RETROFITTING INSTRUMENTASI DIGITAL PADA ALAT DIRECT SHEAR TEST UNTUK OTOMASI LABORATORIUM GEOTEKNIK

Maskur Efendi[1)], M. Sholihul Hadi[2)], Atika Praptawati[1)], Febrianto Alqodri[2)]

[1]Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang
[2]Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No. 5, Malang 65145

E-mail: maskur.efendi@um.ac.id

Abstract

Conventional Direct Shear Test (DST) equipment relies on manual data recording, which may introduce reading and transcription errors and requires separate data processing. This study develops a digital instrumentation system through a retrofitting approach for conventional DST equipment without modifying its primary mechanical structure. The system integrates Mitutoyo digital indicators, an Arduino UNO R4 WiFi, Bluetooth Low Energy (BLE), and an Android application for automatic event-triggered data acquisition, real-time monitoring, data storage, shear strength analysis, and reporting. The system was developed using an experimental engineering approach and evaluated through laboratory DST under three normal stress levels of 9.80, 19.60, and 29.40 kPa following ASTM D3080/D3080M-23. Validation using 72 paired data points yielded a mean absolute percentage error (MAPE) of 0.993%, mean absolute error (MAE) of 0.411 N, root mean square error (RMSE) of 0.507 N, and R^2 of 0.9996 as an agreement indicator. Mohr–Coulomb analysis produced a cohesion of 11.75 kPa and an internal friction angle of 21.88°. The results demonstrate that the proposed system integrates data acquisition, monitoring, storage, analysis, and reporting within a single Android platform, extending DST digitalization from measurement and acquisition to integrated data management and shear strength analysis while preserving the existing testing mechanism.

Keywords: *Direct Shear Test, digital instrumentation, retrofitting, laboratory automation, Android application.*

Abstrak

Alat Direct Shear Test (DST) konvensional masih mengandalkan pembacaan dan pencatatan data secara manual, sehingga data perlu dipindahkan dan diolah kembali. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem akuisisi data digital berbasis Android melalui pendekatan *retrofitting instrumentation* pada alat DST konvensional tanpa mengubah mekanisme utama alat. Penelitian menggunakan pendekatan rekayasa eksperimental dan pengembangan prototipe. Sistem mengintegrasikan *digital indicator*, unit akuisisi, komunikasi Bluetooth Low Energy (BLE), dan aplikasi Android untuk akuisisi data, monitoring, penyimpanan, analisis, dan pelaporan. Pengujian dilakukan menggunakan tiga spesimen tanah *undisturbed* pada tegangan normal 9,80; 19,60; dan 29,40 kPa dalam kondisi *consolidated drained*. Validasi terhadap 72 pasangan data menghasilkan MAPE 0,993%, MAE 0,411 N, RMSE 0,507 N, dan R^2 sebesar 0,9996 sebagai indikator kesesuaian. Analisis Mohr–Coulomb menghasilkan kohesi 11,75 kPa dan sudut geser dalam 21,88°. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dapat mengintegrasikan proses akuisisi hingga pelaporan hasil DST dalam satu platform Android serta mendukung otomasi pengelolaan data tanpa mengubah mekanisme utama alat.

Kata Kunci: *Direct Shear Test, instrumentasi digital, retrofitting, otomasi laboratorium, aplikasi android.*

PENDAHULUAN

Direct Shear Test (DST) merupakan metode pengujian laboratorium untuk menentukan kuat geser tanah melalui hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser. Parameter kuat geser yang diperoleh, yaitu kohesi (*c*) dan sudut geser dalam (φ), digunakan dalam berbagai analisis geoteknik (Das & Sobhan, 2018). Pengujian DST pada kondisi *consolidated drained* mengacu pada ASTM D3080/D3080M-23 (ASTM International, 2023) . Oleh karena itu, pengukuran dan pencatatan data merupakan bagian penting dalam memperoleh hasil pengujian yang dapat diolah dengan tepat.

Pada alat DST konvensional, deformasi *proving ring* dan perpindahan horizontal dibaca serta dicatat secara manual. Data kemudian dipindahkan dan diolah untuk memperoleh gaya geser, tegangan geser, dan parameter kuat geser. Ketergantungan pada pencatatan operator berpotensi menimbulkan kesalahan pembacaan dan transkripsi. Pengembangan sistem akuisisi data digital memberikan peluang untuk mengurangi ketergantungan tersebut serta meningkatkan integrasi pengelolaan data pada pengujian geoteknik (Basson dkk., 2021; Chao & Fowmes, 2021). Integrasi sistem pengukuran dan akuisisi data juga telah diterapkan pada pengembangan aparatus *direct shear* (Gayathri dkk., 2024; Sun dkk., 2025).

Carri dkk. (2021) menunjukkan bahwa digitalisasi dan otomasi sistem geoteknik dapat mengintegrasikan akuisisi dan pengolahan data. Efendi & Setyawan (2025) mengembangkan *retrofitting* alat DST analog menggunakan *digital indicator*, mikrokontroler, dan *wireless data acquisition*. Sistem tersebut menunjukkan kelayakan digitalisasi pengukuran dan akuisisi data DST, tetapi hasil pengujian berupa tegangan geser dan perpindahan horizontal ditampilkan melalui aplikasi berbasis web dan belum mengintegrasikan analisis parameter kuat geser.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem akuisisi data digital berbasis Android melalui *retrofitting instrumentation* pada alat DST konvensional tanpa mengubah mekanisme utama alat. Sistem mengintegrasikan akuisisi data, komunikasi nirkabel, *real-time monitoring*, penyimpanan, analisis parameter kuat geser berdasarkan kriteria Mohr–Coulomb, dan pelaporan dalam satu alur kerja digital.

METODE PENELITIAN

Desain dan Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa eksperimental dan pengembangan prototipe. *Retrofitting instrumentation* diterapkan pada alat DST konvensional tanpa mengubah mekanisme utama pembebanan dan penggeseran. Tahapan penelitian meliputi analisis kebutuhan, perancangan, integrasi instrumentasi, pengembangan aplikasi Android, pengujian fungsional, pengujian DST, dan evaluasi sistem akuisisi.

Sistem terdiri atas dua *digital indicator* Mitutoyo, *Digimatic SPC Interface*, kabel data SPC, Arduino UNO R4 WiFi, dan aplikasi Android. Mitutoyo 575-121 digunakan untuk mengukur perpindahan horizontal, sedangkan Mitutoyo 543-781 digunakan untuk mengukur deformasi *proving ring*. Data dari kedua indikator diteruskan melalui unit akuisisi menggunakan komunikasi BLE ke aplikasi Android untuk *real-time monitoring*, penyimpanan, pengolahan, dan pelaporan. Pendekatan *retrofitting* ini mengadopsi konsep digitalisasi DST yang telah dikembangkan sebelumnya oleh Efendi & Setyawan (2025).



Gambar 1. Tahapan pengembangan dan arsitektur sistem retrofitting instrumentasi digital

Tabel 1

Komponen utama sistem *retrofitting* instrumentasi digital

No.	Komponen	Tipe/Model	Fungsi
1	*Digital Indicator* deformasi	Mitutoyo 543-781	Mengukur deformasi *proving ring*
2	*Digital Indicator* perpindahan	Mitutoyo 575-121	Mengukur perpindahan horizontal
3	Antarmuka SPC	Kabel SPC Mitutoyo 905409 + Digimatic SPC Interface	Menghubungkan dan meneruskan sinyal kedua *digital indicator*
4	Unit akuisisi	Arduino UNO R4 WiFi	Membaca, memproses, dan mengirim data
5	Panel akuisisi	Modular	Integrasi dan perlindungan komponen elektronik

Spesimen dan Kondisi Pengujian

Pengujian menggunakan tiga spesimen tanah *undisturbed* yang berasal dari satu massa material di Kota Malang pada kedalaman 0,50–1,00 m. Tanah memiliki kadar air 31,0%, berat isi 18,6 kN/m³, *specific gravity* 2,65, komposisi pasir 35%, lanau 35%, dan lempung 30%, dengan fraksi halus sebesar 65%. Berdasarkan parameter Atterberg dan gradasinya, tanah diklasifikasikan sebagai CL (*lean clay*) menurut USCS.

Pengujian dilakukan pada kondisi *Consolidated Drained* (CD) sesuai ASTM D3080/D3080M-23 (ASTM International, 2023). Tegangan normal yang digunakan adalah 9,80; 19,60; dan 29,40 kPa, masing-masing pada satu spesimen. Kecepatan geser ditetapkan sebesar 1 mm/menit dengan luas bidang geser 3170 mm². Karena setiap tingkat tegangan normal hanya menggunakan satu spesimen, hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pada kondisi pengujian yang diterapkan dan tidak dimaksudkan untuk mengestimasi *repeatability* atau *reproducibility* material.

Akuisisi, Pengolahan, dan Validasi Data

Akuisisi digital dipicu oleh perubahan absolut perpindahan horizontal ≥0,01 mm, sedangkan pencatatan konvensional dilakukan setiap 0,10 mm. Perpindahan horizontal dan deformasi *proving ring* direkam sebagai pasangan data pada titik yang sama tanpa *resampling* atau interpolasi.

Deformasi *proving ring* dikonversi menjadi gaya geser menggunakan $F = k\delta_p$, dengan konstanta kalibrasi 429,73 N/mm. Tegangan geser dihitung dengan $\tau =$

$(F/A) \times 1000$, kemudian τ_{max} ditentukan dari hubungan dengan perpindahan horizontal. Parameter kuat geser dihitung berdasarkan kriteria Mohr–Coulomb, $\tau_{max} = c + \sigma \tan \phi$, dengan c dan ϕ diperoleh melalui regresi linear (Das & Sobhan, 2018).

Validasi terhadap 72 pasangan data menggunakan MAPE, MAE, RMSE, dan R^2 sebagai indikator kesesuaian antara akuisisi digital dan pencatatan konvensional. Evaluasi tidak dimaksudkan sebagai akurasi absolut karena kedua metode menggunakan sumber pengukuran yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi dan Akuisisi Sistem

Sistem *retrofitting instrumentation* berhasil diterapkan pada alat DST konvensional tanpa mengubah mekanisme utama pembebanan dan penggeseran. Dua *digital indicator* mengukur perpindahan horizontal dan deformasi *proving ring*, kemudian data diteruskan melalui unit akuisisi menggunakan BLE ke aplikasi Android. Aplikasi menampilkan data secara numerik dan grafis secara *real-time*, serta mengintegrasikan perhitungan gaya dan tegangan geser, penyimpanan berdasarkan sesi pengujian, analisis, dan pelaporan.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa *retrofitting* dapat mengintegrasikan instrumentasi digital pada alat DST konvensional. Integrasi sistem pengukuran dan akuisisi data juga telah diterapkan pada aparatus geoteknik untuk mendukung pengujian dan pengelolaan data secara digital (Basson dkk., 2021; Chao & Fowmes, 2021; Gayathri dkk., 2024; Sun dkk., 2025). Penelitian ini menerapkannya dengan mempertahankan mekanisme utama alat serta mengintegrasikan pengelolaan dan analisis data melalui Android.

Validasi Kuantitatif Akuisisi Digital

Validasi dilakukan terhadap 72 pasangan data hasil akuisisi digital dan pencatatan konvensional pada perpindahan horizontal yang sama. Hasil evaluasi menunjukkan MAPE sebesar 0,993%, MAE 0,411 N, RMSE 0,507 N, dan R^2*agreement* 0,9996, yang menunjukkan kesesuaian tinggi antara kedua metode pada kondisi pengujian yang diterapkan. Perbandingan dilakukan pada titik perpindahan yang sama tanpa *resampling* atau interpolasi. Pendekatan serupa digunakan Alhakim dkk. (2023) dalam mengevaluasi pengukuran digital terhadap metode konvensional pada pengujian *direct shear*. Hasil ini

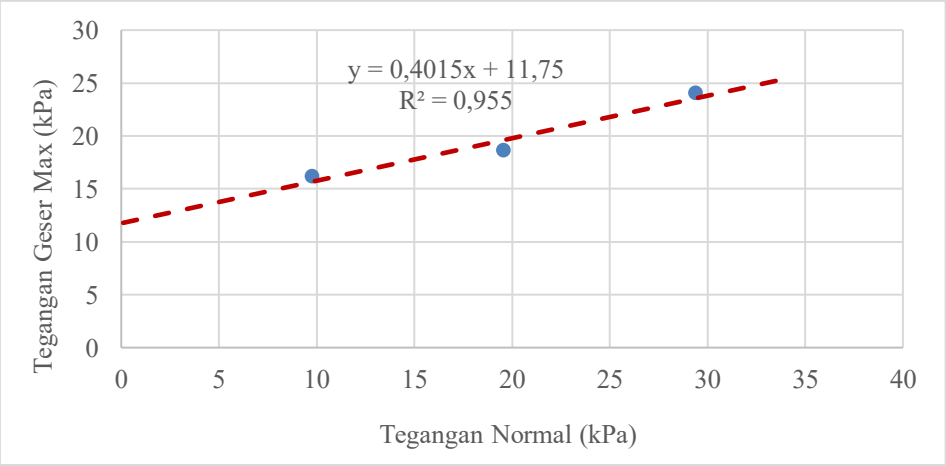
tidak ditafsirkan sebagai akurasi absolut karena kedua metode menggunakan sumber pengukuran yang sama.

Parameter Kuat Geser

Pengujian pada tegangan normal 9,80; 19,60; dan 29,40 kPa menghasilkan tegangan geser maksimum berturut-turut sebesar 16,18; 18,63; dan 24,05 kPa. Hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser maksimum menghasilkan persamaan:

$$\tau_{\max} = 0{,}4015\sigma + 11{,}75$$

dengan $R^2 = 0{,}955$. Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh kohesi (c) sebesar 11,75 kPa dan sudut geser dalam (ϕ) sebesar 21,88°.



Gambar 2. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser maksimum berdasarkan kriteria Mohr–Coulomb

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak hanya mampu melakukan akuisisi dan penyajian data, tetapi juga mengolah data hasil DST hingga menghasilkan parameter kuat geser berdasarkan kriteria Mohr–Coulomb. Dengan demikian, fungsi sistem mencakup tahapan pengujian mulai dari akuisisi data hingga pengolahan hasil.

Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Efendi & Setyawan (2025) mengembangkan *retrofitting* alat DST menggunakan *digital indicator*, mikrokontroler, *wireless data acquisition* berbasis Wi-Fi, dan aplikasi web. Sistem tersebut menghasilkan data tegangan geser dan perpindahan horizontal.

Penelitian ini menggunakan BLE sebagai media komunikasi dan Android sebagai platform, serta memperluas pengolahan data hingga analisis parameter kuat geser.

Perbedaan utama terletak pada integrasi fungsi pengelolaan dan analisis data. Penelitian terdahulu berfokus pada akuisisi dan penyajian data, sedangkan penelitian ini mengintegrasikan akuisisi, *monitoring*, penyimpanan, analisis parameter kuat geser, dan pelaporan dalam satu alur kerja digital. Kontribusi penelitian ini terletak pada integrasi pengolahan hasil DST hingga penentuan kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) melalui platform Android.

Tabel 2

Perbandingan penelitian ini dengan Efendi & Setyawan (2025)

Aspek	Efendi & Setyawan	Penelitian ini
Media komunikasi	Wi-Fi	BLE (Bluetooth)
Platform aplikasi	Web	Android
Data hasil pengujian	Tegangan geser dan perpindahan horizontal	Tegangan geser dan perpindahan horizontal
Analisis Mohr–Coulomb dan parameter kuat geser	Tidak tersedia	Terintegrasi
Pelaporan hasil pengujian	Data tegangan geser dan perpindahan horizontal	Data pengujian terintegrasi dengan hasil analisis c dan ϕ

Implikasi terhadap Otomasi Laboratorium

Integrasi akuisisi, monitoring, penyimpanan, analisis, dan pelaporan menunjukkan bahwa *retrofitting instrumentation* dapat mendukung digitalisasi pengelolaan data DST tanpa mengubah mekanisme utama alat. Sistem mengurangi tahapan pencatatan dan pemindahan data secara manual sehingga memperpendek alur pengolahan hasil pengujian. Pendekatan ini mendukung penerapan otomasi pada pengujian laboratorium geoteknik, terutama pada pengelolaan data dari proses pengukuran hingga penyajian hasil.

SIMPULAN

Sistem *retrofitting instrumentation* berhasil diimplementasikan pada alat DST konvensional tanpa mengubah mekanisme utama alat. Sistem mengintegrasikan akuisisi data, *real-time monitoring*, penyimpanan, pengolahan, analisis Mohr–Coulomb, dan pelaporan melalui Android. Validasi 72 pasangan data menunjukkan MAPE 0,993%,

MAE 0,411 N, RMSE 0,507 N, dan R^2*agreement* 0,9996. Analisis DST menghasilkan kohesi 11,75 kPa dan sudut geser dalam 21,88°. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *retrofitting instrumentation* dapat mendukung otomasi pengukuran dan pengelolaan data DST tanpa mengubah mekanisme utama alat.

DAFTAR PUSTAKA

Alhakim, G., Núñez-Temes, C., Ortiz-Sanz, J., Arza-García, M., Jaber, L., & Gil-Docampo, M. L. (2023). Experimental application and accuracy assessment of 2D-DIC in meso-direct-shear test of sandy soil. *Measurement*, *211*, 112645. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112645

ASTM International. (2023). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (ASTM D3080/D3080M-23)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3080_D3080M-23

Basson, J. A., Broekman, A., & Jacobsz, S. W. (2021). TD-DAQ: A low-cost data acquisition system monitoring the unsaturated pore pressure regime in tailings dams. *HardwareX*, *10*, e00221. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00221

Carri, A., Valletta, A., Cavalca, E., Savi, R., & Segalini, A. (2021). Advantages of IoT-Based Geotechnical Monitoring Systems Integrating Automatic Procedures for Data Acquisition and Elaboration. *Sensors*, *21*(6), 2249. https://doi.org/10.3390/s21062249

Chao, Z., & Fowmes, G. (2021). Modified stress and temperature-controlled direct shear apparatus on soil-geosynthetics interfaces. *Geotextiles and Geomembranes*, *49*(3), 825–841. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.12.011

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th ed.). Cengage Learning.

Efendi, M., & Setyawan, E. (2025). Innovative Transformation of Analog to Digital Direct Shear Test Tool Based on Microcontroller with Wireless Data Acquisition System. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, *9*(1), 220–228. https://doi.org/10.70609/gtech.v9i1.6051

Gayathri, V. L., Vangla, P., & Dey, S. (2024). A versatile apparatus for assessing the shear behaviour of geotechnical interfaces coupled with imaging and acoustic capabilities. *Acta Geotechnica*, *19*(9), 6217–6237. https://doi.org/10.1007/s11440-023-02220-9

Sun, Y.-H., Zhang, X.-H., Long, M.-C., & Wang, H.-L. (2025). A novel multifunctional direct shear apparatus: Development, validation and application. *Measurement*, *253*, 117455. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117455