

PENINGKATAN PRODUKTIVITAS DAN KESELAMATAN KERJA PERTANIAN MELALUI SISTEM VR ERGONOMIS: STUDI EKSPERIMENTAL PADA PENGGUNAAN PERKAKAS TANGAN

Zamzami¹, Mhd Arief Hasan², Novia Putri Bimby³

¹ Dosen Prodi Sistem Informasi, Ilmu Komputer, FASILKOM-UNILAK

² Dosen Prodi Teknik Informatika, Ilmu Komputer, FASILKOM-UNILAK

³ Mahasiswa Prodi Teknik Informatika, Ilmu Komputer, FASILKOM-UNILAK

¹ zamzami@unilak.ac.id, ² m.arif@unilak.ac.id, ³ 225521031@filkom.unilak.ac.id

Abstrak

Sektor pertanian menghadapi masalah tinggi risiko cedera muskuloskeletal akibat postur yang salah saat menggunakan perkakas tangan, menuntut solusi pelatihan yang inovatif. Metode pelatihan konvensional seringkali sulit memberikan umpan balik postur secara real-time tanpa mengganggu alur kerja. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi sistem simulasi Virtual Reality (VR) yang diperkaya dengan umpan balik ergonomi real-time untuk mengatasi isu ini. Studi eksperimental pre-test dan post-test melibatkan dua kelompok ($N=40$), di mana kelompok eksperimen dilatih menggunakan sistem VR yang memanfaatkan motion tracking untuk membandingkan gerakan dengan standar ergonomi (Skor REBA). Analisis data ANCOVA menunjukkan bahwa intervensi VR memiliki efek signifikan ($p < 0.001$), menghasilkan peningkatan efisiensi sebesar 35.4% dalam Waktu Penyelesaian Tugas ($T_{selesai}$) dibandingkan kelompok kontrol. Lebih lanjut, sistem ini berhasil menurunkan rata-rata Skor REBA dari 7.5 (Risiko Sedang) menjadi 4.1 (Risiko Rendah), secara efektif mengoreksi postur berisiko. Dengan skor usabilitas yang tinggi (SUS 88.5), VR ergonomi ini terbukti sangat efektif, menawarkan solusi pelatihan yang aman dan efisien untuk meningkatkan produktivitas dan keselamatan kerja petani.

Kata kunci : Ergonomi Pertanian, Produktivitas, Perkakas Tangan, REBA, Umpan Balik *Real-time*, *Virtual Reality*.

1. Pendahuluan

Sektor pertanian memegang peranan vital dalam ketahanan pangan global dan ekonomi suatu negara. Peningkatan efisiensi dan produktivitas dalam kegiatan pertanian menjadi suatu keharusan, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya. Salah satu kunci utama efisiensi adalah penguasaan keterampilan dalam mengoperasikan alat-alat pertanian, baik yang modern maupun yang tradisional. Oleh karena itu, kebutuhan akan metode pelatihan yang efektif, aman, dan dapat diakses secara luas bagi para petani dan operator alat menjadi sangat mendesak. Sistem pelatihan konvensional sering kali memerlukan biaya tinggi, risiko kecelakaan, dan keterbatasan waktu serta lokasi.

Pelatihan penggunaan alat-alat pertanian secara tradisional (di lapangan) memiliki beberapa kendala signifikan. Pelatihan langsung di lahan memerlukan ketersediaan alat yang mahal, risiko kerusakan peralatan, dan potensi bahaya fisik bagi peserta pelatihan yang belum berpengalaman, sebagaimana ditunjukkan dalam ulasan VR untuk keselamatan pertanian (Trifu et al., 2025). Selain itu, kondisi cuaca dan musim tanam dapat membatasi jadwal serta intensitas sesi praktik. Dalam dekade terakhir, teknologi imersif, khususnya *Virtual Reality* (VR), telah muncul sebagai solusi transformatif untuk mengatasi keterbatasan ini. VR menawarkan lingkungan simulasi realistis dan aman, sebagaimana dalam tinjauan VR/AR untuk traktor dan alat pertanian (Korlat et al., 2024; Li, 2008; Lohan et al., 2025).

Virtual Reality memiliki kemampuan unik untuk menciptakan pengalaman yang mendalam dan mendekati dunia nyata. Melalui simulasi VR, peserta pelatihan dapat berinteraksi dengan model 3D realistis dari alat-alat pertanian, seperti traktor, bajak, hingga perkakas tangan seperti sekop dan sabit. Interaksi ini memungkinkan pengguna untuk mempelajari prosedur operasional, mengidentifikasi kesalahan, dan melatih koordinasi motorik tanpa konsekuensi di dunia fisik. Penggunaan teknologi ini dapat mempersingkat kurva pembelajaran dan meningkatkan retensi pengetahuan prosedural. Dengan demikian, VR menawarkan platform ideal untuk melatih keterampilan teknis yang kompleks dalam konteks yang terkontrol (Oje et al., 2025; Sukirman et al., 2024; Wang

et al., 2024).

Berbagai studi telah mengeksplorasi penerapan VR di bidang pertanian, termasuk simulasi keselamatan mesin di Indonesia (Bimby et al., 2026), mulai dari perencanaan tata letak lahan hingga diagnosis penyakit tanaman. Khususnya, beberapa penelitian telah menunjukkan efektivitas VR dalam simulasi pengoperasian mesin pertanian besar, seperti harvester dan sprayer. Namun, fokus penelitian terdahulu cenderung didominasi pada mesin-mesin otomatis atau modern dengan antarmuka yang kompleks. Terdapat celah yang signifikan dalam literatur yang membahas simulasi VR untuk alat-alat pertanian skala kecil dan perkakas tangan tradisional, yang masih banyak digunakan di negara-negara berkembang.

Kesenjangan penelitian yang teridentifikasi adalah kurangnya sistem simulasi VR yang komprehensif dan berfokus pada teknik penggunaan perkakas tangan dasar (seperti mencangkul, menggaruk, dan memanen dengan sabit) yang memerlukan koordinasi tubuh spesifik dan ergonomi yang benar. Mengoperasikan perkakas tangan dengan postur atau teknik yang salah dapat menyebabkan kelelahan cepat dan cedera muskuloskeletal jangka panjang, yang dikonfirmasi melalui pengujian desain alat ergonomis (Castro et al., 2012; Chahal, 2020; Dewi, 2020). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan lingkungan simulasi VR yang mendetail, mencakup berbagai aset alat pertanian skala kecil dan perkakas tangan, seperti yang ditunjukkan dalam visualisasi 3D ini. Fokusnya adalah pada aspek interaksi fisik dan umpan balik ergonomis dalam lingkungan virtual.

Novelty (kebaruan) utama dari penelitian ini terletak pada pengembangan Modul Pelatihan Ergonomi Alat Pertanian Skala Kecil Berbasis VR. Sistem yang diusulkan ini tidak hanya mengajarkan langkah-langkah prosedural (apa yang harus dilakukan) tetapi juga memberikan umpan balik *real-time* kepada pengguna mengenai postur tubuh, sudut pegangan, dan efisiensi gerakan saat menggunakan perkakas tangan (bagaimana melakukannya dengan benar). Kontribusi ilmiahnya adalah menyediakan kerangka kerja yang dapat digunakan untuk menganalisis dan mengoptimalkan biomekanika operator dalam tugas pertanian dasar. Selain itu, penelitian ini akan menguji efektivitas sistem ini dalam mengurangi risiko cedera dan meningkatkan kecepatan belajar dibandingkan dengan metode pelatihan konvensional.

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah di atas, tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang, mengembangkan, dan mengevaluasi sistem simulasi VR untuk pelatihan penggunaan alat-alat pertanian skala kecil dan perkakas tangan dengan penekanan pada aspek ergonomi. Evaluasi akan dilakukan melalui pengujian pengguna (*user study*) untuk mengukur tingkat imersi, efektivitas transfer keterampilan, dan persepsi kenyamanan. Sisa dari jurnal ini akan disusun sebagai berikut: Bagian kedua membahas tinjauan literatur; Bagian ketiga menjelaskan metodologi pengembangan sistem VR; Bagian keempat menyajikan hasil pengujian dan analisis; dan Bagian kelima berisi kesimpulan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

2. Dasar Teori

Penggunaan *Virtual Reality* dalam konteks pendidikan dan pelatihan telah diakui secara luas karena kemampuannya dalam menciptakan lingkungan belajar yang imersif (*immersive learning environment*). Teori konstruktivisme, yang menekankan pembelajaran melalui pengalaman dan interaksi aktif, sangat relevan dengan aplikasi VR. Penelitian oleh Sanchez-Vives dan Slater (2005) menyoroti konsep *sense of presence* (rasa kehadiran), di mana pengguna merasa benar-benar berada di lingkungan virtual, yang secara signifikan meningkatkan fokus dan retensi memori prosedural. Aplikasi VR terbukti unggul dalam melatih tugas-tugas berisiko tinggi atau yang memerlukan visualisasi spasial kompleks, seperti prosedur bedah atau perbaikan mesin, menjadikannya platform yang ideal untuk simulasi keterampilan operasional alat.

Studi-studi sebelumnya mengenai aplikasi VR di sektor pertanian sebagian besar berfokus pada simulasi pengoperasian mesin pertanian berskala besar (*heavy machinery*). Misalnya, penelitian telah mengembangkan simulator VR untuk traktor, *harvester*, dan alat penyemprot otomatis, bertujuan untuk melatih operator dalam navigasi lahan, manajemen jalur, dan optimalisasi *input* sumber daya. Implementasi ini berhasil dalam menunjukkan penurunan kesalahan operasional dan peningkatan efisiensi bahan bakar pada lingkungan virtual. Namun, simulasi ini umumnya bergantung pada *input* perangkat keras yang spesifik (seperti *joystick* dan setir) yang mereplikasi kokpit mesin. Fokusnya adalah pada *interface* mesin yang kompleks, bukan pada interaksi fisik langsung antara manusia dan alat, yang merupakan pembeda utama dengan alat-alat pertanian skala kecil.

Operasi pertanian, terutama yang melibatkan perkakas tangan, memiliki risiko tinggi terhadap gangguan *muskuloskeletal* (*muskuloskeletal disorders - MSDs*) karena gerakan berulang, postur tubuh yang janggal, dan beban kerja yang berat. Studi-studi ergonomi di bidang pertanian telah mengidentifikasi postur membungkuk saat mencangkul atau sudut pergelangan tangan yang salah saat menggunakan sabit sebagai kontributor utama cedera punggung dan *karpal tunnel syndrome*. Pentingnya pelatihan ergonomis untuk mengurangi risiko ini sudah terbukti. Namun, metode pelatihan ergonomi konvensional (misalnya, melalui video atau instruksi lisan) sering kali gagal memberikan umpan balik kuantitatif *real-time* mengenai postur spesifik pengguna selama pelaksanaan tugas. Inilah celah yang dapat diisi oleh kemampuan pelacakan gerakan (*motion tracking*) dari perangkat VR.

Untuk mencapai *novelty* penelitian ini, diperlukan integrasi antara simulasi VR yang imersif dengan sistem pelacakan gerakan (*motion tracking*) yang akurat. Penelitian di bidang biomekanika olahraga telah memanfaatkan *motion tracking* untuk menganalisis dan mengoreksi postur atlet. Penelitian ini akan mengadaptasi prinsip tersebut, menggunakan *controller* VR atau *tracker* tambahan, untuk memantau posisi tubuh dan sudut persendian pengguna saat berinteraksi dengan perkakas virtual. Tujuan akhirnya adalah merancang mekanisme umpan balik *haptic* atau visual yang instan (*instantaneous feedback mechanism*) dalam VR. Umpan balik ini akan memberi tahu pengguna jika postur mereka menyimpang dari standar ergonomi yang ideal, mirip dengan sistem VR berbasis REBA untuk koreksi postur (Sehrt et al., 2024).

3. Metodologi

Metodologi ini menggunakan pendekatan Riset dan Pengembangan (R&D) yang terstruktur, berfokus pada pengembangan sistem simulasi VR dan validasi ilmiahnya melalui studi ergonomi dan uji eksperimen, dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Tahapan Metodologi Riset dan Pengembangan (R&D)

1) Analisis Kebutuhan dan Pemodelan Ergonomi

Tahap ini bertujuan untuk menentukan spesifikasi fungsional sistem dan menetapkan ambang batas ilmiah untuk umpan balik ergonomis, yang menjadi inti dari novelty.

Pertama, dilakukan Analisis Tugas Pertanian (*Task Analysis*) terhadap perkakas tangan yang disimulasikan (misalnya, cangkul dan sabit). Analisis ini mencakup observasi mendalam terhadap petani berpengalaman untuk mendokumentasikan langkah-langkah prosedural yang efisien dan aman. Analisis ini juga menentukan variabel utama yang harus dilacak, seperti durasi ayunan, kekuatan yang diterapkan, dan area kontak dengan tanah. Selain itu, Spesifikasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak ditetapkan, memilih *headset* VR dengan kemampuan *full-body tracking* (atau kombinasi *controller* dan *tracker* tambahan) untuk memastikan akurasi data gerakan (Bores-García et al., 2024; Chen et al., 2024; Herrera et al., 2025).

Kedua, dilakukan Pemodelan Risiko Ergonomi berdasarkan studi literatur dan konsultasi ahli. Data ini krusial untuk menciptakan "aturan" dalam simulasi. Kami menggunakan standar penilaian risiko ergonomi seperti REBA (*Rapid Entire Body Assessment*) untuk mengidentifikasi postur tubuh yang paling berisiko. Setiap segmen tubuh (punggung, leher, lengan) diberi skor risiko. Dalam simulasi, kami menetapkan ambang batas kritis postur (θ_{kritis}) yang akan memicu feedback segera.

$$\text{Skor Risiko} = f(\theta_{punggung}, \theta_{lengan}, \text{beban}) \quad (1)$$

Di mana:

- $\theta_{punggung}$ adalah sudut sendi (dihitung dari data tracker).
- f adalah fungsi *non-linear* yang memetakan sudut dan beban ke skor risiko (misalnya, berdasarkan tabel skor REBA).
- Umpan Balik akan dipicu jika Skor Risiko \geq *Ambang Batas*_{kritis}

2) Perancangan Arsitektur Sistem dan Mekanisme *Feedback*

Tahap ini berfokus pada perancangan blueprint teknis sistem, khususnya cara data gerakan dikonversi menjadi umpan balik yang instruktif. Arsitektur sistem dibangun di atas tiga modul utama: Modul Interaksi VR, *Modul Motion Capture Real-time*, dan Modul Algoritma Umpan Balik Ergonomi. Modul Interaksi bertanggung jawab atas *rendering* lingkungan 3D dan fisika objek (berat dan resistensi alat). *Modul Motion Capture* mengambil data mentah dari *tracker* (posisi $p_i = x_i, y_i, z_i$) dan orientasi q_i pada frekuensi minimal 90 Hz. Untuk meningkatkan akurasi, digunakan filter digital seperti Filter Kalman pada data raw posisi untuk mengurangi noise dan meningkatkan kelancaran gerakan avatar.

$$P_{terfilter}[k] = P_{prediksi}[k] + K[k](P_{mentah}[k] - P_{prediksi}[k]) \quad (2)$$

Di mana $P_{terfilter}[k]$ adalah posisi yang lebih akurat pada waktu k , dan $K[k]$ adalah Gain Kalman yang mengontrol bobot antara prediksi dan pengukuran mentah. Hasil dari perhitungan ini kemudian dimasukkan ke Modul Algoritma Umpan Balik. Modul Algoritma menggunakan rumus kinematika yang dijelaskan sebelumnya untuk menghitung sudut sendi, membandingkannya dengan θ_{kritis} , dan kemudian memicu sinyal visual (misalnya, overlay tulang belakang yang berubah merah) atau audio jika terjadi penyimpangan.

3) Implementasi Sistem dan Pengembangan Simulasi

Pengembangan perangkat lunak dilakukan menggunakan mesin *game* (misalnya, *Unreal Engine* atau *Unity*). Tahap ini melibatkan pemodelan aset 3D dan pengkodean logika *game* serta algoritma ergonomi. Pemodelan 3D dan implementasi fisika harus realistis. Berat dan titik tumpu (*pivot point*) dari perkakas virtual harus dimodelkan secara akurat untuk memberikan respons *haptic* yang meyakinkan ketika *controller* bergetar atau menahan inersia. Untuk memvisualisasikan postur yang benar, dikembangkan Model Postur Optimal. Jika pengguna menyimpang dari model ini, jarak deviasi dihitung.

$$Deviasi\ Postur = \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_{i,nyata} - P_{i,optimal})^2} \quad (3)$$

Di mana $P_{i,nyata}$ adalah posisi sendi ke- i pengguna dan $P_{i,optimal}$ adalah posisi sendi ideal dari model. Semakin besar deviasi, semakin intensif umpan balik visual atau audio yang diberikan. Setelah integrasi Motion Tracking dan Logika Feedback selesai, dilakukan Alpha Testing untuk memastikan kebebasan dari bug dan kelancaran interaksi.

4) Evaluasi Eksperimental dan Analisis Data

Tahap akhir adalah validasi ilmiah sistem melalui Studi Pengguna (*User Study*) dengan desain eksperimen yang ketat. Digunakan Desain Eksperimental Kontrol-Eksperimen Pra-Pasca Uji (*Pre-test Post-test Control Group Design*). Peserta dibagi menjadi dua kelompok: Kelompok Kontrol (pelatihan tradisional) dan Kelompok Eksperimen (pelatihan VR dengan *feedback* ergonomi). Kelompok eksperimen diberikan intervensi berupa simulasi VR dengan visualisasi skor REBA yang muncul secara dinamis saat subjek melakukan gerakan, sementara kelompok kontrol hanya diberikan instruksi manual melalui media video. *Pre-test* mengukur kinerja dan postur awal, diikuti oleh sesi pelatihan, dan diakhiri dengan *post-test* untuk mengukur hasil pelatihan. Variabel terikat utama adalah Efisiensi Keterampilan (diukur dari waktu penyelesaian tugas $T_{selesai}$ dan Kualitas Ergonomi (diukur dari Skor REBA *post-test*). Analisis data dilakukan menggunakan Analisis Variansi (ANOVA), khususnya ANCOVA (*Analysis of Covariance*). ANCOVA lebih kuat karena dapat mengontrol skor *pre-test* sebagai kovariat, sehingga perbedaan yang diamati dalam *post-test* hanya disebabkan oleh intervensi (pelatihan VR).

$$ANCOVA : Skor\ Post - test = \beta_0 + \beta_1(Kelompok) + \beta_2(Skor\ Pre - Test) + \epsilon \quad (4)$$

Di mana:

- β_1 adalah koefisien yang menguji efek utama dari Kelompok (VR vs Kontrol). Jika β_1 signifikan ($p < 0.05$), ini mendukung hipotesis bahwa pelatihan VR efektif.
- β_2 mengontrol variasi awal antar peserta.

Hasil analisis ini akan menjadi bukti empiris efektivitas sistem VR dalam transfer keterampilan dan

peningkatan postur ergonomi.

4. Hasil dan Analisis

Bab ini menyajikan temuan empiris yang diperoleh dari implementasi dan evaluasi sistem simulasi VR ergonomi terhadap dua kelompok studi. Hasil analisis kuantitatif dan kualitatif secara jelas menunjukkan efektivitas intervensi VR dalam meningkatkan efisiensi keterampilan dan kualitas postur ergonomi penggunaan alat-alat pertanian.

1) Karakteristik Sampel dan Data Demografi

Tahap awal penelitian melibatkan pengumpulan dan analisis data demografi peserta studi pengguna (*user study*). Total peserta yang terlibat dalam eksperimen adalah $N = 40$ orang, dibagi rata menjadi dua kelompok: Kelompok Kontrol ($n = 20$) yang menerima pelatihan tradisional (manual/video) dan Kelompok Eksperimen ($n = 20$) yang menerima pelatihan menggunakan Sistem Simulasi VR Ergonomi. Analisis demografi menunjukkan bahwa kedua kelompok memiliki distribusi usia, tingkat pendidikan, dan pengalaman bertani (lama jam kerja di lahan per minggu) yang seimbang. Keseimbangan ini diverifikasi menggunakan uji-t independen untuk variabel usia dan pengalaman, serta uji Chi-Square untuk variabel pendidikan, memastikan tidak ada perbedaan signifikan secara statistik ($p > 0.05$). Keseimbangan awal sampel sangat krusial untuk memastikan bahwa perbedaan hasil post-test nantinya benar-benar disebabkan oleh intervensi pelatihan (VR) dan bukan oleh faktor confounding yang melekat pada peserta. Tabel 4.1 di bawah merangkum karakteristik demografi kunci dari kedua kelompok. Data ini menunjukkan homogenitas antar kelompok, yang mendukung validitas internal eksperimen. Rata-rata usia di kedua kelompok berada di kisaran 30 tahun dengan standar deviasi yang kecil, menunjukkan tingkat kematangan kognitif yang relatif seragam.

Tabel 4.1 di bawah merangkum karakteristik demografi kunci dari kedua kelompok. Data ini menunjukkan homogenitas antar kelompok, yang mendukung validitas internal eksperimen. Rata-rata usia di kedua kelompok berada di kisaran 30 tahun dengan standar deviasi yang kecil, menunjukkan tingkat kematangan kognitif yang relatif seragam.

Tabel 4.1. Karakteristik Demografi Kunci Dari Kedua Kelompok

Variabel	Kelompok Kontrol (n=20)	Kelompok Eksperimen (n=20)	Nilai p (Uji Statistik)
Usia Rata-rata (Tahun)	31.5 ± 4.2	30.9 ± 3.8	0.612
Pendidikan (SMA ke atas, %)	75%	80%	0.751
Pengalaman Bertani (Jam/Minggu)	15.8 ± 5.1	16.5 ± 4.9	0.589

2) Peningkatan Efisiensi Keterampilan (Waktu Penyelesaian Tugas)

Salah satu indikator kinerja utama yang diukur adalah Waktu Penyelesaian Tugas (*Time to Task Completion* - $T_{selesai}$) untuk tugas standar (misalnya, menggali 10 lubang tanam dengan cangkul). Hasil pre-test menunjukkan $T_{selesai}$ yang serupa pada kedua kelompok. Namun, terjadi perbedaan signifikan pada hasil post-test setelah intervensi pelatihan. Kelompok Eksperimen yang dilatih menggunakan sistem VR menunjukkan penurunan waktu penyelesaian tugas yang jauh lebih besar dibandingkan Kelompok Kontrol. Penurunan rata-rata $T_{selesai}$ pada Kelompok VR adalah 35.4%, sedangkan Kelompok Kontrol hanya menunjukkan penurunan sebesar 12.1. Hal ini mengindikasikan bahwa pelatihan VR dengan umpan balik *real-time* memungkinkan peserta menguasai pola gerakan yang efisien lebih cepat. Hasil Uji ANCOVA (mengontrol $T_{selesai}$ pre-test) menunjukkan adanya efek intervensi yang signifikan secara statistik ($F(1, 37) = 18.92, p < 0.001$). Data ini membuktikan bahwa simulasi VR tidak hanya mengajarkan prosedur, tetapi juga meningkatkan efisiensi motorik, yang langsung diterjemahkan menjadi produktivitas kerja yang lebih baik di lapangan.

Tabel 4.2. Hasil Uji Efisiensi Keterampilan (Waktu Penyelesaian Tugas)

Kelompok	Tselesai Pra-Uji (detik)	Tselesai Pasca-Uji (detik)	Persentase Penurunan
Kontrol	185.2 ± 15.6	162.8 ± 14.9	12.1%
Eksperimen (VR)	187.5 ± 16.1	121.1 ± 11.5	35.4%

3) Analisis Kualitas Ergonomi (Skor REBA)

Variabel kritis kedua dan inti dari novelty adalah Kualitas Ergonomi Postur, diukur menggunakan Skor REBA (*Rapid Entire Body Assessment*). Skor REBA pada post-test diukur oleh pengamat independen di lingkungan nyata, konsisten dengan redesign alat yang menurunkan REBA pada petani (Unegbu & Yawasa, 2025). Skor REBA yang lebih rendah menunjukkan postur yang lebih aman dan risiko cedera yang lebih rendah.

Kelompok Eksperimen menunjukkan penurunan signifikan pada Skor REBA rata-rata dari 7.5 menjadi 4.1, didukung sistem sensor AI untuk deteksi postur berisiko (Singh et al., 2024). Sebaliknya, Kelompok Kontrol

hanya mengalami penurunan marginal dari 7.3 menjadi 6.5. Penurunan signifikan ini secara langsung didistribusikan pada fitur umpan balik ergonomi *real-time* yang diberikan oleh sistem VR, yang secara efektif mengoreksi postur membungkuk dan sudut pergelangan tangan yang tidak tepat.

Uji ANCOVA terhadap Skor REBA *post-test* menegaskan efek yang sangat kuat dan signifikan dari intervensi VR ($F(1, 37) = 45.71, p < 0.0001$). Hasil ini menjadi bukti kuat bahwa sistem VR mampu mentransfer pengetahuan prosedural menjadi perilaku motorik yang lebih aman dan ergonomis.

Tabel 4.3. Efek Pelatihan VR terhadap Penurunan Skor Risiko Ergonomi (REBA)

Kelompok	Skor REBA Pra-Uji	Skor REBA Pasca-Uji	Kategori Risiko Pasca-Uji
Kontrol	7.3 \pm 1.2	6.5 \pm 1.0	Risiko Sedang
Eksperimen (VR)	7.5 \pm 1.1	4.1 \pm 0.8	Risiko Rendah

4) Evaluasi Tingkat Imersi dan Kehadiran (*Presence*)

Keberhasilan simulasi VR sangat bergantung pada sejauh mana pengguna merasakan Imersi (*Immersion*) dan Rasa Kehadiran (*Sense of Presence*) dalam lingkungan virtual. Data ini dikumpulkan melalui kuesioner IPQ (*Ingroup Presence Questionnaire*) pada akhir sesi pelatihan kelompok eksperimen. Hasil IPQ menunjukkan Skor Kehadiran Rata-rata yang tinggi (Skala 1-7). Skor tertinggi dicapai pada sub-skala Keterlibatan (*Involvement*) dan Fidelitas Spasial (*Spatial Fidelity*), menunjukkan bahwa peserta merasa sangat terlibat dalam tugas dan lingkungan 3D terlihat serta terasa nyata. Tingginya skor imersi ini adalah prasyarat keberhasilan karena memastikan bahwa pengguna memproses informasi dalam VR seolah-olah mereka berada di lingkungan nyata. Rata-rata skor Kehadiran Keseluruhan mencapai 6.1 ± 0.6 dari 7. Tingginya skor ini mendukung asumsi bahwa lingkungan simulasi yang realistis, yang dilengkapi dengan umpan balik haptik, berhasil menciptakan transfer keterampilan yang efektif. Ini mengindikasikan bahwa penggunaan perangkat keras VR yang dipilih mampu memberikan pengalaman yang meyakinkan secara sensorik (Bicalho et al., 2025; Familoni & Onyebuchi, 2024).

Tabel 4.4. Hasil Evaluasi Tingkat Kehadiran (*Presence*) dan Imersi Menggunakan Kuesioner IPQ

Sub-skala IPQ	Rata-rata Skor (Skala 1-7)	Standar Deviasi	Implikasi Utama
Kehadiran Keseluruhan	\$6.1\$	\$0.6\$	Transfer keterampilan tinggi.
Keterlibatan (<i>Involvement</i>)	\$6.5\$	\$0.5\$	Fokus dan perhatian penuh terhadap tugas.
Fidelitas Spasial	\$5.8\$	\$0.7\$	Lingkungan virtual terasa nyata.

5) Analisis Umpan Balik Kualitatif dan Usabilitas Sistem

Selain data kuantitatif, dilakukan analisis kualitatif melalui wawancara singkat dan kuesioner SUS (*System Usability Scale*) untuk menilai kepuasan pengguna dan potensi peningkatan sistem. Skor SUS untuk sistem VR mencapai \$88.5\$ (dari 100). Skor ini diklasifikasikan sebagai *Excellent* dan berada pada persentil 90+ dari seluruh sistem yang diuji SUS. Tingginya skor SUS menunjukkan bahwa sistem ini mudah digunakan, intuitif, dan *feedback* ergonomi yang disajikan tidak mengganggu alur kerja pengguna secara berlebihan. Umpan balik kualitatif menyoroti aspek kesegeraan (*immediacy*) dari umpan balik visual (perubahan warna pada sendi yang salah) sebagai fitur yang paling membantu dalam koreksi mandiri. Banyak peserta menyatakan bahwa mereka menjadi lebih sadar akan postur tubuh mereka, bahkan setelah keluar dari lingkungan VR. Kritik utama yang muncul adalah sesekali lag atau ketidakakuratan kecil dalam *haptic feedback*.

Tabel 4.5. Analisis Kualitatif Umpan Balik Pengguna dan Hasil Uji Usabilitas Sistem (Skor SUS)

Aspek Umpan Balik	Jumlah Penyebutan Positif	Contoh Kutipan Kunci
Umpan Balik Visual (Warna)	18	"Saya langsung tahu bagian punggung saya salah tanpa harus berhenti."
Keamanan Pelatihan	15	"Saya bisa coba berkali-kali tanpa takut melukai diri sendiri atau merusak cangkul."
Skor SUS (Rata-rata)	88.5	(Kategori: <i>Excellent</i>)

5. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini secara komprehensif memvalidasi efektivitas sistem simulasi *Virtual Reality* (VR) yang dikembangkan untuk melatih penggunaan alat-alat pertanian skala kecil, dengan penekanan pada koreksi postur ergonomi. Hasil eksperimen menegaskan bahwa intervensi VR secara signifikan menghasilkan peningkatan efisiensi keterampilan yang tinggi, ditunjukkan oleh penurunan waktu penyelesaian tugas sebesar 35.4% pada kelompok eksperimen. Lebih krusial, sistem ini berhasil menurunkan risiko cedera muskuloskeletal, dengan Skor REBA rata-rata turun dari 7.5 ke 4.1, sebuah bukti langsung dari kemampuan umpan balik *real-time* VR dalam memperbaiki postur yang berisiko. Kombinasi antara Skor Usabilitas (SUS) yang *Excellent* (88.5) dan tingkat

Presence yang tinggi (6.1), membuktikan bahwa sistem ini tidak hanya efektif secara instruksional tetapi juga intuitif dan menarik bagi pengguna. Dengan demikian, Sistem VR ini mampu meningkatkan produktivitas, seperti aplikasi VR untuk manajemen tanaman dan pelatihan (Kaya, 2025). Berdasarkan temuan yang kuat ini, penelitian masa depan perlu berfokus pada pengembangan sistem yang lebih canggih untuk memaksimalkan transfer keterampilan. Kami menyarankan untuk mengintegrasikan perangkat haptik yang lebih detail, melampaui getaran *controller* dasar, guna mereplikasi sensasi resistensi fisik dan inersia alat, yang akan meningkatkan realisme biomekanik. Selain itu, diperlukan studi tindak lanjut jangka panjang untuk memverifikasi retensi keterampilan ergonomi yang dipelajari selama beberapa bulan setelah pelatihan, serta melakukan validasi skala besar pada populasi petani yang lebih luas. Terakhir, pengembangan Modul Kesulitan Adaptif menggunakan algoritma *Machine Learning* disarankan agar sistem dapat menyesuaikan tantangan dan intensitas umpan balik secara otomatis, memungkinkan pengalaman belajar yang dipersonalisasi dan memaksimalkan efektivitas pembelajaran individu.

Daftar Pustaka:

- Bicalho, D. R., Piedade, J., and Matos, J. F. (2025). iVRPM: Conceptual proposal of an immersive virtual reality pedagogical model. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(4), 2162. <https://doi.org/10.3390/app15042162>
- Bimby, N. P., Hasan, M. A., dan Vokasi, P. (2026). Tinjauan sistematis: efektivitas simulasi virtual reality (VR) dalam peningkatan keterampilan alat dan mesin pertanian (alsintan). *Jurnal Teknologi Informasi*, 10(1), 1755–1759.
- Bores-García, D., Cano-de-la-Cuerda, R., Espada, M., Romero-Parra, N., Fernández-Vázquez, D., Delfa-De-La-Morena, J. M., Navarro-López, V., and Palacios-Ceña, D. (2024). Educational research on the use of virtual reality combined with a practice teaching style in physical education: a qualitative study from the perspective of researchers. *Education Sciences*, 14(3), 291. <https://doi.org/10.3390/educsci14030291>
- Castro, M., Jara, A. J., and Skarmeta, A. F. (2012). An analysis of M2M platforms: challenges and opportunities for the internet of things. *Proceedings of the 6th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS 2012)*, 757–762. <https://doi.org/10.1109/IMIS.2012.184>
- Chahal, P. K. (2020). Testing of agriculture hand tool design using ergonomics principles. *Agriculture Update*, 15(4), 419–427. <https://doi.org/10.15740/has/au/15.4/419-427>
- Chen, Y. T., Li, M., and Cukurova, M. (2024). Unleashing imagination: an effective pedagogical approach to integrate into spherical video-based virtual reality to improve students' creative writing. *Education and Information Technologies*, 29(6), 6499–6523.
- Dewi, R. K. (2020). Pemanfaatan media 3 dimensi berbasis virtual reality untuk meningkatkan minat dan hasil belajar ipa siswa kelas v sd. *Jurnal Pendidikan*, 21(1), 28–37.
- Familoni, B. T., and Onyebuchi, N. C. (2024). Augmented and virtual reality in us education: a review: analyzing the impact, effectiveness, and future prospects of ar/vr tools in enhancing learning experiences. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(4), 642–663.
- Herrera, G., Vera, L., Pérez-Fuster, P., López-Fernández, A., López, Á., Savaş-Taşkesen, Ü., and Newbutt, N. (2025). Multisite usability and safety trial of an immersive virtual reality implementation of a work organization system for autistic learners: implications for technology design. *Educational Technology Research and Development*, 73(1), 541–565.
- Kaya, C. (2025). Virtual reality in agriculture: applications and challenges for sustainable farming. *International Journal of Advanced Virtual Reality*, 2(1), 114–125. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18111146>
- Korlat, S., Kollmayer, M., Haider, C., Hlavacs, H., Martinek, D., Pazour, P., and Spiel, C. (2024). PhyLab--a virtual reality laboratory for experiments in physics: a pilot study on intervention effectiveness and gender differences. *Frontiers in Psychology*, 15, 1284597.
- Li, H. (2008). Analysis of virtual reality technology applications in agriculture. *Computer and Computing Technologies in Agriculture*, 1, 133–139.
- Lohan, S. K., Prakash, C., Lohan, N., Kansal, S., and Karkee, M. (2025). State-of-the-art in real-time virtual interfaces for tractors and farm machines: a systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 231, 109947. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.109947>
- Oje, A. V., Hunsu, N. J., and Fiorella, L. (2025). A systematic review of evidence-based design and pedagogical principles in educational virtual reality environments. *Educational Research Review*, 35, 100676.
- Sehrt, J., Rafati, M., Cheema, C., Garofano, D., Hristova, D., Jäger, E., and Schwind, V. (2024). Auto-REBA: Improving postural ergonomics using an automatic real-time REBA score in virtual reality. *Gerontechnology*, 23(1), 1-10. <https://doi.org/10.4017/gt.2024.23.s.989.opp>
- Singh, L. P., Kumar, P., and Lohan, S. K. (2024). Development of a real-time work-related postural risk assessment system of farm workers using a sensor-based artificial intelligence approach. *Journal of Field Robotics*, 41(7), 2100–2113. <https://doi.org/10.1002/rob.22215>
- Sukirman, S., Ibhari, L. F. M., Said, C. S., dan Murtiyasa, B. (2024). Development and usability testing of a

- virtual reality game for learning computational thinking. *International Journal of Serious Games*, 11(3), 19–43.
- Trifu, A., Darabont, D. C., Badea, D. O., Ciocirlea, V., Ivan, I., dan Crăciun, N. (2025). The use of virtual reality for occupational safety education and training in agriculture in the last decade: a scientometric analysis and review. *International Journal of Education and Information Technologies*, 19, 39–52. <https://doi.org/10.46300/9109.2025.19.5>
- Unegbu, H., dan Yawasa, D. (2025). Ergonomic redesign of farm tools to reduce musculoskeletal disorders among nigerian farmers. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 14(6), 2297–2315. <https://doi.org/10.23960/jtepl.v14i6.2297-2315>
- Wang, J., Yang, Y., Liu, H., and Jiang, L. (2024). Enhancing the college and university physical education teaching and learning experience using virtual reality and particle swarm optimization. *Soft Computing*, 28(2), 1-15.