi nilai kuat geser material acak yang terpasang. Selain mengkaji alat uji geser langsung skala besar yang tersedia di Indonesia, studi ini juga bertujuan menunjukkan kinerja, hasil uji, dan kegunaan metode ILSDS.



(a) (b)

Gambar 2. Foto udara longsor di Bendungan X: (a) hilir dan (b) hulu (Sahadewa *et al.*, 2022)

Metode

Metode uji geser langsung digunakan sebagai prinsip dan landasan pengembangan uji ILSDS dalam studi ini. Dasar teori kuat geser dan metode uji geser langsung dipaparkan pada bagian ini sebagai referensi utama pengembangan metode uji ILSDS. Bagian ini juga memaparkan fasilitas-fasilitas uji geser langsung skala besar versi laboratorium yang sebelumnya sudah ada di Indonesia dan sesuai untuk pengujian material acak. Keunggulan dan kelemahan fasilitas-fasilitas tersebut dijelaskan pada bagian ini. Kelemahan alat-alat versi laboratorium dalam persiapan sampel uji menjadi motivasi dalam pengembangan metode ILSDS. Metode kerja dan prosedur pengujian ILSDS dijelaskan secara detail pada bagian Uji Geser Langsung Skala Ukuran Besar Lapangan.

Kuat geser geomaterial

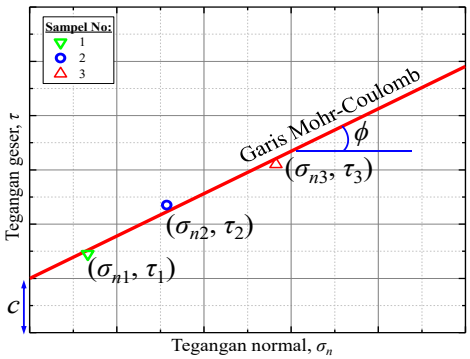
Kuat geser geomaterial (τ_s) diperlukan untuk mengetahui kemampuan material tersebut saat menerima tegangan geser akibat beban. Kuat geser ini seringkali direpresentasikan oleh kriteria garis keruntuhan Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776; dan Mohr, 1900). Garis tersebut merupakan fungsi dari 3 parameter, yaitu kohesi (c), sudut geser dalam /*angle of internal friction* (φ), dan tegangan normal (σ_n) sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3 dan Persamaan 1. Sumber internal kuat geser geomaterial bersumber pada c dan φ berdasarkan Mohr-Coulomb. Sementara, σ_n menggambarkan faktor eksternal, yaitu kondisi tegangan normal yang mengukung geomaterial. Persamaan 1, dalam kondisi kuat geser efektif, perlu disesuaikan terhadap tekanan air pori (u) sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan 2 dan 3.

$$\tau_s = c + \sigma_n \tan(\varphi) \quad (1)$$

$$\tau'_s = c' + \sigma'_n \tan(\varphi') \quad (2)$$

$$\sigma'_n = \sigma_n - u \quad (3)$$

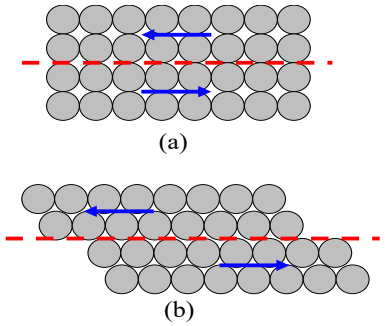
dengan c', φ', dan σ'_n, secara berturut-turut, adalah ekuivalen dari c, φ, dan σ_n pada kondisi efektif.



Gambar 3. Garis keruntuhan Mohr-Coulomb

Kohesi pada geomaterial dapat berupa kohesi asli maupun kohesi semu (Mitchell, 1993). Kohesi asli merupakan ikatan antara partikel penyusun geomaterial, seperti sementasi, elektrostatik, dan adhesi. Kohesi semu dapat berasal dari tekanan air pori negatif, tekanan air pori berlebih karena dilasi, dan gaya mekanis semu. Mitchell (1993) menjelaskan bahwa sudut geser dalam geomaterial bergantung pada karakter friksi dari partikel dan saling kunci (*i.e.*, *interlocking*) antar partikel penyusun geomaterial. Hal-hal tersebut bergantung pada mineralogi, bentuk, dan gradasi partikel geomaterial.

Kegagalan geser (*shear failure*) pada geomaterial terjadi ketika tegangan geser cukup besar untuk membuat material penyusunnya menggelinding atau bergeser satu sama lainnya (Gambar 4). Pecahnya butiran tidak selalu diperlukan untuk menyebabkan kegagalan geser.



Gambar 4. Ilustrasi kegagalan geser: (a) sebelum dan (b) sesudah

Uji geser langsung

Uji geser langsung merupakan salah satu metode untuk mengevaluasi kuat geser tanah. Menurut Boudia *et al*. (2021), uji geser langsung diyakini sebagai metode evaluasi kuat geser tanah yang muncul pertamakali. Coulomb memang dipercaya oleh banyak pihak sebagai pencetus teori kuat geser tanah. Namun, siapa yang menjadi perintis peralatan uji geser langsung masih menjadi perdebatan. Alexandre Collin, insinyur Perancis, tercatat mengembangkan alat uji geser langsung di tahun 1846 (Skempton, 1949). Collin menggunakan boks geser (*shear box*) sepanjang 35 cm untuk menampung sampel tanah lempung 4 cm x 4 cm. Kemudian di tahun 1915, Arthur Langtry Bell, insinyur Inggris, mengembangkan alat uji geser langsung untuk menguji berbagai jenis tanah (Skempton, 1958). Pada tahun 1932, Arthur Casagrande menciptakan alat uji geser langsung yang menjadi basis alat serupa di zaman modern (Matthews, 1988).

Uji geser langsung dengan metode kontrol tegangan diperkenalkan di tahun 1934 (Shamanna dan Santhosh, 2012). Dalam metode ini, beban diaplikasikan secara bertahap untuk meningkatkan tegangan pada sampel. Namun, metode ini sulit dilakukan karena membutuhkan teknisi berpengalaman untuk memperkirakan besar beban saat keruntuhan. Selanjutnya di tahun 1936, Glennon Gilboy memperkenalkan peralatan uji geser langsung dengan metode kontrol regangan atau perpindahan (Matthews, 1988). Metode kontrol perpindahan banyak diterapkan pada uji geser langsung di masa kini. Vickers (1983) menyampaikan prosedur uji geser langsung untuk kondisi teralirkan (*drained*) atau tidak teralirkan (*undrained*). Bro *et al*. (2013) menunjukkan bahwa secara praktis uji geser langsung adalah uji teralirkan karena terjadi perubahan volume. Aplikasi tegangan geser yang relatif cepat pun tetap memicu terjadinya perubahan volume yang tidak bisa diabaikan (Bro *et al*., 2013). Uji geser sederhana langsung (*direct simple shear*), yang dilengkapi kontrol volume aktif maupun pasif, lebih tepat digunakan untuk mengevaluasi kuat geser dalam kondisi tak teralirkan.

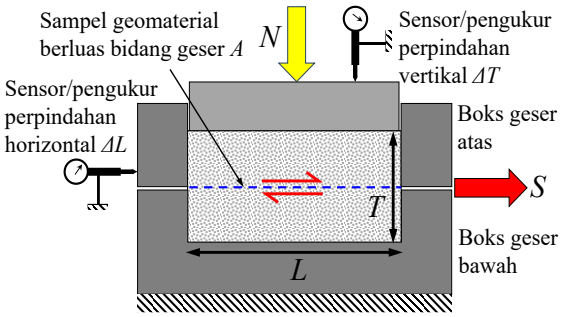
Arthur Casagrande juga mengembangkan alat uji triaksial di tahun 1930-an (Lade, 2016). Alat ini dapat menanggulangi keterbatasan alat uji geser langsung. Terlepas dari munculnya alat lain untuk mengevaluasi kuat geser geomaterial, uji geser langsung tetap populer hingga kini karena beberapa keunggulan yang dimilikinya, yaitu: 1) pengujian cepat, 2) peralatan uji simpel dan sederhana, 3) biaya pengujian ekonomis, dan 4) persiapan sampel tanah berbutir lebih mudah dibandingkan persiapan sampel serupa pada uji triaksial.

Kekurangan dari uji geser langsung di antaranya adalah: 1) kontrol drainase air pori tanah terbatas dan hanya bisa dilakukan dengan mengatur kecepatan pergeseran, 2) tekanan air pori tidak dapat diukur saat pengujian, 3) pergeseran dipaksa terjadi pada sebuah bidang yang belum tentu merupakan bidang geser terlemah, dan 4) sampel dapat mengalami konsentrasi tegangan pada bagian tertentu sehingga regangan tidak seragam

Pengujian geser langsung di Indonesia umumnya dilakukan berdasarkan American Standard Testing and Material (ASTM) D3080/D3080M-23, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) T 236-22, dan British Standards (BS) 1377-2:2022. Panduan uji geser langsung untuk sampel ukuran reguler merekomendasikan rasio antara tebal dan lebar sampel adalah ≤ 1/2. Selain itu, direkomendasikan rasio ukuran butir maksimum dan tebal sampel adalah ≤ 1/6.

Pengujian geser langsung di laboratorium dilakukan menggunakan sampel geomaterial yang ditempatkan dalam boks geser (Gambar 5). Sampel memiliki tinggi T, panjang sisi 60 mm – 75 mm, dan bidang geser berpenampang seluas A. Sampel diberi beban vertikal sebesar N sehingga menyebabkan tegangan normal yang dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$\sigma_n = N/A \tag{4}$$



Gambar 5. Skema uji geser langsung

Tegangan normal tersebut dijaga konstan selama pengujian. Gaya horizontal (S) diterapkan secara meningkat pada sampel sehingga terjadi tegangan geser (τ) yang dihitung menggunakan Persamaan 5. Pertambahan nilai gaya S dipilih berdasarkan 2 metode, yaitu kontrol regangan atau tegangan. Metode kontrol regangan dilakukan sehingga nilai pertambahan regangan geser (δ) yang terjadi pada sampel terjaga. Metode kontrol regangan memberi peluang untuk mempelajari perilaku *post-peak* dengan benar. Regangan geser diperoleh dari perbandingan perpindahan horizontal (ΔL) terhadap tebal awal sampel (T) sebagaimana ditunjukkan oleh Persamaan 6.

$$\tau = S/A \tag{5}$$

$$\delta = \Delta L/T \tag{6}$$

Jika metode kontrol tegangan dipilih, laju peningkatan tegangan geser yang terjadi pada sampel dijaga konstan. Das (2009) menyampaikan bahwa metode kontrol tegangan lebih mungkin menyerupai kondisi pembebanan di lapangan.

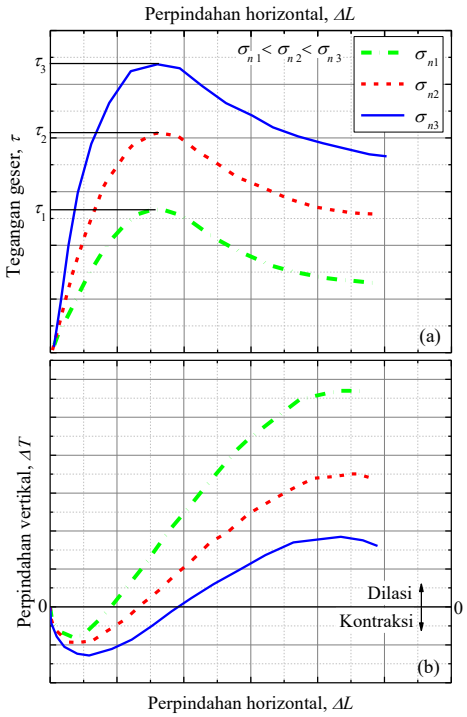
Pada setiap pengujian dilakukan pencatatan variasi nilai N, S, dan ΔL terhadap waktu secara sinkron. Parameter tersebut dapat diolah untuk mendapatkan σ_n, τ, dan δ. Selain itu, dilakukan pencatatan perpindahan atau deformasi vertikal (ΔT). Dengan demikian, dapat dievaluasi nilai regangan aksial (ε) yang merupakan perbandingan perpindahan vertikal terhadap tinggi sampel awal (T), yaitu:

$$\varepsilon = \Delta T/T \tag{7}$$

Uji ini dilakukan menggunakan sekurang-kurangnya 3 sampel geomaterial serupa. Setiap sampel diberi nilai σ_n yang berbeda satu sama lainnya. Dengan demikian, variasi tegangan normal terhadap kuat geser atau tegangan geser maksimum dapat dievaluasi untuk memperoleh garis keruntuhan Mohr-Coulomb.

Gambar 6 memperlihatkan contoh hasil uji geser langsung pada 3 sampel pasir padat yang disiapkan dengan kepadatan serupa. Hubungan perpindahan horizontal dan tegangan geser untuk berbagai nilai σ_n ditampilkan pada Gambar 6a. Sebagai alternatif, sumbu perpindahan horizontal juga dapat digantikan oleh regangan geser. Hubungan ini digunakan untuk mengevaluasi nilai tegangan geser maksimal (τ_{max}). Nilai τ_{max} meningkat seiring dengan bertambahnya nilai σ_n. Nilai τ_{max} dipasangkan dengan σ_n terkait untuk memperoleh memperoleh parameter garis keruntuhan Mohr-Coulomb (Gambar 3).

Hubungan perpindahan horizontal dan deformasi vertikal untuk berbagai nilai σ_n ditampilkan pada Gambar 6b. Perilaku perubahan volume sampel saat mengalami tegangan geser dapat dievaluasi menggunakan hubungan perpindahan horizontal dan vertikal. Gambar 6b menunjukkan bahwa pada awal penerapan tegangan geser terjadi kontraksi (kompresi) atau volume sampel menyusut. Sampai nilai regangan geser tertentu, sampel berbalik mengalami dilasi atau penambahan volume. Saat mendekati nilai tegangan geser maksimum, sampel mengalami penambahan volume yang lebih besar dari volume awalnya. Penambahan volume ini terjadi saat butir memanjat butiran lainnya sehingga pori tanah membesar. Semakin besar nilai σ_n, peningkatan volume semakin sulit terjadi. Perilaku ini cenderung dialami oleh tanah berbutir pada kondisi kepadatan relatif tinggi, dengan catatan butiran tidak pecah. Tanah berbutir halus pada kondisi terkonsolidasi berlebihan (*overly consolidated*/OC) juga memiliki perilaku serupa. Jika sampel terbebani σ_n yang sangat tinggi, sampel tersebut dapat selalu mengalami kompresi saat pengujian. Pada tegangan normal sangat tinggi, kemungkinan mekanisme butir menggelinding di atas butiran lainnya sulit terjadi. Butir cenderung menjadi pecah pada tegangan tinggi tersebut.



Gambar 6. Contoh hasil uji geser langsung: (a) perpindahan horizontal-tegangan geser (b) perpindahan horizontal-perpindahan vertikal

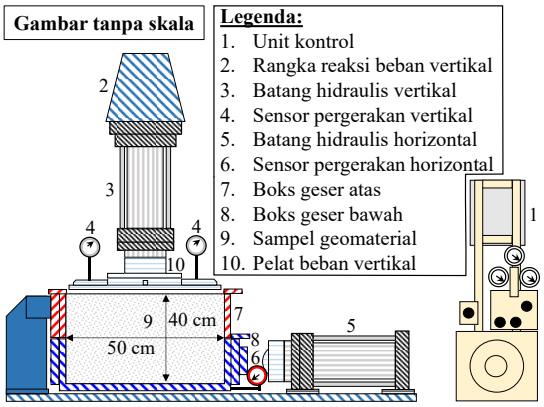
Uji geser langsung juga digunakan secara terbatas untuk mengevaluasi kuat geser batu yang sangat rendah (*i.e.*, *weak rock*). Uji ini merupakan standar praktis untuk mengevaluasi kuat geser diskontinuitas pada batu. Dalam hal ini, diskontinuitas batu diletakan paralel tepat pada bidang geser boks geser.

Uji geser langsung skala ukuran besar laboratorium

Kuat geser geomaterial dapat dievaluasi secara langsung di laboratorium dan lapangan. Namun, evaluasi kuat geser material acak menggunakan uji laboratorium atau lapangan dengan ukuran sampel biasa tidak dapat memberikan hasil yang andal. Hal ini terkait dengan keberadaan butiran berukuran besar dalam material acak. Tipikal ukuran efektif diameter partikel maksimum dalam material acak umumnya berada antara 100 mm hingga 150 mm sehingga pengujian tidak mungkin dilakukan menggunakan uji geser langsung laboratorium ukuran reguler. Matsuoka *et al*. (2001) menyatakan bahwa perlu dilakukan penyesuaian terhadap distribusi ukuran butiran asli di lapangan jika kuat geser material dengan kandungan butiran besar akan dievaluasi menggunakan perangkat laboratorium ukuran biasa. Metode penyesuaian distribusi ukuran butiran ini dapat berdampak besar pada hasil uji (Wang *et al.*, 2013 dan Wang *et al*., 2015). Sebagai contoh rekomendasi ukuran sampel uji, diameter spesimen setidaknya harus 4 kali lebih besar dari ukuran butir terbesar untuk uji triaksial (The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1982). Matsuoka *et al*. (2001) mengkonfirmasi bahwa rekomendasi triaksial ini juga dapat digunakan untuk uji geser langsung skala besar di lapangan.

Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan (BHGK), PT. Indra Karya (Persero), dan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo memiliki fasilitas uji geser langsung skala besar laboratorium. BHGK di Bandung dan BBWS Bengawan Solo di Surakarta dimiliki Kementerian Pekerjaan Umum. Fasilitas milik BHGK dan Indra Karya sangat sesuai untuk laboratorium lapangan proyek karena mudah dipindahkan. Fasilitas milik BBWS Solo terletak permanen di laboratorium mekanika tanah yang bersangkutan. Fasilitas milik Indra Karya dan BBWS Bengawan Solo menawarkan uji dilakukan dalam keadaan jenuh terendam atau tidak jenuh. Fasilitas milik BHGK hanya dapat melakukan uji dalam keadaan tidak jenuh. Uji laboratorium milik ketiga institusi ini menawarkan persiapan sampel uji dalam kondisi yang lebih terkontrol dan mudah dibandingkan persiapan di lapangan sehingga uji laboratorium sangat sesuai untuk melakukan studi parameter. Misalnya, uji laboratorium ini baik untuk mempelajari efek ukuran distribusi partikel atau kepadatan relatif terhadap kuat geser tanah. Uji laboratorium juga dinilai praktis untuk mengevaluasi kelayakan kuat geser material dari suatu sumber (*quarry*) sebelum masa konstruksi.

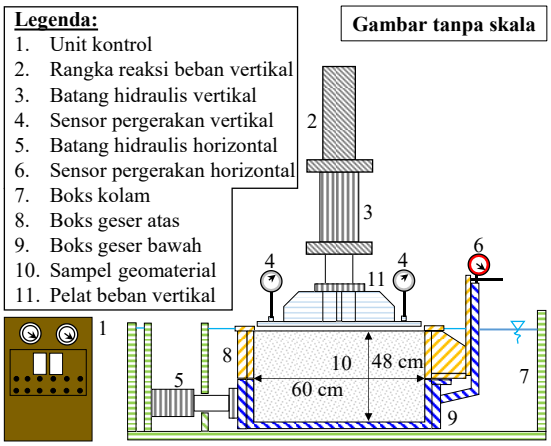
Fasilitas uji geser BHGK mampu mengevaluasi kuat geser sampel geomaterial dengan ukuran penampang geser 50 cm x 50 cm dan tebal 40 cm (Gambar 7). Japan International Cooperation Agency (JICA) menghibahkan alat ini tahun 1980-an. Fasilitas ini merupakan salah satu uji geser langsung skala besar yang pertama beroperasi di Indonesia. Rangka reaksi beban vertikal pada alat ini menjadi satu sistem dengan batang hidraulis vertikal dan pelat beban vertikal. Sistem beban vertikal ini dapat digeser untuk mempermudah persiapan sampel geomaterial di dalam boks geser. Sampel dalam boks geser dipadatkan menggunakan pemadat manual. Unit kontrol digunakan untuk mengatur sistem batang hidraulis vertikal dan horizontal. Unit kontrol juga mampu menampilkan informasi nilai tekanan hidraulis. Batang hidraulis vertikal bergerak ke bawah untuk memberi tegangan normal pada sampel. Alat ini mampu memberi gaya vertikal normal mulai dari 5 kN hingga 60 kN. Penurunan vertikal yang terjadi karena aplikasi tegangan normal diukur melalui sensor pergerakan vertikal. Pergerakan vertikal sampel dipantau pada 4 titik di permukaan pelat beban. Batang hidraulis horizontal bergerak untuk mendorong boks geser bawah. Pegerakan horizontal dapat diatur mulai dari 2 hingga 20 mm/menit. Gaya horizontal yang diaplikasikan sebesar 5 kN hingga 100 kN. Pergerakan horizontal sampel dipantau pada 2 titik di dinding boks geser bawah.



Gambar 7. Alat uji geser langsung skala besar laboratorium BHGK

Alat uji geser Indra Karya dapat digunakan untuk sampel dengan ukuran penampang geser 60 cm x 60 cm setebal 48 cm (Gambar 8). Alat ini diklaim mampu menguji material dengan ukuran diameter partikel maksimal 200 mm. Kapasitas maksimal tegangan normal alat ini sebesar 2000 kPa atau ekuivalen dengan tinggi bendungan sekitar 100 m. Serupa dengan fasilitas milik BHGK, rangka reaksi beban vertikal menjadi satu unit dengan batang hidraulis vertikal dan pelat beban vertikal. Sistem beban vertikal ini dapat digeser ke arah belakang untuk mempermudah persiapan sampel geomaterial dalam boks geser. Pemadatan sampel dalam boks dilakukan menggunakan mesin pemadat getar

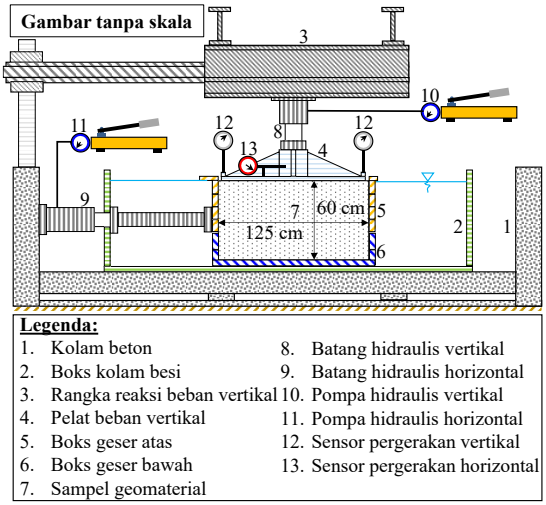
elektrik. Pelaksanaan uji dilakukan menggunakan unit kontrol yang mengatur sistem batang hidraulis vertikal dan horizontal serta memonitor nilai tekanan hidraulis keduanya. Batang hidraulis vertikal bergerak ke bawah untuk memberi tegangan normal pada sampel geomaterial. Penurunan vertikal yang terjadi karena aplikasi tegangan normal diukur melalui sensor pergerakan vertikal. Batang hidraulis horizontal bergerak untuk mendorong boks geser bawah. Pergerakan vertikal dan horizontal sampel dipantau menggunakan masing-masing sensor pergerakan terkait.



Gambar 8. Alat uji geser langsung skala besar laboratorium Indra Karya

Fasilitas uji milik BBWS Bengawan Solo merupakan salah satu yang terbesar di Indonesia dengan sampel berluas penampang geser 125 cm x 125 cm dan tebal 60 cm (Gambar 9). Alat ini ditempatkan pada sebuah kolam beton permanen. Sistem beban vertikal terdiri atas rangka reaksi beban vertikal, batang hidraulis vertikal, dan pelat beban vertikal. Sistem ini dapat digeser untuk memberi ruang saat persiapan sampel di boks geser. Sampel dalam boks ini juga dipadatkan menggunakan mesin pemadat getar elektrik. Setelah sampel siap, sistem beban vertikal diposisikan di atas boks geser. Uji dimulai dengan menerapkan tegangan normal via pompa hidraulis vertikal. Sensor pergerakan vertikal dimonitor untuk memantau penurunan yang terjadi. Tegangan geser pada sampel diaplikasikan dengan mendorong boks geser atas via pompa hidraulis horizontal. Pergerakan sampel ditinjau melalui sensor pergerakan horizontal maupun vertikal. Rangkaian uji geser langsung skala besar di BBWS Bengawan Solo umumnya dilakukan pada tegangan normal yang ekuivalen dengan beban 98 kN, 196 kN, dan 294 kN. Uji dilaksanakan dengan kontrol regangan sebesar 0,5 mm/menit.

Sampel pada fasilitas milik BHGK, Indra Karya, dan BBWS Bengawan Solo dipadatkan menggunakan alat yang berbeda dari alat di lapangan. Pemadatan di lapangan umumnya dilakukan menggunakan alat-alat berat yang memiliki energi pemadatan jauh lebih besar daripada energi pemadatan laboratorium. Padahal, energi pemadatan sangat mempengaruhi kondisi akhir material. Dengan demikian, fasilitas uji geser di laboratorium relatif sulit untuk mengevaluasi dampak pemadatan lapangan terhadap kuat geser material dengan tepat.

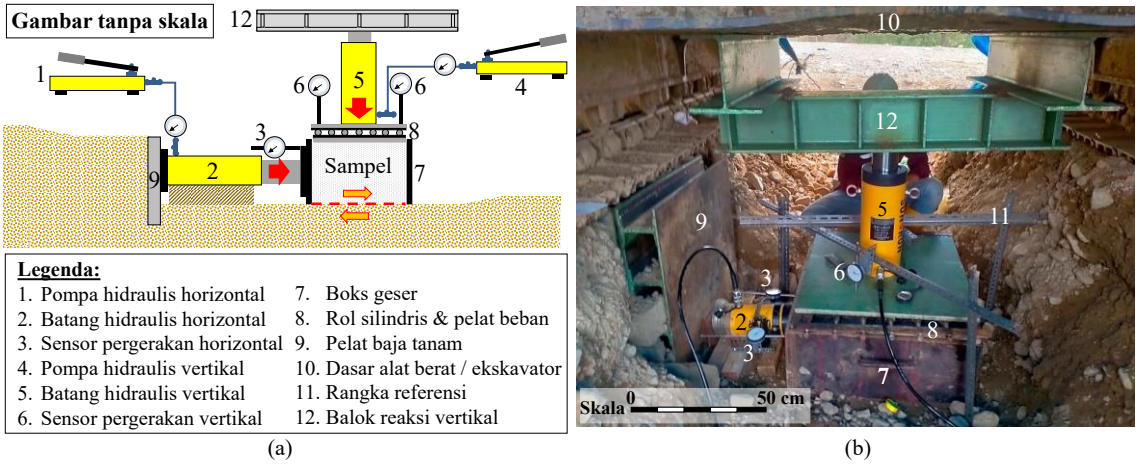


Gambar 9. Alat uji geser langsung skala besar laboratorium BBWS Bengawan Solo

Uji geser langsung skala ukuran besar lapangan

Uji kuat geser secara langsung di lapangan menjadi salah satu metode untuk mengevaluasi pengaruh pemadatan aktual di lapangan terhadap kuat geser. *In-situ Large Scale Direct Shear* (ILSDS) dikembangkan oleh IGI dengan dukungan dari ITB dan UTM. Metode uji ini menawarkan beberapa keunggulan, yaitu: 1) menyertakan butir ukuran besar, 2) mempertimbangkan kinerja pemadatan lapangan, dan 3) memverifikasi kuat geser material acak yang terpasang di lapangan. Uji geser langsung skala besar laboratorium tidak memiliki 2 keunggulan terakhir yang disebutkan.

Metode ILSDS ini terinspirasi dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Matsuoka *et al.* (2001), Liu (2009), dan Wang *et al.* (2016). Perangkat ILSDS terdiri dari boks geser berukuran 70 cm x 70 cm x 30 cm, satu set pengukur perpindahan horizontal dan vertikal, serta satu set pompa dan batang hidraulis horizontal dan vertikal. ILSDS juga tersedia dengan boks geser berukuran 80 cm x 80 cm x 30 cm. Gambar 10 memperlihatkan skema uji ILSDS dan contoh aplikasinya di Bendungan Rukoh, Aceh. Dalam artikel ini dibahas kinerja dan hasil evaluasi kuat geser material acak di bendungan tersebut menggunakan uji ILSDS.



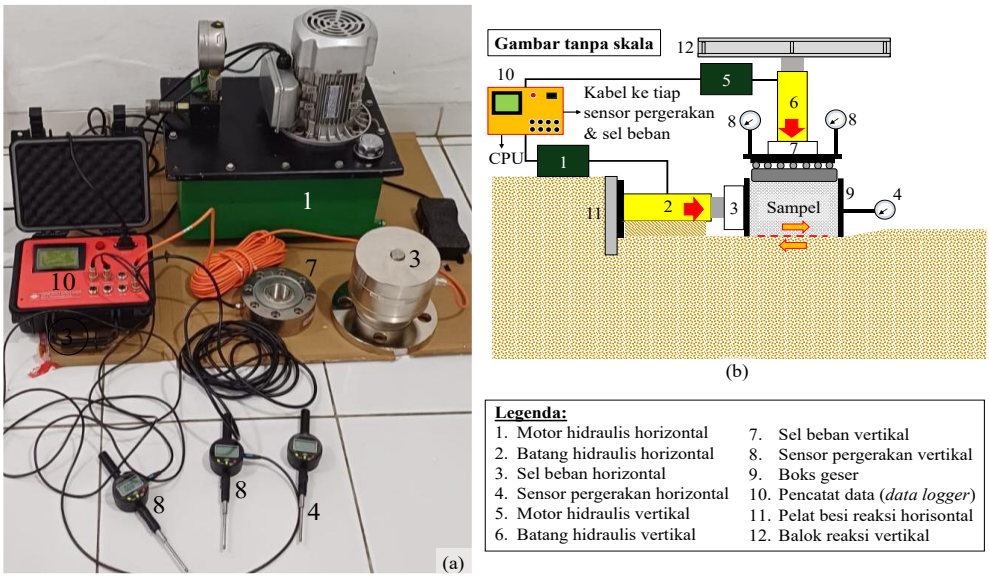
Gambar 10. Uji ILSDS material acak di Bendungan Rukoh: (a) skema uji dan (b) pelaksanaan lapangan

Gambar 11. Persiapan pengujian: (a) penggalian lubang uji, (b) pemasangan boks geser, (c) instalasi balok reaksi vertikal, dan (d) pemeriksaan sensor pergerakan dan sistem hidraulis

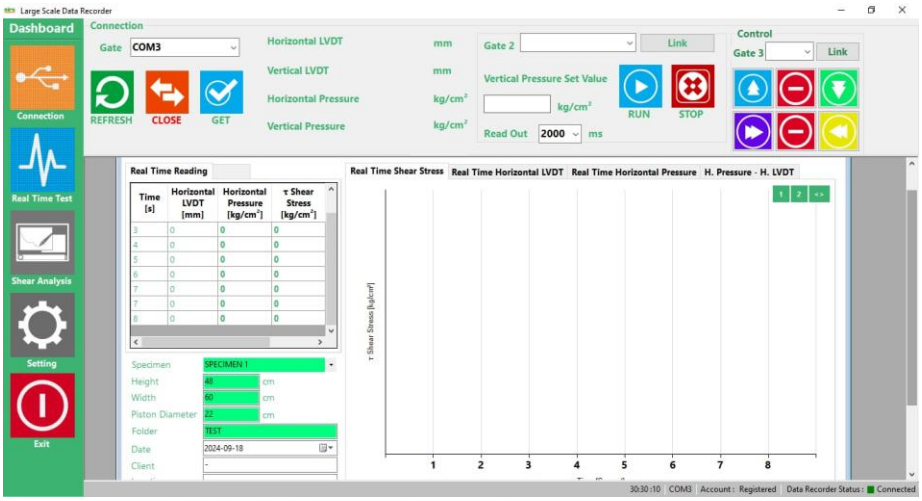
Pada uji ILSDS, setidaknya 3 sampel disiapkan dengan cara menggali dan memahat timbunan yang telah terpadatkan (Gambar 11a). Boks geser dipasang pada setiap sampel (Gambar 11b). Ekskavator digunakan sebagai alat bantu instalasi balok reaksi vertikal dan pelat baja tanam (Gambar 11c). Sensor pergerakan dan sistem hidraulis diperiksa sebelum pengujian (Gambar 11d). Beban horizontal dan vertikal diterapkan secara manual menggunakan sepasang pompa hidraulis. Sampel pertama dibebani dengan tegangan normal menggunakan batang hidraulis vertikal. Tegangan normal ini dijaga konstan sepanjang durasi pengujian. Beban horizontal secara meningkat diterapkan pada sampel ini hingga terjadi keruntuhan. Penambahan beban horizontal dilakukan dengan menjaga laju tegangan geser (*i.e., stress-controlled test*). Sampel lainnya diuji dengan cara yang sama pada tegangan vertikal normal yang lebih besar. Persiapan sampel uji geser langsung skala besar di lapangan cenderung sulit, memerlukan waktu lama, menghabiskan biaya tinggi, serta membutuhkan bantuan tenaga kerja banyak dan alat berat.

Uji geser langsung skala ukuran besar lapangan digital otomatis

Indonesian Geotechnical Inztitute dan ITB sedang mengembangkan alat uji ILSDS versi digital otomatis yang dinamakan sebagai ILSDS *Next Gen* (NG). Gambar 12 memperlihatkan peralatan dan skema uji terkait. ILSDS NG dilengkapi dengan motor hidraulis horizontal dan vertikal untuk memberikan tegangan geser dan normal pada sampel.



Gambar 12. ILSDS NG: (a) peralatan uji dan (b) skema uji



Gambar 13. Antarmuka perangkat lunak pengaturan dan operasi ILSDS NG

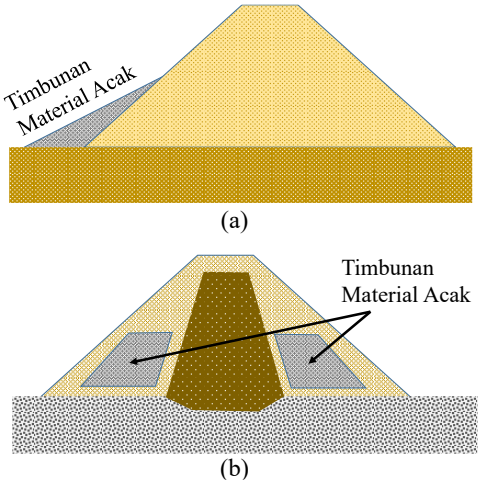
Setiap motor memiliki sistem monitor tekanan untuk umpan balik sehingga diketahui apakah gaya atau tekanan yang diaplikasikan sudah sesuai keinginan.

Kapasitas gaya horizontal dan vertikal ILSDS NG, secara berturut-turut, 980 kN dan 1960 kN. Nilai tegangan geser dan normal masing-masing dimonitor oleh sel beban horizontal dan vertikal. Jumlah sensor pergerakan yang dapat diakomodasi sistem ini adalah 4 untuk masing-masing arah horizontal dan vertikal. Sistem ini mampu merekam hingga 100 data per detik dari setiap sensor pergerakan dan sel beban. Metode uji yang ditawarkan sistem ini dapat berupa kontrol regangan dan tegangan. Pengaturan dan operasi alat ini dilakukan menggunakan program komputer dengan antarmuka yang ditunjukkan pada Gambar 13. ILSDS NG dipersiapkan untuk mulai beroperasi di awal 2025.

Penggunaan material acak di bendungan

Penggunaan material acak pada bendungan harus diawali dari investigasi lapangan dan pengujian laboratorium. Kegiatan ini diperlukan untuk mengevaluasi ketersediaan volume, kesesuaian material, dan zonasi bendungan yang tepat (U.S. Bureau of Reclamation, 2012). Material acak dapat terbentuk secara alami, seperti contohnya glasial, morain, tanah residual, dan koluvial. Material acak juga dapat dibuat oleh manusia, seperti misalnya agregat batu pecah. U.S. Bureau of Reclamation (2012) merekomendasikan penggunaan material acak untuk zona bendungan saat berat material merupakan kebutuhan utama, sedangkan kekuatan geser dan permeabilitas tidak terlalu penting asalkan kestabilan terpenuhi. Secara umum, material acak dapat ditempatkan di zona luar dan dalam (Gambar 14). Di zona luar, material acak dapat digunakan pada lereng datar sebagai alternatif

proteksi lereng dan penyeimbang pada kaki bendungan untuk meningkatkan stabilitas. Di zona dalam, material acak dapat ditempatkan di dalam tubuh bendungan untuk mengurangi biaya konstruksi. Di Indonesia, material acak digunakan secara ekstensif pada zona-zona bendungan yang memungkinkan sehingga biaya pembangunan menjadi lebih hemat. Material acak juga telah digunakan sebagai material inti bendungan yang kedap air. Penggunaan material acak untuk inti bendungan memerlukan evaluasi sifat geomaterial yang komprehensif, termasuk kuat geser.



Gambar 14. Contoh aplikasi timbunan material acak di bendungan: (a) luar dan (b) dalam (U.S. Bureau of Reclamation, 2012)

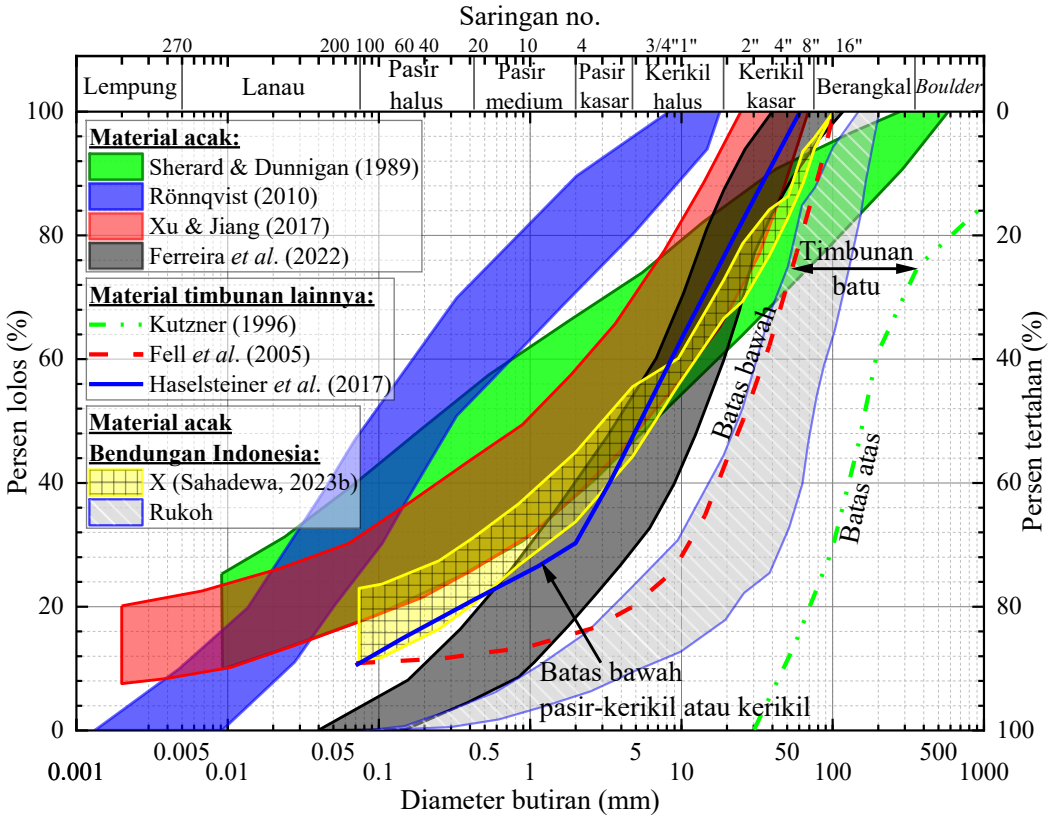
Penggunaan material acak berupa tanah glasial sebagai inti kedap air dilaporkan oleh Sherard dan Dunnigan (1989). Rönnqvist (2010) melakukan investigasi erosi internal yang terjadi pada material acak dari 40 bendungan di Swedia. Bendungan ini dibangun menggunakan morain glasial bergradasi lebar. Ma dan Chi (2016) membagikan pengalaman dalam mencampur kerikil kasar (50% – 65%) dan tanah kohesif halus (< 35%) untuk membangun inti kedap air di Bendungan Changheba, Tiongkok. Fu *et al*. (2020) merekomendasikan bahwa modifikasi campuran tanah halus kerikil dapat dilakukan dengan 30% – 50% kandungan kerikil untuk membangun inti bendungan setinggi 200 m – 300 m berdasarkan pengalaman dari konstruksi Bendungan Changheba, Bendungan Nuozhadu, dan pekerjaan bendungan lainnya di Tiongkok. Xu dan Jiang (2017) menyampaikan pengalaman membangun bendungan timbunan dengan inti batu menggunakan material acak bergradasi tinggi di Tiongkok. Ferreira *et al*. (2022) melaporkan penggunaan material acak berupa tanah residual dan koluvial untuk konstruksi inti Bendungan Manso, Brasil. Gambar 15 menyajikan distribusi ukuran butir material acak di berbagai bendungan yang telah disebutkan dan sebaran ukuran butir material acak di Bendungan X (Sahadewa, 2023b). Ukuran butir dari sampel material acak Bendungan Rukoh di sekitar lokasi uji ILSDS tahap 1 juga ditampilkan pada gambar tersebut. Partikel berukuran besar pada material acak di Bendungan Rukoh umumnya didominasi oleh batuan andesit.

Haselsteiner *et al*. (2017) menampilkan batas bawah gradasi butiran pasir-kerikil untuk material timbunan bendungan (Gambar 15). Gambar 15 juga menyajikan batas atas dan bawah gradasi butiran timbunan batuan yang dilaporkan, secara berturut-turut, oleh Kutzner (1996) dan Fell *et al*. (2005). Batas-batas gradasi tersebut menunjukkan bahwa material acak mempunyai distribusi ukuran butiran yang lebih bervariasi dibandingkan material timbunan batu dan pasir-kerikil. Gambar 15 juga menunjukkan bahwa sampel material acak pada Bendungan Rukoh berada antara batas bawah dan atas material timbunan batu.

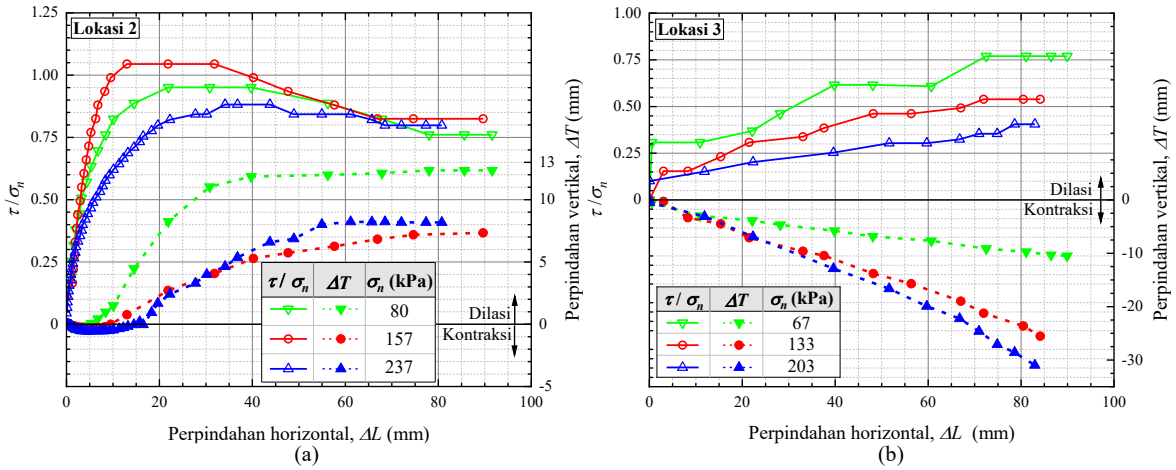
Hasil dan Pembahasan Uji ILSDS

Pada bagian ini dipaparkan uji ILSDS di Bendungan Rukoh, Aceh untuk menunjukkan kinerja, hasil, dan kegunaan uji ILSDS. Serangkaian uji ILSDS Tahap 1 dilakukan untuk menilai kuat geser material acak di 3 lokasi Bendungan Rukoh. Pelaksanaan uji ILSDS di masing-masing lokasi tersebut mengacu pada metode yang telah dijelaskan pada bagian Uji Geser Langsung Skala Ukuran Besar Lapangan. Di setiap lokasi, 3 sampel disiapkan untuk pengujian. Sebagai contoh, hasil pengujian dari Lokasi 2 dan 3 disajikan pada Gambar 16. Hubungan antara tegangan geser dan perpindahan vertikal terhadap perpindahan horizontal untuk tiga tegangan normal yang berbeda ditunjukkan pada gambar ini. Hasil dari semua lokasi secara konsisten menunjukkan bahwa kuat geser puncak meningkat seiring dengan tegangan normal. Hubungan antara perpindahan vertikal dan horizontal menunjukkan perilaku tekan atau kompresi sampel pada permulaan perpindahan horizontal di Lokasi 2. Pada perpindahan horizontal yang lebih besar hingga keruntuhan, perilaku ekspansif atau dilasi terjadi di lokasi ini. Perilaku serupa juga ditunjukkan oleh hasil pengujian di Lokasi 1. Perilaku sampel di kedua lokasi ini sesuai dengan perilaku pasir padat (Gambar 6). Material acak pada Lokasi 1 dan 2 didominasi oleh batuan andesit yang diambil dari berbagai sumber di luar lokasi bendungan. Sampel di Lokasi 3 mengalami perilaku kompresi pada seluruh rentang perpindahan horizontal di semua tegangan normal. Tanah berbutir dengan kepadatan relatif lepas atau tanah lempung terkonsolidasi normal (*normally consolidated*/NC) biasanya memiliki perilaku tegangan geser, perpindahan horizontal, dan perpindahan vertikal serupa dengan sampel Lokasi 3. Sumber material acak di Lokasi 3 adalah bekas

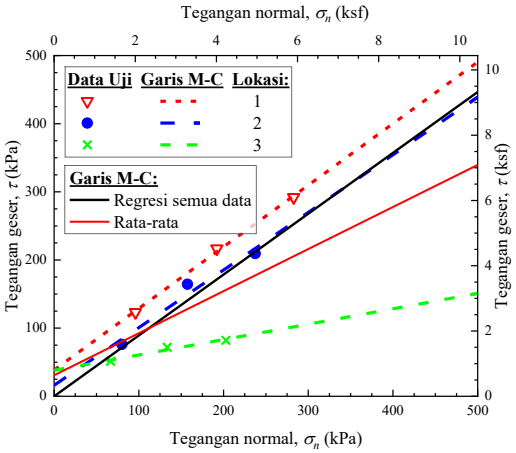
buangan pekerjaan galian Bendungan Rukoh. Material acak ini berupa pasir dengan butiran halus lempung dan lanau. Dengan demikian, butiran pada Lokasi 3 memiliki ukuran butiran yang jauh lebih kecil daripada material acak di Lokasi 1 dan 2. Hubungan kuat geser, perpindahan horizontal, dan tegangan normal di 3 lokasi digunakan untuk memperoleh variasi antara kuat geser puncak dan tegangan normal (Gambar 17). Di setiap lokasi, variasi ini didekati menggunakan garis linier M-C. Nilai kohesi bervariasi antara 16,1 kPa hingga 38,5 kPa dengan rata-rata 30,9 kPa dan simpangan baku 12,8 kPa. Nilai sudut geser dalam berkisar antara 12,7° sampai 42,1° dengan nilai rata-rata 31,7° dan simpangan baku 16,4°. Regresi linier pada data lapangan seluruh lokasi menghasilkan c sebesar 0 kPa dan φ sebesar 41,8°.



Gambar 15. Distribusi ukuran butiran untuk material timbunan bendungan



Gambar 16. Hubungan antara rasio tegangan, perpindahan horizontal, dan vertikal di Lokasi: (a) 2 dan (b) 3



Gambar 17. Hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser material acak di Bendungan Rukoh

Parameter M-C dari 3 lokasi dirangkum dalam Tabel 1. Hasil pengujian ILSDS menunjukkan adanya variabilitas kuat geser material acak pada Bendungan Rukoh. Variabilitas ini berasal dari berbagai hal, salah satunya adalah keragaman konten materi acak itu sendiri. Secara umum, material acak dengan kandungan butiran halus yang tinggi cenderung memiliki c yang relatif tinggi. Sebaliknya, material acak dengan kandungan butiran yang tinggi biasanya menghasilkan nilai φ yang relatif tinggi dan nilai c yang rendah. Sebagaimana ditunjukkan Gambar 15, secara umum distribusi ukuran butiran pada material acak di Bendungan Rukoh menunjukkan dominasi butiran besar dan cenderung tidak memiliki butir halus, seperti lanau atau lempung. Ukuran butir material acak pada Lokasi 3 tidak diperoleh oleh penulis. Namun, Lokasi 3 memiliki ukuran butir lebih kecil dari lokasi lainnya berdasarkan pengamatan visual. Hal ini menujukkan variabilitas kuat geser yang sepertinya disebabkan oleh penyusun material acak.

Tabel 1. Parameter M-C: hasil uji ILSDS

M-C	c (kPa)	φ (°)
Lokasi 1	38,5	42,1
Lokasi 2	16,1	40,2
Lokasi 3	38,1	12,7
Rata-rata	30,9	31,7
Simpangan Baku	12,8	16,4
Regresi 3 Lokasi	0	41,8

Uji ILSDS adalah metode yang menarik untuk digunakan dalam evaluasi kuat geser material acak di lapangan. Selain itu, pengujian ini dapat menangkap perilaku dilasi atau kompresi pada material acak saat terjadi regangan geser. Banyak konstruksi bendungan di Indonesia menerapkan uji ILSDS sejak kegagalan konstruksi Bendungan X. Sahadewa (2023a), Hakim *et al.* (2023), dan Sahadewa (2024) melaporkan evaluasi kekuatan geser material acak menggunakan uji ILSDS di berbagai bendungan di Indonesia.

Uji ILSDS pada material acak sangat direkomendasikan pada tahap konstruksi sehubungan material ini sering digunakan di zona yang rawan mengalami kelongsoran. Hasil pengujian dapat menjadi dasar pertimbangan apakah desain dan metode pemadatan harus dievaluasi ulang, atau dapat dilanjutkan.

Kesimpulan

Bendungan memiliki banyak manfaat untuk kehidupan manusia. Hal ini menarik Indonesia untuk membangun lebih dari 50 bendungan dalam 10 tahun terakhir. Banyak bendungan ini berupa bendungan urugan geomaterial, seperti tanah, batu, dsb. Bendungan jenis ini biasanya dibangun menggunakan material acak di zona tertentu. Zona dengan material acak ini sangat mempengaruhi stabilitas bendungan. Keunggulan material acak ini adalah murah dan berdampak relatif minimal terhadap kerusakan lingkungan. Sayangnya, kekuatan geser material acak sulit dievaluasi secara tepat. Padahal kekuatan geser adalah parameter penting dalam analisis kestabilan bendungan. Keberadaan partikel berukuran besar menghambat penggunaan uji kuat geser dengan sampel ukuran biasa.

Perkembangan fasilitas uji geser langsung skala ukuran besar yang tepat dan sesuai untuk material acak bendungan di Indonesia sejak 1980-an hingga 2025 telah dipaparkan. Fasilitas uji di laboratorium dan lapangan memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Persiapan sampel uji di fasilitas laboratorium cenderung dalam kondisi lebih terkontrol dan praktis dibandingkan persiapan sampel uji lapangan. Hal ini memberikan keunggulan uji laboratorium berupa kemudahan untuk studi parameter yang mempengaruhi kuat geser dan evaluasi kelayakan kuat geser material dari suatu sumber sebelum masa konstruksi. Meski fasilitas laboratorium ini mampu menampung sampel dengan partikel berukuran besar, sampel uji tersebut tidak dipadatkan menggunakan alat yang sama saat konstruksi di lapangan. Alat pemadatan lapangan memiliki energi yang lebih besar daripada alat pemadatan di laboratorium. Padahal, kepadatan material mempengaruhi kuat gesernya. Pengujian menggunakan sampel yang disiapkan di laboratorium belum tentu sesuai dengan sampel yang berada di lapangan. Selain itu, uji laboratorium tidak dapat digunakan untuk memverifikasi kuat geser material terpasang di lapangan. Uji geser langsung skala ukuran besar di lapangan, seperti ILSDS, justru dikembangkan untuk memverifikasi kuat geser material terpasang. Namun, persiapan

sampel uji lapangan jauh lebih sulit daripada persiapan sampel di laboratorium. Kelebihan dan kelemahan uji geser langsung skala besar di laboratorium dan lapangan tersebut dapat dijadikan sebagai dasar pemilihan pengujian yang sesuai kebutuhan.

ILSDS telah berhasil dikembangkan menjadi fasilitas skala ukuran besar untuk menguji kuat geser material acak di lapangan dengan kondisi terpadatkan oleh alat konstruksi lapangan. Dengan demikian, kuat geser hasil uji ILSDS lebih merepresentasikan keadaan lapangan dan dapat digunakan untuk mengevaluasi kuat geser material terpasang. Alat ini telah digunakan secara langsung di berbagai konstruksi bendungan Indonesia dan mampu menampung sampel hingga ukuran 80 cm x 80 cm x 30 cm.

Kinerja perangkat ILSDS telah ditunjukan dalam mengevaluasi kekuatan geser material acak di 3 lokasi Bendungan Rukoh, Aceh. Pengujian menunjukan beberapa perilaku material ketika terjadi regangan geser. Perilaku pertama ditunjukan oleh sampel Lokasi 1 dan 2, dimana material mengalami kompresi pada regangan geser rendah dan berbalik mengalami dilasi saat regangan geser tinggi. Hal ini serupa dengan perilaku tanah berbutir dengan kepadatan tinggi. Perilaku kedua ditunjukan oleh sampel Lokasi 3 yang selalu mengalami kompresi dari regangan geser rendah sampai tinggi. Kondisi ini mirip dengan perilaku tanah butir halus NC. Hasil yang bervariasi ini menunjukan kemampuan ILSDS dalam mengidentifikasi perilaku material yang berbeda.

Hasil pengujian pada 3 lokasi menunjukkan variabilitas kekuatan geser material acak berdasar kriteria Mohr-Coulomb yang relatif tinggi. Kohesi secara umum bervariasi antara 16,1 kPa hingga 38,5 kPa dengan nilai rata-rata 30,9 kPa dan simpangan baku 12,8 kPa. Sudut geser dalam berkisar antara 12,7° hingga 42,1° dengan nilai rata-rata 31,7° dan simpangan baku 16,4°. Regresi linier pada data lapangan dari 3 lokasi menghasilkan $c = 0$ kPa dan $\varphi = 41{,}8°$.

Hasil uji ILSDS dapat digunakan sebagai acuan untuk menilai perilaku material, termasuk kekuatan geser, perilaku regangan geser, dan kepadatan. Selain itu, kinerja pekerjaan pemadatan juga dapat dievaluasi menggunakan pengujian ILSDS. Sejumlah uji geser langsung skala besar di laboratorium dan lapangan menunjukkan bahwa uji skala ukuran besar sangat disarankan sebagai bagian dari praktik wajib dalam konstruksi bendungan, khususnya jika menggunakan material acak atau material yang mengandung partikel ukuran besar. Hasil pengujian ILSDS juga dapat menjadi dasar pertimbangan apakah desain dan metode pemadatan harus dievaluasi ulang, atau dapat dilanjutkan.

Ucapan Terima Kasih

Artikel ini ditulis berdasar penelitian yang didukung oleh P2MI-ITB untuk uji ILSDS dan Program Penguatan Inovasi LPIK-ITB untuk uji ILSDS NG. Penelitian ILSDS juga merupakan bagian dari studi doktoral Abi Hakim di UTM. Penulis berterima kasih atas saran serta bantuan dari Haris Eko Setyawan, Mahdi Ibrahim Tanjung, Bagus Setyawan, Tim Banyu Bumi Sangkara, Ibadurrahman Adz Dzikro, dan Hana Kamila. Penulis bersyukur atas dukungan dari kolega KK Rekayasa Geoteknik ITB dan Evie Pratiwi Dewi. Segala temuan, pendapat, kesimpulan, dan rekomendasi yang dikemukakan dalam artikel ini adalah milik penulis dan tidak mencerminkan pandangan lembaga pendukung manapun.

Daftar Pustaka

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2022). *Standard Method of Test for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions*. AASHTO T 236-22. Washington D.C.: AASHTO.

American Standard Testing and Material. (2023). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM D3080/D3080M-23. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Boudia, A., Berga, A., Boudia, S., & Hussain, S. K. (2021). The Detailed Study on the Development of the Triaxial Equipment in the Soil Mechanics: A Review. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, *2*(6), 67–76. https://doi.org/10.54660/anfo.

British Standards Institution. (2022). *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes - Classification Tests and Determination of Geotechnical Properties*. BS 1377-2:2022. London, UK: BSI.

Bro, A. D., Stewart, J. P., & Pradel, D. (2013). Estimating Undrained Strength of Clays from Direct Shear Testing at Fast Displacement Rates. *Geo-Congress 2013*, 106–119. https://doi.org/10.1061/9780784412787.012.

Coulomb, C. A. (1776). Essai sur Une Application des Regles des Maximis et Minimis a Quelquels Problemes de Statique, Relatits a L'Architecture. *Memoires de Mathematique de l'Academie Royale de Science*, *7*, 343–387. (Bahasa Perancis).

Das, B. M. (2009). *Principles of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Stamford, CT: Cengage Learning.

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams* (1st ed.). Leiden, the Netherlands: CRC Press. https://doi.org/10.1201/NOE0415364409.

Ferreira, B. S., Almeida, M. S. S., Lopes, F. R., Cavalcanti, M. D. C., & Filho, C. J. P. (2022). On the Use of Random Material in Dam Cores: Case of the Manso Dam, Brazil. *Geotechnical and Geological Engineering*, *40*, 1973–1987. https://doi.org/10.1007/s10706-021-02003-7.

Fu, Z., Chen, S., Ji, E., Li, G., & Lu, Y. (2020). Using Clay-Gravel Mixtures as the Impervious Core Materials in Rockfill Dams. *Z. Fu & E. Bauer (Eds.)*, *Dam Engineering - Recent Advances in Design and Analysis,* Ch. 1. London, UK: IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.93206.

Hakim, A. M., Kamaruddin, S. A., Sahadewa, A., Nazir, R., & Setyawan, H. E. (2023). Effect of Grain Size Distribution on Shear Strength Characteristic of Random Fill Material at Keureuto Dam, Indonesia. *Key Engineering Materials*, *970*, 151–156. https://doi.org/10.4028/p-h30Laq.

Haselsteiner, R., Pamuk, R., & Ersoy, B. (2017). Aspects Concerning the Shear Strength of Rock-fill Material in Rockfill Dam Engineering. *Geotechnik*, *40*(3), 193–203. https://doi.org/10.1002/gete.201600099.

Kutzner, C. (1996). *Erdund Steinschüttdämme für Stauanlagen*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag. (Bahasa Jerman).

Lade, P. V. (2016). *Triaxial Testing of Soils*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119106616.

Liu, S. H. (2009). Application of In-situ Direct Shear Device to Shear Strength Measurement of Rockfill Materials. *Water Science and Engineering*, *2*(3), 48–57. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2009.03.005.

Ma, H., & Chi, F. (2016). Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams. *Engineering*, *2*(4), 498–509. https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001.

Matsuoka, H., Liu, S., Sun, D., & Nishikata, U. (2001). Development of a New In-Situ Direct Shear Test. *Geotechnical Testing Journal*, *24*(1), 92–102. https://doi.org/10.1520/GTJ11285J.

Matthews, M. C. (1988). The Engineering Application of Direct and Simple Shear Testing. *Ground Engineering*, *21*(2), 13–21.

Mitchell, J. K. (1993). *Fundamental of Soil Behavior* (2nd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.

Mohr, O. (1900). Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials. *Zeitschrift Des Vereines Deutscher Ingenieure*, *44*(45), 1524–1530. (Bahasa Jerman).

Rönnqvist, H. (2010). Predicting Surfacing Internal Erosion in Moraine Core Dams, *PhD Thesis*, Sweden: Royal Institute of Technology.

Sahadewa, A, Setyawan, H., Tanjung, M., Pamumpuni, A., Hakim, A. M., Langit, J., Herry, P., & Wibowo, A. (2022). Construction Failure of X Dam: The Importance of Field Monitoring. *11th International Symposium of Field Monitoring in Geomechanics 2022*, ISSMGE TC220, 1–7.

Sahadewa, A. (2023a). Case History of Random Material Shear Strength Evaluation using In-situ Large Scale Direct Shear Test in the Construction of the Longest Dam in the South-east Asian. *International Conference on "Case Histories in Geotechnical Engineering" & 4th AsRTC6 Urban Geoengineering Symposium. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012011. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1249/1/012011.

Sahadewa, A. (2023b). In-situ Large Scale Direct Shear Test for Evaluating Compaction Work of Random Material: Case of Construction Failure in an Indonesian Dam. *Key Engineering Materials*, *972*, 125–132. https://doi.org/10.4028/p-28QzdB.

Sahadewa, A. (2024). The Spatial Variability of Random Fill Shear Strength Based on In-Situ Large Scale Direct Shear Test in the Kuwil Kawangkoan Dam Construction. *T. Kang & Y. Lee*, *Proceedings of 6th International Conference on Civil Engineering and Architecture, Vol. 1. ICCEA 2023. Lecture Notes in Civil Engineering,* 530, 142–152. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5311-6_14.

Shamanna, G., & Santhosh, B. S. (2012). Concrete Shear Test: A New Tool for Determining Rheological Properties of Fresh Portland Cement Concrete. *S.-Y. Chang, S. K. Al Bahar, & J. Zhao*,

Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering and Building Materials. Advances in Civil Engineering and Building Materials, 289–293.

Sherard, J. L., & Dunnigan, L. P. (1989). Critical Filters for Impervious Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, *115*(7), 927–947. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:7(927).

Skempton, A. W. (1949). Alexandre Collin, A Note on His Pioneer Work in Soil Mechanics. *Géotechnique*, *1*(4), 215–222. https://doi.org/10.1680/geot.1949.1.4.215.

Skempton, A. W. (1958). Arthur Langtry Bell (1874–1956) and His Contribution to Soil Mechanics. *Géotechnique*, *8*(4), 143–157. https://doi.org/10.1680/geot.1958.8.4.143.

The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. (1982). *Testing and Design Strength of Rockfill Materials*. (Bahasa Jepang).

U.S. Bureau of Reclamation. (2012). *Design Standard No. 13 - Embankment Dams, Chapter 2: Embankment Design Phase 4 (Final)*. Denver, CO: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.

Vickers, B. (1983). *Laboratory Work in Soil Mechanics* (2nd ed.). Hertfordshire, UK: Granada Publishing Ltd.

Wang, J. J., Yang, Y., & Chai, H. J. (2016). Strength of Roller Compacted Rockfill Sandstone from In-situ Direct Shear Test. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *53*(1), 30–34. https://doi.org/10.1007/s11204-016-9360-1.

Wang, J.-J., Zhang, H.-P., Tang, S.-C., & Liang, Y. (2013). Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *139*(11), 1994–1997. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000931.

Wang, J.-J., Zhang, H.-P., Wen, H.-B., & Liang, Y. (2015). Shear Strength of an Accumulation Soil from Direct Shear Test. *Marine Georesources & Geotechnology*, *33*(2), 183–190. https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.828821.

Xu, Z., & Jiang, G. (2017). Technologies on Construction of Earth Core Rockfill Dams. *Re-Vista Brasileira de Engenharia de Barragens*, *5*, 42–54.