



Efektivitas ergonomis purwarupa alat irigasi portabel lahan terasering: Sebuah studi pendekatan *human-centered design*

Sekar Adita*, Rahmawan Dwi Prasetya

Program Studi Desain Produk, Fakultas Seni Rupa dan Desain, Institut Seni Indonesia Yogyakarta
(Jl. Parangtritis Km. 6,5, Glondong, Panggungharjo, Kec. Sewon, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa
Yogyakarta, Indonesia 55188)

*Correspondence author: sekaradita@isi.ac.id

Received:

16/03/2026

Final Revision:

15/04/2026

Accepted:

19/04/2026



This work is
licensed under a
[CC-BY-NC](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Abstrak.

Pengangkutan air irigasi secara manual dan terus-menerus di lahan pertanian bertingkat menimbulkan risiko cedera fisik berkelanjutan akibat desain alat konvensional yang tidak ergonomis. Situasi ini mengancam keselamatan pekerja, terutama bagi kelompok rentan seperti petani perempuan dan lansia. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji efektivitas prototipe alat irigasi portabel bernama TIRTA guna meminimalkan beban biomekanis di lahan miring. Penelitian ini merupakan studi desain produk yang didasarkan pada metode *Human-Centered Design* (HCD) yang diintegrasikan dengan evaluasi ergonomis komparatif. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi partisipatif, penggalan keluhan, dan penyesuaian dimensi antropometrik. Kinerja prototipe dievaluasi menggunakan *Rapid Entire Body Assessment* (REBA). Hasil evaluasi komparatif pada skenario uji penuangan air menunjukkan penurunan skor risiko biomekanis dari 11 (risiko sangat tinggi dengan jerigen konvensional) menjadi 2 (risiko rendah dengan operasi selang bertenaga gravitasi TIRTA). Kesimpulannya, desain terintegrasi yang terdiri dari tangki punggung, sasis roda tunggal, dan mekanisme selang berbasis gravitasi terbukti mampu mendistribusikan beban kerja secara lebih efisien. Rekayasa fungsional TIRTA menawarkan cetak biru teknologi inklusif yang menyeimbangkan tuntutan produktivitas dengan perlindungan keselamatan fisik bagi komunitas pertanian di daerah topografi marginal.

Kata kunci: desain berpusat pada manusia, ergonomi portabel, irigasi terasering, risiko biomekanika, teknologi inklusif, REBA, antropometri

Abstract.

The continuous manual transport of irrigation water on terraced farmland poses a constant risk of physical injury due to the non-ergonomic design of conventional tools. This situation jeopardizes worker safety, particularly for vulnerable groups such as female farmers and the elderly. This study aims to design and test the effectiveness of a portable irrigation tool prototype, TIRTA, to minimize biomechanical strain on sloped land. This research employs a product design approach based on the Human-Centered Design (HCD) method integrated with comparative ergonomic evaluation. Data collection was conducted through participatory observation, complaint elicitation, and anthropometric dimension adjustments. Prototype performance was evaluated using Rapid Entire Body Assessment (REBA). Comparative evaluation results in water-pouring test scenarios showed a reduction in biomechanical risk scores from 11 (very high risk with conventional jerry cans) to 2 (low risk with TIRTA's gravity-fed hose operation). In conclusion, the integrated design comprising an anthropometric backpack tank, a single-wheel chassis, and a gravity-based hose mechanism proved capable of distributing the workload more efficiently. TIRTA's functional engineering offers an inclusive technological blueprint that balances productivity demands with physical safety protection for agricultural communities in marginal topographic areas.

Keywords: human-centered design, portable ergonomics, terraced irrigation, biomechanical risk, inclusive technologies, REBA, anthropometry

Pendahuluan

Sistem pertanian terasering memiliki karakteristik topografi yang sangat menantang, dengan lereng curam dan akses jalan yang terbatas. Di berbagai daerah pegunungan, demografi petani kecil di wilayah ini umumnya didominasi oleh kelompok rentan, yaitu perempuan dan lansia (Chapagain & Raizada, 2017). Setiap hari, kelompok pekerja ini harus menanggung beban fisik yang sangat berat, terutama selama proses irigasi, yang mengharuskan mereka mengangkat wadah air berat dan menaiki lereng (Lebedev et al., 2021), serta keharusan untuk membungkuk ekstrem secara berulang-ulang pada fase penuangan air. Medan ekstrem dan beban fisik yang ditanggung oleh petani ini dapat dilihat dengan jelas pada Gambar 1. Beban fisik yang disebabkan oleh aktivitas mengangkat berulang-ulang memicu masalah kesehatan muskuloskeletal yang serius dan mengurangi efisiensi produktivitas secara keseluruhan.

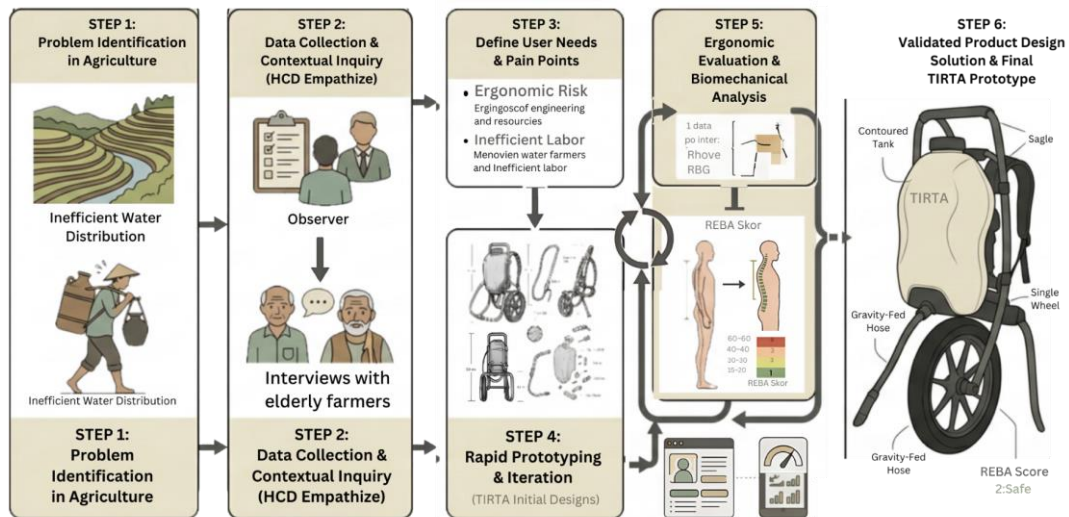


Gambar 1. Variasi beban kerja asimetris pada penggunaan alat irigasi konvensional
Sumber: Dokumentasi peneliti

Tinjauan literatur dan perkembangan terbaru dalam teknologi pertanian menunjukkan adanya ketidakcocokan yang signifikan antara kondisi geografis dan alat-alat yang digunakan oleh petani. Alat-alat pertanian konvensional yang saat ini tersedia secara luas di pasaran umumnya dirancang untuk lahan datar dan sepenuhnya mengabaikan tantangan topografi lahan berlereng (Apazhev et al., 2021). Penggunaan paksa alat-alat konvensional ini justru menghambat mobilitas petani di lahan berlereng dan gagal menyediakan dukungan postural yang aman bagi kelompok pengguna rentan. Meskipun studi-studi terdahulu telah mengevaluasi intervensi alat pertanian, mayoritas masih berfokus pada efisiensi mekanis di lahan datar dan belum mengintegrasikan analisis biomekanika dengan portabilitas ergonomis untuk topografi ekstrem. Oleh karena itu, terdapat kesenjangan literatur yang signifikan mengenai bagaimana prinsip desain inklusif dapat merekonstruksi alat irigasi portabel agar selaras dengan batasan fisik pekerja lansia dan perempuan.

Berangkat dari *research gap* tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas purwarupa alat irigasi portabel (TIRTA) melalui pendekatan *Human-Centered Design* (HCD). Berbeda dengan inovasi sebelumnya yang sekadar memodifikasi fitur mekanis, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada integrasi prinsip portabilitas ergonomis yang mendistribusikan beban asimetris secara statis melalui sistem tangki punggung antropometrik dan sasis beroda tunggal untuk mengurangi tekanan pada tulang belakang. Untuk memandu arah analisis, penelitian ini merumuskan satu pertanyaan utama: Bagaimana efektivitas purwarupa TIRTA dalam menurunkan risiko biomekanik saat dioperasikan oleh pekerja rentan di lahan terasering? Desain produk dieksekusi secara sistematis, di mana proses pemikiran dari tahap identifikasi masalah hingga formulasi desain inovasi dijelaskan secara rinci dalam Gambar 2. Melalui uji evaluasi komparatif, artikel ini diharapkan memberikan kontribusi empiris mengenai model intervensi desain yang memprioritaskan keselamatan fisik pekerja di lanskap agrikultur marjinal. Artikel ini berargumen bahwa penerapan pendekatan desain berpusat pada manusia merupakan pendekatan krusial untuk menciptakan produk irigasi yang adaptif dan ergonomis. Serangkaian tahap desain yang secara intensif melibatkan interaksi langsung dengan pengguna telah terbukti mampu mengidentifikasi dan mengatasi kebutuhan spesifik kelompok petani

rentan dengan akurat. Hasil dari tahap desain ini pada akhirnya mengarah pada integrasi fungsi fisik, termasuk tangki punggung ergonomis, rangka roda tunggal, dan mekanisme selang berbasis gravitasi. Pendekatan desain produk terstruktur ini diyakini mampu mengubah pekerjaan irigasi yang melelahkan menjadi aktivitas yang memasyarakatkan gerakan petani di lapangan.



Gambar 2. Kerangka pikir penelitian

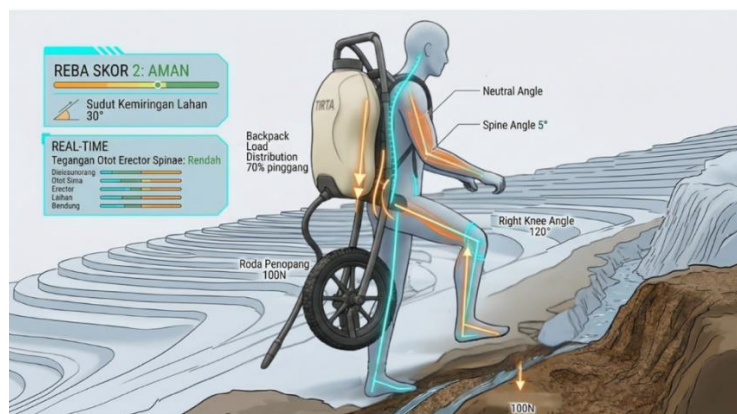
Sumber: Hasil Analisis Peneliti

Kerangka metodologis yang mendasari seluruh desain alat ini adalah pendekatan desain berpusat pada manusia yang umumnya dikenal sebagai *Human-Centered Design (HCD)*. Secara konseptual, pendekatan ini merupakan metode pemecahan masalah berulang yang selalu menempatkan kebutuhan, kemampuan, dan kondisi lingkungan pengguna di pusat pengambilan keputusan teknis (Boy, 2017). Tujuan utama penerapan metode desain ini adalah menggabungkan fungsi produk untuk mengoptimalkan kenyamanan interaksi pengguna (Moser & Korstjens, 2022). Dalam standar desain internasional, pendekatan ini diwujudkan melalui serangkaian fase, mulai dari formulasi empati dan pembuatan prototipe awal hingga pengujian lapangan berkelanjutan (Harte et al., 2017).

Berbagai studi literatur sebelumnya telah mengkategorikan bukti efektivitas implementasi desain berpusat pada manusia dalam solusi rekayasa produk di berbagai sektor kompleks. Sebagian besar literatur saat ini secara konsisten menyoroti penerapan sukses metode ini dalam pengembangan peralatan kerja yang memerlukan standar keamanan fisik tinggi (Göttgens & Oertelt-Prigione, 2021; Tzimourta, 2025). Selain itu, tren penelitian desain modern menunjukkan pergeseran fokus evaluasi dari sekadar mencapai efisiensi mekanis menjadi pemenuhan holistik aspek perlindungan emosional pekerja (Kheder, 2023). Kumpulan literatur ini menjadi dasar argumen bahwa penerapan siklus evaluasi berulang dengan pengguna telah terbukti esensial dalam menghasilkan desain akhir yang benar-benar inklusif. Untuk mengatasi keluhan kelelahan fisik yang dialami pekerja di lingkungan ekstrem, penerapan parameter portabilitas ergonomis pada alat kerja merupakan langkah yang sangat esensial. Portabilitas ergonomis dapat didefinisikan sebagai rumus desain yang menekankan keseimbangan antara bentuk produk portabel dan batas toleransi biomekanis penggunaannya (Sun et al., 2019). Dalam skema teknik pengembangan alat kerja, prinsip dasar fleksibilitas gerakan diterapkan secara ketat untuk merasionalisasi ukuran dimensi, distribusi titik beban, dan tata letak operasional komponen (Stanton et al., 2017). Penerapan standar parameter keseimbangan ini secara khusus bertujuan untuk memberikan jaminan pencegahan cedera muskuloskeletal dan pemeliharaan produktivitas kerja (Iqbal et al., 2025).

Tinjauan literatur terkait portabilitas ergonomis menyoroti berbagai metode pengukuran untuk mengevaluasi kesesuaian beban statis dan dinamis pada prototipe. Sejumlah studi menemukan bahwa

pengembangan inovasi perangkat portabel sering menghadapi hambatan dalam menyeimbangkan berat total material dengan kemudahan membawa perangkat (Windrum et al., 2017). Untuk mengatasi hambatan pengujian ini, penelitian desain saat ini beralih ke penggunaan metode perekaman postur berdasarkan pemantauan sensor tubuh pintar yang dikenakan langsung oleh pekerja (Stefana et al., 2021). Tren penggunaan alat evaluasi biomekanik ini diakui secara luas sebagai metode yang sangat akurat untuk mendeteksi titik-titik ketegangan otot, memungkinkan desainer untuk segera memperbaiki kelemahan dalam desain mereka (Babangida et al., 2025). Evaluasi postur (REBA) yang dikombinasikan dengan antropometri terbukti sangat krusial dalam mendeteksi keluhan *musculoskeletal disorders* (MSDs) dan memperbaiki modifikasi alat (Sinambela, 2022). Simulasi perbandingan ketegangan otot antara penggunaan alat standar dan prototipe yang diusulkan ditampilkan dengan jelas pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisis postur biomekanika saat mengoperasikan purwarupa TIRTA.

Sumber: Hasil Analisis Peneliti

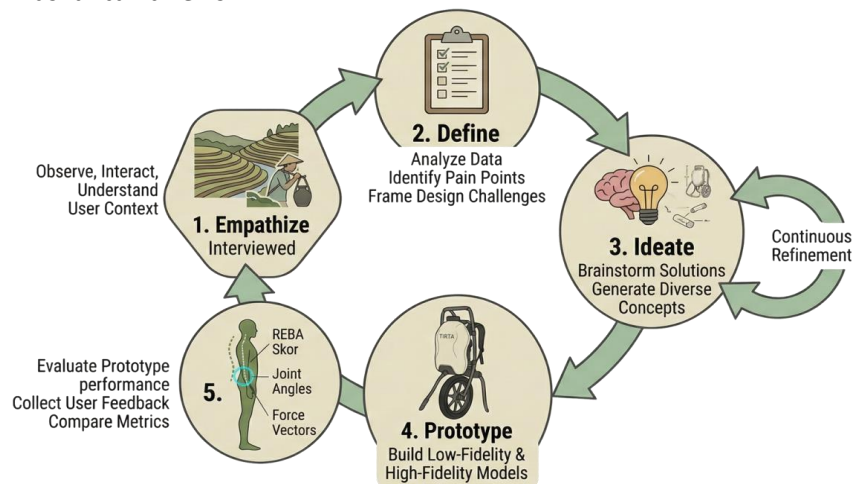
Kontekstual operasional desain bantuan irigasi ini didasarkan pada sistem pertanian terasering dengan lereng yang curam. Secara ekologi dan konseptual, sistem ini merupakan solusi teknik yang mengubah lahan berlereng menjadi ladang terasering untuk memudahkan budidaya tanaman pegunungan. Infrastruktur tradisional ini dibangun dengan fungsi utama mengelola ketersediaan air tanah di lereng sambil menahan aliran permukaan yang berisiko tinggi menyebabkan erosi (Meliho et al., 2021). Ciri-ciri visual lanskap terasering ekologi ini sangat khas, dengan area tanam yang sempit dan lereng yang sangat curam antara teras-teras. Sejumlah studi sebelumnya yang mengkaji dinamika harian lahan terasering sebagian besar berfokus pada temuan terkait kerentanan sosial pekerja dan batasan intervensi teknologi. Tinjauan literatur dari disiplin agronomi secara eksplisit menegaskan bahwa pengenalan mesin pertanian modern sering mengalami kegagalan operasional karena alat-alat ini memerlukan radius putar yang terlalu lebar (Chapagain & Raizada, 2017). Beberapa studi lapangan lain di daerah pegunungan marginal juga mendokumentasikan bukti bahwa penggunaan paksa gerobak dorong standar sebenarnya dapat mengancam keselamatan pekerja karena risiko tergelincir. Kelangkaan alat mekanis yang sesuai untuk jenis medan ini pada akhirnya berarti bahwa seluruh beban fisik irigasi harus diatasi secara manual oleh tenaga manusia (Apazhev et al., 2021).

Metode

Unit analisis utama pada tahap penelitian ini adalah seluruh proses desain alat irigasi portabel yang akan diberi nama TIRTA. Pemilihan unit analisis ini didasarkan pada urgensi dokumentasi metodologis dalam menanggapi tantangan topografi ekstrem di sawah terasering. Fokus pada alur proses desain ini dianggap krusial untuk membuktikan secara teoretis bahwa intervensi desain dapat mengatasi masalah beban kerja fisik kelompok petani. Secara operasional, proses desain ini diteliti secara cermat

mulai dari fase pengumpulan empati mendalam di lapangan hingga tahap pengujian mekanis lengkap prototipe. Para peneliti secara khusus memfokuskan pengamatan mereka pada pola interaksi antara pengguna rentan dan objek produk saat disimulasikan langsung dalam lingkungan kerja nyata. Serangkaian analisis terhadap unit-unit target ini pada akhirnya bertujuan untuk menciptakan alat fisik yang sepenuhnya memprioritaskan keselamatan pengguna.

Desain penelitian ini menggunakan studi perancangan produk terapan yang dibingkai oleh metode *Human-Centered Design* (HCD) dan diintegrasikan dengan evaluasi ergonomi komparatif. Pilihan desain penelitian ini dianggap relevan untuk memecahkan masalah ergonomis kompleks yang mensyaratkan pengguna sebagai pusat keputusan teknis, sehingga bias desainer yang kerap mengabaikan batasan fisik pekerja lapangan dapat dihindari (Harte et al., 2017). Siklus penciptaan produk dilakukan secara berulang (*iteratif*) merujuk pada prinsip pemahaman konteks, formulasi ide visual, pembuatan purwarupa, dan evaluasi simulasi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4 (Kheder, 2023). Pendekatan iteratif seperti ini sejalan dengan tahapan design thinking yang jamak diadaptasi dalam studi perancangan desain produk terapan untuk menghasilkan prototipe akhir yang tervalidasi (Luthfi et al., 2025). Melalui siklus berulang ini, kesalahan teknis pada bentuk awal dapat segera diidentifikasi untuk direvisi.



Gambar 4. Bagan alir siklus Human-Centered Design (HCD).

Sumber: Hasil Analisis Peneliti

Sumber data utama dalam studi empiris ini melibatkan partisipasi aktif 12 pekerja tani di sawah terasering. Pemilihan sampel dilakukan secara *purposive sampling* dengan kriteria inklusi spesifik: (1) petani aktif yang mengelola lahan dengan kemiringan ekstrem, (2) merepresentasikan kelompok rentan (terdiri dari 7 perempuan dan 5 lansia di atas usia 60 tahun), dan (3) memiliki keluhan nyeri muskuloskeletal harian. Seluruh interaksi observasi dan prosedur simulasi pengujian dilakukan di lingkungan kerja nyata (sawah terasering) pada jam kerja reguler. Proses pengujian ini menerapkan standar etika penelitian untuk menjamin keselamatan dan persetujuan sukarela (*informed consent*) dari seluruh partisipan. Pengumpulan data lapangan dilakukan melalui triangulasi teknik: observasi partisipatif, penggalian keluhan, dan uji purwarupa berskala penuh. Pada tahap perancangan ide, metode eksplorasi kreatif diterapkan secara visual melalui pembuatan sketsa alternatif dan pemodelan tiga dimensi (3D) guna merespons fungsi operasional (Harte et al., 2017). Meskipun penerapan prinsip preferensi estetika sering kali difokuskan pada desain ruang arsitektur modern (Ripardi et al., 2026), penelitian ini mengadaptasi pendekatan evaluasi visual serupa untuk mendesain bentuk purwarupa yang dapat diterima secara emosional oleh pengguna lansia di lapangan. Eksplorasi visual ini secara spesifik mengevaluasi konfigurasi sistem penahan beban dan simulasi tata letak komponen untuk memastikan dimensi produk akhir tidak membatasi radius putar tubuh pengguna di jalur tapak yang sempit. Temuan visual dan umpan balik verbal mengenai hambatan distribusi beban ini kemudian dikalibrasi dengan data antropometri untuk memfinalisasi spesifikasi purwarupa.

Untuk mengukur efektivitas intervensi desain, tahap analisis data dikerjakan melalui evaluasi heuristik deskriptif yang dikombinasikan dengan pengukuran kuantitatif *Rapid Entire Body Assessment* (REBA). Prosedur evaluasi REBA dilakukan secara transparan melalui perekaman video pada dua skenario operasional: manuver pendakian dan penuangan air. Penilaian postur (*scoring*) dilakukan secara independen oleh dua penilai (*rater*) yang memahami kaidah biomekanika untuk menjaga reliabilitas data (Donisi et al., 2022). Skor diekstraksi dari *freeze-frame* video yang merepresentasikan sudut postur paling ekstrem (puncak tegangan otot) saat partisipan menggunakan alat konvensional dibandingkan dengan purwarupa TIRTA. Hasil observasi postur dan titik pembebanan ini kemudian disintesis secara kualitatif dalam Tabel 1 guna menetapkan parameter modifikasi sasis dan validasi tingkat penurunan risiko cedera fisik partisipan.

Tabel 1. Perbandingan evaluasi heuristik ergonomi.

Parameter Heuristik Ergonomi	Penggunaan Alat Irigasi Konvensional	Penggunaan Purwarupa TIRTA
Postur Tubuh Dominan	Cenderung membungkuk untuk menyesuaikan kontur pijakan dan letak wadah.	Tegak natural mengikuti alur dorongan gagang pada rangka roda.
Titik Distribusi Beban	Asimetris karena hanya bertumpu pada tarikan satu sisi lengan atau bahu.	Beban statis merata pada bahu dan punggung serta ditopang oleh sumbu roda.
Mekanisme Penuangan Air	Menuntut tenaga dinamis untuk mengangkat dan memiringkan wadah berulang kali.	Statis dan presisi karena hanya perlu membuka katup selang beraliran gravitasi.
Tingkat Risiko Cedera Otot	Sangat tinggi terutama pada area tulang belakang bagian bawah dan pergelangan tangan.	Rendah karena beban kejut pada lengan dialihkan menjadi dorongan beban ringan.
Keseimbangan Manuver	Rawan tergelincir akibat pusat gravitasi tubuh yang tidak stabil (lihat Tabel 2).	Sangat stabil karena roda tunggal berfungsi sebagai titik tumpu tambahan di tanah.

Sumber: Hasil Analisis Peneliti

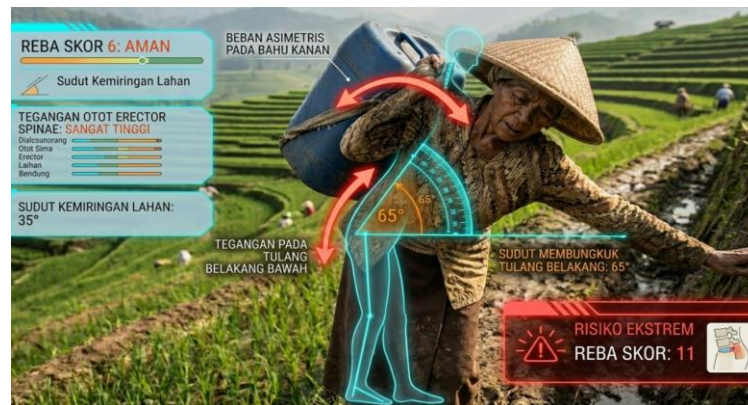
Hasil dan Pembahasan

Tahapan perancangan desain alat bantu irigasi ini pada akhirnya diwujudkan secara utuh dalam sebuah purwarupa yang diberi nama TIRTA. Penamaan purwarupa TIRTA ini diadaptasi dari kosakata bahasa Sanskerta yang memiliki makna harfiah air atau kehidupan, yang secara kuat merepresentasikan tujuan utama alat ini dalam mengalirkan napas kehidupan bagi lahan pertanian. Sesuai dengan penerapan tahapan pendekatan *Human-Centered Design*, hasil dan pembahasan pada penelitian penciptaan desain ini diuraikan ke dalam tiga fase pembuktian empiris secara berurutan. Ketiga fase operasional tersebut mencakup tahapan identifikasi masalah nyata pengguna, uji coba biomekanika purwarupa bentuk awal, hingga tahapan evaluasi fungsional wujud akhir produk.

Identifikasi Masalah: Rekonstruksi Kebutuhan Pengguna

Tahap awal proses desain sepenuhnya berfokus pada membangun empati untuk mengidentifikasi kebutuhan nyata pengguna di lahan terasering. Pengamatan partisipatif dan wawancara mendalam menunjukkan bahwa petani yang paling rentan, yang sebagian besar adalah perempuan dan lansia, masih sangat bergantung pada jerigen air konvensional. Penggunaan terus-menerus wadah standar berkapasitas besar ini memaksa petani untuk membawa beban yang tidak seimbang di satu bahu saat menaiki jalan setapak yang sempit. Lebih jauh lagi, pada fase penuangan air, ketiadaan mekanisme aliran yang efisien memaksa mereka memiringkan jerigen sambil mempertahankan postur membungkuk yang menahan beban statis. Temuan lapangan terkait keluhan tentang postur yang

menyakitkan dan ketidakcocokan dimensi alat dengan medan ekstrem telah dicatat secara komprehensif dan divisualisasikan dengan anotasi teknis pada Gambar 5.



Gambar 5. Identifikasi skor bahaya postur kerja (REBA) pada jerigen konvensional.
Sumber: Hasil Analisis Peneliti

Polanya, keluhan yang tercatat dari informan secara konsisten menunjukkan tingkat kelelahan fisik yang tinggi akibat mekanisme transportasi air yang sama sekali tidak ergonomis. Pemetaan data lapangan melalui analisis postur menunjukkan bahwa petani terpaksa membungkuk secara ekstrem untuk menyeimbangkan pusat gravitasi mereka saat menyeberangi lereng curam. Posisi anatomis membungkuk dengan beban statis yang sangat berat ini menghasilkan skor risiko yang sangat mengkhawatirkan untuk cedera punggung bawah. Postur kerja yang memaksa pengguna untuk terus menunduk dan membungkuk secara ekstrem telah terbukti secara empiris menghasilkan skor risiko REBA tingkat tinggi yang menuntut intervensi perancangan fasilitas kerja secepatnya (Ibrahim, 2021). Kondisi empiris ini secara jelas mengonfirmasi keluhan nyeri otot harian yang dialami sebagian besar peserta penelitian selama periode penyiraman tanaman di lapangan.

Berdasarkan analisis lebih lanjut, ketidakmampuan alat konvensional untuk mendukung mobilitas lancar pekerjaan petani bukan sekadar masalah kebiasaan, tetapi kegagalan desain fundamental. Dalam tinjauan rekayasa ergonomis, produk portabel harus dirancang dengan cermat, mempertimbangkan keseimbangan antara berat alat dan kapasitas maksimum pengguna manusia (Sun et al., 2019). Fenomena kelelahan fisik ekstrem yang dialami pekerja di ladang terasering umumnya terjadi karena produsen alat pertanian besar cenderung menetapkan standar desain hanya untuk lahan datar. Akibatnya, penggunaan paksa alat yang sama sekali tidak adaptif menciptakan risiko tinggi bagi keselamatan kerja kelompok demografis rentan (Iqbal et al., 2025). Temuan empiris pada tahap identifikasi awal ini secara kuat mengonfirmasi studi literatur sebelumnya tentang kerentanan sosial yang tinggi dalam sistem pertanian marjinal. Akses terbatas terhadap alat mekanisasi berat modern di daerah pegunungan sering kali menempatkan seluruh tanggung jawab operasional pada daya tahan fisik tenaga kerja manual (Apazhev et al., 2021). Para peneliti mengembangkan pemahaman mendalam tentang desain alat yang gagal dan penderitaan fisik penggunanya sebagai dasar utama untuk mengembangkan spesifikasi teknis dalam proses desain selanjutnya. Rekonstruksi empati terhadap kebutuhan ini secara langsung memicu ide awal untuk memindahkan beban dari bahu ke kerangka beroda, yang kemudian diwujudkan dalam prototipe TIRTA.

Formulasi Desain: Uji Biomekanika dan Antropometri Purwarupa Awal

Menanggapi temuan risiko cedera yang tinggi akibat distribusi beban yang asimetris, fase desain dilanjutkan dengan pengembangan purwarupa TIRTA. Sebelum menentukan spesifikasi akhir, strategi eksplorasi desain mempertimbangkan pendekatan sistem penahan beban alternatif. Desainer sempat mengeksplorasi penggunaan sistem pikulan menyilang dan keranjang dorong beroda ganda. Namun, diskusi partisipatif yang disertai dengan simulasi visual bersama pengguna mengonfirmasi bahwa

keranjang beroda ganda membutuhkan radius putar yang terlalu lebar untuk kontur terasering, sementara pikulan menyilang tetap membebani tulang belakang secara tidak merata. Oleh karena itu, strategi desain memutuskan bahwa integrasi sasis roda tunggal dengan tangki punggung merupakan solusi paling adaptif untuk bermanuver di medan sempit.

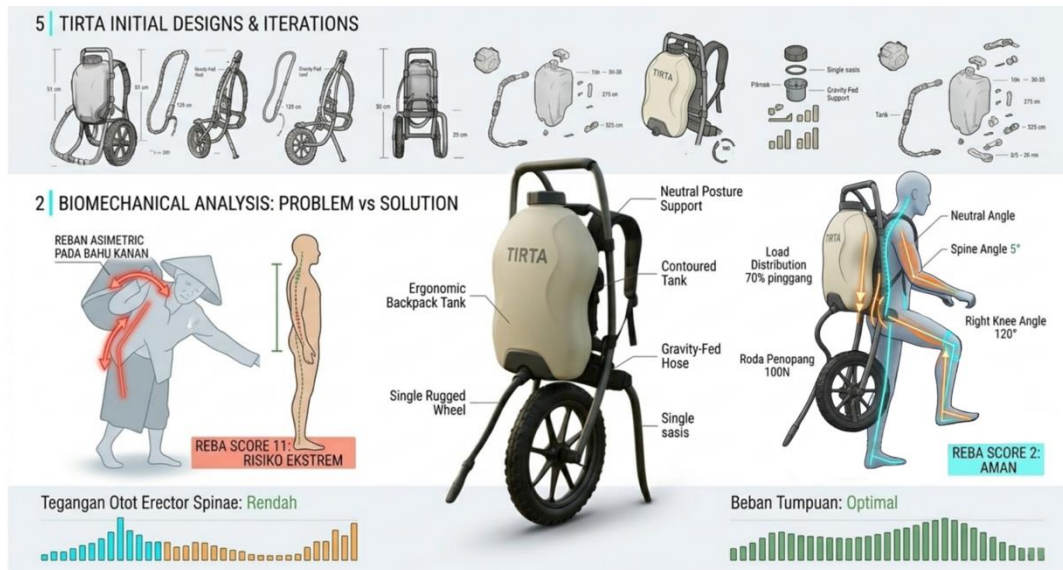
Keputusan desain ini sangat bergantung pada korelasi presisi antara dimensi tinggi pengguna dan kemampuan mobilitas perangkat. Penggunaan data antropometri pekerja secara spesifik dalam penentuan dimensi ini sangat penting untuk memastikan desain akhir memberikan dukungan postur yang optimal dan mencegah risiko cedera lanjutan (Annas et al., 2024). Rincian transformasi data antropometri persentil rata-rata kelompok rentan menjadi spesifikasi teknis disajikan secara sistematis dalam Tabel 2. Penyesuaian tuas pegangan (ketinggian fleksibel 90-105 cm) secara khusus didasarkan pada tinggi siku persentil ke-50 pekerja perempuan. Penggunaan persentil ke-50 ini dipilih sebagai titik tengah (*baseline*) yang aman karena komponen purwarupa seperti tuas pegangan bersifat fleksibel dan dapat diatur ketinggiannya, sehingga tetap dapat mengakomodasi variasi ekstrem persentil penggunaannya. Korelasi dimensi ini dirancang untuk menjaga postur netral yang tidak membungkuk, sekaligus menjamin kenyamanan biomekanik secara berkelanjutan pada tiga fase operasi esensial: sebelum penggunaan (kemudahan mengangkat dan memposisikan tangki di punggung), selama penggunaan (stabilitas bermanuver ketika langkah kaki tidak menabrak sasis alat), dan setelah penggunaan (kemudahan melepaskan alat tanpa memicu sentakan mendadak pada otot pinggang bawah).

Tabel 2. Spesifikasi ergonomis purwarupa TIRTA berdasarkan data antropometri.

Komponen Desain	Parameter Antropometri Utama	Data Numerik Persentil 50 (Pengguna Perempuan)	Rasionalisasi Ergonomis (Solusi TIRTA)
Sistem Pegangan (Handle)	Tinggi Siku Berdiri	[92 cm—98 cm]	Ketinggian fleksibel (90 hingga 105 cm) untuk menjaga sudut netral pergelangan tangan.
Geometri Tangki Punggung	Lebar Bahu (Biacromial) & Tinggi Punggung	Lebar Bahu: [36 cm] Tinggi Punggung: [42 cm]	Profil melengkung 35 cm guna mendistribusikan beban statis secara merata.
Sasis Roda Tunggal	Jangkauan Tangan ke Depan & Lebar Langkah	Jangkauan: [65 cm] Langkah: [55 cm]	Penempatan titik berat tepat di atas poros roda untuk reduksi beban lengan.
Dimensi Total Unit	Ruang Ayun Lengan (Rentang Siku ke Siku)	Rentang Ayun: [45 cm]	Lebar maksimal 40 cm untuk menjamin manuverabilitas di jalan setapak yang sempit.

Sumber: Hasil Analisis Peneliti

Selain mengandalkan desain tangki belakang, desain inovatif ini juga mengintegrasikan rangka penyangga roda tunggal sebagai solusi peredam massa beban. Pemilihan mekanisme roda tunggal ini didasarkan pada perhitungan ruang teknis untuk memastikan perangkat tetap lincah saat bermanuver di teras yang sangat sempit dan berbatu. Untuk mencapai bentuk fisik yang fungsional, komponen sasis dirakit menggunakan bahan pipa aluminium ringan, sementara tangki belakang dicetak menggunakan bahan polimer PVC dengan kapasitas volume maksimal 15 liter, sehingga berat kosong perangkat (sekitar 2,5 kg) tetap dalam batas toleransi pengguna. Sistem konstruksi rangka mekanis modular ini memungkinkan pengguna untuk secara fleksibel beralih antara membawa beban penuh di punggung dan mendorong perangkat untuk menyesuaikan dengan kontur permukaan. Transformasi ide konseptual dari sketsa awal hingga tahap modeling tiga dimensi berdasarkan pembacaan data antropometrik dijelaskan secara rinci dalam Gambar 6.



Gambar 6. Desain final purwarupa TIRTA beserta rincian komponen mekanis dan mode penggunaannya.
Sumber: Hasil Analisis Peneliti

Evaluasi prototipe awal ini kemudian diuji langsung di lapangan menggunakan pendekatan analisis biomekanika terhadap postur tubuh. Uji operasional ini sangat sejalan dengan tren penelitian ergonomi modern yang menekankan pentingnya merekam secara objektif tingkat ketegangan otot selama simulasi tugas di lingkungan kerja nyata (Stefana et al., 2021). Hasil uji kelayakan menunjukkan bahwa integrasi rangka roda dan tangki belakang mampu secara signifikan mengurangi tekanan puncak pada tulang belakang bawah dibandingkan dengan penggunaan wadah air konvensional. Penurunan aktivitas beban otot skeletal ini membuktikan bahwa rekayasa geometri produk yang berorientasi pada manusia efektif dalam mencapai standar kelayakan portabilitas ergonomis (Donisi et al., 2022). Kesuksesan simulasi manuverabilitas dan distribusi berat pada prototipe awal juga mengonfirmasi beberapa temuan dari studi sebelumnya terkait rekayasa alat pertanian portabel. Penerapan rangka roda tunggal pada prototipe TIRTA memberikan bukti empiris tambahan bahwa modifikasi titik dukungan mekanis dapat secara efektif mengatasi hambatan medan miring (Apazhev et al., 2021). Keputusan metodologis untuk terus memvalidasi interaksi antara tubuh pengguna dan beban fisik alat ini sangat penting untuk mencegah kegagalan desain yang sering terjadi pada inovasi perangkat konvensional. Meskipun beban statis selama fase mobilitas dorong telah berhasil diatasi, fase pengujian ini mengungkapkan temuan baru yang krusial bahwa pengguna masih harus mengeluarkan energi fisik berlebihan saat memiringkan tangki untuk menyiram tanaman.

Wujud Akhir TIRTA: Evaluasi Fitur Selang Gravitasi dan Dampak Ergonomis

Untuk mengatasi tantangan terkait pengerahan tenaga fisik yang berlebihan saat memiringkan wadah, tahap akhir siklus desain mengintegrasikan mekanisme selang berbasis gravitasi pada dasar tangki. Fitur aliran air alami ini memungkinkan petani untuk mengairi area akar tanaman tanpa perlu mengangkat beban tangki berulang kali. Untuk membuktikan efektivitas intervensi ini secara objektif dan menghindari klaim spekulatif, pengukuran *Rapid Entire Body Assessment* (REBA) diekstraksi ke dalam matriks komparatif yang merepresentasikan nilai modus (skor dominan) dari pengujian terhadap 12 partisipan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rincian Komparasi Skor REBA Berdasarkan Skenario Operasional

Skenario Uji Lapangan	Skor REBA Alat Konvensional	Skor REBA Purwarupa TIRTA	Analisis Penurunan Risiko Biomekanik
Manuver Pendakian (Mobilitas)	9 (Risiko Tinggi). Terdapat beban tarik asimetris pada lengan dan bahu saat menaiki kontur tanah miring.	3 (Risiko Rendah). Distribusi beban statis ke sasis roda mengeliminasi tekanan pada area lengan dan punggung atas.	Penurunan beban kompresi pada tulang belakang terjadi karena titik berat dialihkan dari bahu pengguna ke roda tunggal.
Penuangan Air (Irigasi)	11 (Risiko Sangat Tinggi). Posisi punggung membungkuk ekstrem untuk menyeimbangkan pusat gravitasi statis.	2 (Risiko Rendah). Postur punggung kembali netral (tegak) berkat efisiensi mekanisme selang gravitasi yang presisi.	Menghilangkan kebutuhan untuk membungkuk berulang (<i>repetitive trunk flexion</i>), menjaga otot <i>erector spinae</i> tetap relaks.

Sumber: Hasil Analisis Peneliti

Tabulasi data pada Tabel 3 memperlihatkan transparansi penurunan tingkat bahaya biomekanik. Pencapaian skor 2 (risiko rendah) pada skenario penuangan air memberikan bukti kuantitatif bahwa desain TIRTA mampu menarik kembali rutinitas postur kerja pekerja rentan ke dalam batas toleransi anatomis yang aman. Bukti perbandingan visual dari transformasi postur biomekanik ini dari posisi membungkuk ekstrem akibat alat konvensional menjadi postur berdiri netral dengan purwarupa TIRTA dapat dilihat secara jelas pada Gambar 7. Temuan ini secara kritis mengonfirmasi studi Stefana et al. (2021) dan Donisi et al. (2022) yang menegaskan bahwa rekayasa portabilitas fungsional tidak lagi boleh sekadar mengejar efisiensi mekanis, melainkan wajib menjadikan evaluasi beban otot (*muscular strain*) sebagai parameter utama keselamatan.



Gambar 7. Perbandingan visual postur tubuh antara penggunaan alat konvensional dan TIRTA.

Sumber: Dokumentasi peneliti

Integrasi akhir fitur selang gravitasi, tangki antropometrik, dan rangka roda ini pada akhirnya memberikan wawasan empiris mengenai adaptasi teknologi di lahan berlereng. Alih-alih mengklaimnya sebagai sebuah terobosan teoretis absolut yang menyaingi efisiensi sistem irigasi mikro berskala makro, hasil penelitian ini lebih tepat dimaknai sebagai model kontribusi desain terapan. Pendekatan purwarupa ini secara terukur telah mentransformasi tuntutan pekerjaan manual yang berisiko tinggi menjadi aktivitas yang lebih manusiawi dan selaras dengan kapabilitas fisik komunitas pekerja di topografi agrikultur marginal. Keberhasilan adaptasi teknologi ini didokumentasikan secara nyata pada Gambar 8, yang memperlihatkan bagaimana purwarupa TIRTA dioperasikan oleh petani perempuan lansia di kontur lahan terasering yang sempit.



Gambar 8. Perbandingan kondisi empiris postur petani saat menggunakan irigasi konvensional (kiri, tengah) dan purwarupa TIRTA (kanan).
Sumber: Dokumentasi peneliti

Selain secara terukur mampu mengembalikan postur netral pada fase utama penyiraman, observasi lapangan juga menunjukkan bahwa dimensi dan desain sasis TIRTA menawarkan fleksibilitas pergerakan yang sangat baik. Seperti yang didokumentasikan pada Gambar 9, purwarupa ini terbukti adaptif dan tidak menghalangi ruang gerak (*range of motion*), sehingga memungkinkan pengguna untuk tetap leluasa membungkuk saat melakukan tugas sekunder seperti merawat tanaman tanpa merasa terganggu oleh alat. Selain perbaikan postur fisik, umpan balik kualitatif selama pengujian menunjukkan tingkat penerimaan emosional yang tinggi, di mana partisipan lansia merasa purwarupa ini memberikan rasa aman dan tidak mengintimidasi untuk dioperasikan di lahan miring.



Gambar 9. Fleksibilitas operasional purwarupa TIRTA yang tidak menghalangi pergerakan natural pengguna saat melakukan tugas perawatan tanaman sekunder (kanan).
Sumber: Dokumentasi peneliti

Simpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa intervensi desain melalui pendekatan *Human-Centered Design* (HCD) pada purwarupa TIRTA terbukti efektif dalam meminimalkan risiko biomekanik pekerja di lahan terasering. Hasil evaluasi komparatif menegaskan bahwa integrasi tangki punggung antropometrik, sasis roda tunggal, dan mekanisme selang gravitasi mampu mendistribusikan beban fisik secara proporsional. Hal ini dibuktikan secara kuantitatif melalui penurunan skor REBA dari kategori risiko sangat tinggi pada penggunaan jerigen konvensional menjadi kategori risiko rendah saat mengoperasikan purwarupa TIRTA. Pengurangan beban statis yang asimetris ini secara langsung menghilangkan kebutuhan pengguna untuk membungkuk ekstrem saat mendaki maupun

menuangkan air. Dengan demikian, purwarupa ini secara terukur telah memenuhi kriteria portabilitas ergonomis yang ditargetkan pada fase awal perancangan. Dari segi kontribusi ilmiah, inovasi produk ini menawarkan model kontribusi desain terapan yang spesifik dalam mengatasi hambatan topografi di lanskap agrikultur marginal. Pendekatan desain purwarupa ini menunjukkan bahwa efisiensi fungsional alat pertanian harus diintegrasikan dengan parameter portabilitas ergonomis demi melindungi keselamatan fisik kelompok rentan, khususnya pekerja lansia dan perempuan. Temuan ini sekaligus menggarisbawahi pentingnya keterlibatan pengguna secara langsung dalam setiap tahapan keputusan teknis guna mencegah bias desainer. Solusi teknis yang dihasilkan membuktikan bahwa intervensi desain empiris mampu beradaptasi dengan kondisi kontur lingkungan yang sebelumnya membatasi efektivitas alat konvensional. Desain inklusif semacam ini menjadi wujud tanggung jawab praktis akademisi untuk menghadirkan alternatif teknologi kerja yang lebih manusiawi di lapangan.

Meskipun purwarupa ini berhasil menurunkan tingkat kelelahan fisik secara terukur, studi ini masih memiliki keterbatasan operasional yang perlu diperhatikan. Evaluasi pengujian saat ini baru dilakukan pada skala partisipan yang terbatas dengan variasi kemiringan tanah di satu wilayah pegunungan yang spesifik. Durasi simulasi yang relatif singkat juga belum mendokumentasikan secara menyeluruh dampak pada daya tahan fisik alat apabila digunakan secara intensif dalam jangka waktu panjang. Oleh karena itu, penelitian lanjutan sangat direkomendasikan untuk menguji performa alat ini menggunakan ukuran sampel demografis yang lebih luas dan kondisi kontur medan yang lebih beragam. Selain itu, eksplorasi terhadap penggunaan material komposit yang lebih ringan, tetapi tahan banting juga sangat krusial untuk mendukung kelayakan produksi massal di masa depan.

Referensi

- Annas, K., Efonda, D. N., Latif, F., & Islahudin, N. (2024). Perancangan alat penyimpanan rebung ergonomis menggunakan metode reverse engineering pada UMKM pengolahan rebung. *Jurnal Optimasi Teknik Industri (JOTI)*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.30998/joti.v6i1.22279>
- Apazhev, A., Egozhev, A., Misirov, M., Polishchuk, E., & Egozhev, A. (2021). Mathematical model for calculating the parameters of machines for processing near-trunk strips in a terrace. *E3S Web of Conferences*, 262, 01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126201019>
- Babangida, A. A., Caraballo-Arias, Y., Decataldo, F., & Violante, F. S. (2025). Advancing occupational medicine through wearable technology: a review of sensor systems for biomechanical risk assessment and work-related musculoskeletal disorder prevention. *ACS Sensors*, 10(8), 5410–5432. <https://doi.org/10.1021/acssensors.5c01578>
- Boy, G. A. (2017). Human-centered design of complex systems: An experience-based approach. *Design Science*, 3, e8. <https://doi.org/10.1017/dsj.2017.8>
- Chapagain, T., & Raizada, M. N. (2017). Agronomic challenges and opportunities for smallholder terrace agriculture in developing countries. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00331>
- Donisi, L., Cesarelli, G., Pisani, N., Ponsiglione, A., Ricciardi, C., & Capodaglio, E. (2022). Wearable sensors and artificial intelligence for physical ergonomics: a systematic review of literature. *Diagnostics*, 12(12), 3048. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12123048>
- Göttgens, I., & Oertelt-Prigione, S. (2021). The application of human-centered design approaches in health research and innovation: a narrative review of current practices. *JMIR MHealth and UHealth*, 9(12), e28102. <https://doi.org/10.2196/28102>
- Harte, R., Glynn, L., Rodríguez-Molinero, A., Baker, P. M., Scharf, T., Quinlan, L. R., & ÓLaighin, G. (2017). A human-centered design methodology to enhance the usability, human factors, and user experience of connected health systems: a three-phase methodology. *JMIR Human Factors*, 4(1), e8. <https://doi.org/10.2196/humanfactors.5443>
- Ibrahim, T. P. (2021). Usulan perancangan fasilitas kerja pada bagian assembling di PT. Red Basket Indonesia. *Scientific Journal of Industrial Engineering*, 2(1), 99–108.

- Iqbal, M., Uddin, S. M., Rahman, F. A., Hasan, S. S., Tahmid, M. M., & Khatun, A. (2025). Ergonomics in industrial design. *SciEn Conference Series: Engineering*, 3, 742–747. <https://doi.org/10.38032/scse.2025.3.186>
- Kheder, H. A. (2023). Human-computer interaction: enhancing user experience in interactive systems. *Kufa Journal of Engineering*, 14(4), 23–41. <https://doi.org/10.30572/2018/KJE/140403>
- Lebedev, S. A., Sirotiyuk, E. A., Shkhatpatsev, A. K., & Kravchenko, P. N. (2021). Ecological state of soils of the Republic of Adygea under high anthropogenic load. In *Soils of the North Caucasus: Ecology, Management, and Protection* (185–216). Springer. https://doi.org/10.1007/698_2021_741
- Luthfi, M., Susila, D. A., & Wibowo, D. (2025). Pemanfaatan limbah veneer kayu dalam perancangan kabinet dengan motif geometris sebagai unsur hias. *Jurnal Desain*, 13(1), 68–85. <https://doi.org/10.30998/jd.v13i1.38>
- Meliho, M., Khattabi, A., Noura, A., & Orlando, C. A. (2021). Role of agricultural terraces in flood and soil erosion risks control in the high Atlas Mountains of Morocco. *Earth*, 2(4), 746–763. <https://doi.org/10.3390/earth2040044>
- Moser, A., & Korstjens, I. (2022). Series: Practical guidance to qualitative research. Part 5: Co-creative qualitative approaches for emerging themes in primary care research: Experience-based co-design, user-centred design and community-based participatory research. *European Journal of General Practice*, 28(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/13814788.2021.2010700>
- Ripardi, R., Lestari, W., Nurhayati, K., & Murti, N. K. (2026). Peran media sosial dalam membentuk preferensi estetika dan representasi budaya lokal pada arsitektur modern. *Jurnal Desain*, 13(3), 693–710.
- Sinambela, S. (2022). Perancangan ulang fasilitas kereta galon dengan pendekatan konsep ergonomi di PT.XYZ. *Journal of Academia Perspectives*, 2(2), 140–154. <https://doi.org/10.30998/jap.v2i2.1123>
- Stanton, N. A., Salmon, P. M., Rafferty, L. A., Walker, G. H., Baber, C., & Jenkins, D. P. (2017). *Human Factors Methods*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315587394>
- Stefana, E., Marciano, F., Rossi, D., Cocca, P., & Tomasoni, G. (2021). Wearable devices for ergonomics: a systematic literature review. *Sensors*, 21(3), 777. <https://doi.org/10.3390/s21030777>
- Sun, X., Houssin, R., Renaud, J., & Gardoni, M. (2019). A review of methodologies for integrating human factors and ergonomics in engineering design. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 4961–4976. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1492161>
- Tzimourta, K. D. (2025). Human-centered design and development in digital health: approaches, challenges, and emerging trends. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.85897>
- Windrum, P., Frenken, K., & Green, L. (2017). The importance of ergonomic design in product innovation. Lessons from the development of the portable computer. *Industrial and Corporate Change*, 26(6), 953–971. <https://doi.org/10.1093/icc/dtx006>