

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan proses pengembangan, implementasi, dan pengujian sistem yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem *home workout* berbasis *computer vision* berhasil dikembangkan dalam bentuk aplikasi desktop untuk mendeteksi dan menganalisis lima jenis gerakan, yaitu *jumping jacks*, *squat*, *mountain climber*, *knee push up*, dan *sit up*. Sistem mengintegrasikan YOLO untuk deteksi dan *tracking* pengguna, MediaPipe Pose untuk memperoleh *landmark* tubuh, model LSTM-Attention untuk mengenali jenis gerakan, serta aturan kinematik untuk mendeteksi fase, mengevaluasi postur, dan menghitung repetisi.
2. Model LSTM-Attention memperoleh akurasi sebesar 97,42% pada 349 data pengujian. Setelah diintegrasikan ke dalam aplikasi, model menghasilkan persentase prediksi benar sebesar 92% pada mode *single person* dan 90% secara gabungan pada mode *multi person*. Kesalahan klasifikasi terutama ditemukan pada kelas *squat*, *mountain climber*, dan *knee push up*, termasuk pada beberapa percobaan awal ketika sekuens gerakan belum sepenuhnya terbentuk.
3. Sistem mampu mendeteksi urutan fase dan penyelesaian siklus pada seluruh lima jenis gerakan. Gerakan yang tidak menyelesaikan seluruh urutan fase tidak dicatat sebagai repetisi. Pengujian validasi postur menghasilkan keputusan yang sesuai pada seluruh 17 skenario, yang terdiri atas 5 skenario postur valid dan 12 skenario postur tidak valid. Hasil tersebut menunjukkan bahwa aturan kinematik telah diimplementasikan secara konsisten pada skenario yang diuji, tetapi belum merepresentasikan seluruh variasi postur pengguna.
4. Mekanisme penghitungan repetisi berhasil menggabungkan hasil klasifikasi gerakan, penyelesaian siklus, dan validitas postur. Repetisi total hanya bertambah apabila jenis gerakan sesuai dengan *workout* aktif dan seluruh urutan fase telah diselesaikan. Repetisi valid bertambah apabila siklus tersebut juga memenuhi seluruh kriteria postur yang berlaku. Hasil evaluasi kemudian digunakan untuk memperbarui penghitung repetisi dan memberikan umpan balik secara *real-time*.
5. Sistem mampu menjalankan mode *single person* dan *multi person*. Pada kondisi penggunaan normal, data pose, *buffer* klasifikasi, status postur, dan penghitung repetisi setiap peserta dapat diproses secara terpisah. Namun, mekanisme *tracking multi person* masih memiliki keterbatasan ketika peserta saling bersilangan, bertukar posisi, atau salah satu peserta

keluar dari *frame*. Pada pengujian persilangan, identitas User1 dan User2 tertukar pada seluruh lima percobaan. Ketika salah satu peserta keluar dari *frame*, dua identitas sempat terasosiasi dengan peserta yang sama dan menyebabkan penghitung peserta yang telah keluar ikut bertambah pada dua dari lima percobaan.

6. Pengujian ketahanan deteksi menunjukkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan deteksi `person` dan estimasi pose pada pencahayaan rendah, perubahan sudut pengguna hingga 60°, serta subjek dari kelompok usia berbeda yang diuji. Perbedaan kelompok usia tidak secara langsung menyebabkan penurunan kestabilan estimasi pose pada skenario pengujian. Kualitas estimasi pose lebih dipengaruhi oleh keterlihatan tubuh, jarak pengguna terhadap kamera, ukuran tubuh dalam *frame*, dan oklusi. Oklusi pada lengan dan kaki menyebabkan pergeseran *landmark* dan *jitter* yang dapat memengaruhi perhitungan sudut sendi serta analisis gerakan.
7. Alur *pipeline* aplikasi dapat menjalankan pemrosesan secara berkelanjutan selama sesi latihan pada perangkat pengujian. Rata-rata latensi *end-to-end* tercatat sebesar 56,919 ms pada mode *single person* dan 74,880 ms pada mode *multi person*, dengan FPS efektif masing-masing sebesar 11,510 FPS dan 9,382 FPS. Mode *multi person* memberikan beban pemrosesan yang lebih tinggi, terutama pada latensi, *throughput* pemrosesan *frame*, dan penggunaan GPU.
8. Seluruh 35 skenario pengujian fungsional menghasilkan keluaran sesuai dengan kebutuhan yang ditetapkan. Aplikasi dapat menjalankan pengelolaan akun dan profil, konfigurasi *workout*, sesi latihan, umpan balik, penyimpanan hasil, pembuatan laporan, riwayat latihan, dan penggunaan beberapa sumber kamera. Pengujian non-fungsional juga menunjukkan bahwa aplikasi dapat menyelesaikan sesi *single person* dan *multi person* serta menjalankan beberapa sesi berturut-turut tanpa *crash*, *freeze*, atau kehilangan data pada kondisi pengujian.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan batasan sistem yang telah ditetapkan, beberapa saran untuk pengembangan selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Sistem dapat dikembangkan pada pelantar selain desktop, seperti perangkat seluler atau aplikasi berbasis web. Pengujian juga perlu dilakukan pada perangkat dengan variasi CPU, GPU, kapasitas memori, sistem operasi, dan resolusi kamera untuk mengevaluasi konsistensi latensi, *frame rate*, dan penggunaan sumber daya.

2. Cakupan gerakan dapat diperluas dengan menambahkan jenis *home workout* lainnya dan memberikan pilihan rangkaian latihan yang lebih fleksibel. Pengembangan model perlu disertai penambahan data dari lebih banyak subjek, variasi proporsi tubuh, sudut pengambilan gambar, kecepatan gerak, pakaian, dan kondisi lingkungan agar kemampuan generalisasi klasifikasi dapat ditingkatkan.
3. Umpan balik koreksi postur dapat dikembangkan menjadi lebih rinci. Umpan balik visual yang saat ini masih bersifat umum, terutama melalui perubahan warna kotak atau status postur, dapat dilengkapi dengan penandaan bagian tubuh yang tidak memenuhi kriteria, penjelasan mengenai kesalahan yang terdeteksi, serta instruksi korektif seperti memperdalam tekukan lutut, mengangkat tangan lebih tinggi, atau menjaga kesejajaran tubuh. Umpan balik dapat disajikan melalui teks, visualisasi *landmark*, indikator sudut, dan audio yang spesifik untuk setiap kesalahan.
4. Mekanisme *tracking multi person* perlu dikembangkan untuk menangani oklusi, persilangan, pertukaran posisi, serta kondisi peserta keluar dan kembali ke *frame*. Pengembangan dapat menerapkan *re-identification*, pengelolaan masa aktif lacak, validasi ulang identitas, dan mekanisme yang mencegah dua identitas terasosiasi dengan satu peserta. Perluasan dukungan menjadi lebih dari dua peserta harus disertai optimasi *pipeline* dan pengujian beban komputasi.
5. Pengembangan berikutnya dapat membandingkan penggunaan kamera RGB dengan kamera kedalaman atau mengombinasikannya dengan sensor tambahan, seperti *Inertial Measurement Unit* dan perangkat *wearable*. Pendekatan multimodal dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan analisis ketika tubuh mengalami oklusi atau tidak tertangkap secara optimal oleh kamera.