

Pengembangan Metode RULA Berbasis *Image Processing* dan *Deep Learning* untuk Penilaian Risiko Ergonomi Postur Kerja

Yessie Ardina Kusuma¹, Ridho Akbar¹, dan Muhammad Alfia P.H.A.¹

¹Departemen Teknik Industri, Universitas Muhammadiyah Surabaya
Jl. Raya Sutorejo No.59, Mulyorejo, Surabaya, Jawa Timur 60113
e-mail: yessie.ardina@um-surabaya.ac.id

Abstrak— Penelitian ini mengusulkan sistem perhitungan indeks risiko secara otomatis dengan memanfaatkan metode evaluasi Rapid Upper Limb Assessment (RULA). Sistem yang diusulkan mencakup perancangan *hardware* dan *software* yang menggabungkan sistem deteksi postur kerja tanpa memerlukan penambahan alat pada tubuh, melainkan menggunakan pemrosesan gambar dan memanfaatkan model *deep learning* MediaPipe. *Software* yang diusulkan secara spesifik mengestimasi postur kerja dari gambar yang diperoleh melalui *webcam real-time* atau gambar yang sudah ada. Selanjutnya, *software* menghitung sudut tubuh dan menghasilkan skor serta indeks risiko RULA. Pendekatan ini telah berhasil dievaluasi dalam skala laboratorium, dan penelitian ini memberikan gambaran komprehensif tentang sistem yang diusulkan, termasuk hasil validasi. Implementasi dan perbandingan hasil juga dilakukan dengan merujuk pada jurnal terkait. Sistem yang diusulkan memperoleh skor RULA 4, sedangkan jurnal pembandingan memperoleh skor RULA 6. Sistem yang diusulkan menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan secara efektif dapat memprediksi sudut kriteria RULA dengan signifikan, dan melakukan analisis RULA dengan akurasi yang sebanding atau bahkan lebih baik dibandingkan dengan analisis manual. Keefektifan ini tetap berlaku bahkan dalam kondisi yang tidak terduga yang biasanya dihadapi di lingkungan kerja.

Kata kunci: *penilaian resiko ergonomi, pemrosesan gambar, pembelajaran mendalam, rula, manufaktur*

Abstract— *This study proposes an automated risk index calculation system utilizing the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) evaluation method. The proposed system encompasses the design of both hardware and software, integrating a posture detection system without the need for additional body-worn devices. Instead, it leverages image processing and employs the MediaPipe deep learning model. The proposed software specifically estimates posture landmarks from real-time webcam images or existing pictures. Subsequently, the software calculates body angles, generates scores, and produces RULA risk indices. This approach has been successfully evaluated on a laboratory scale, providing a comprehensive overview of the proposed system, including validation results. Implementation and result comparisons were conducted by referring to relevant journals. The proposed system achieved a RULA score of 4, while the comparative journal obtained a RULA score of 6. The proposed system demonstrates its effectiveness in significantly predicting RULA criteria angles and performing RULA analysis with accuracy comparable to, or even surpassing, manual analysis. This effectiveness persists even in unexpected conditions commonly encountered in work environments.*

Keywords: *ergonomic risk assesment, image processing, deep learning, rula, manufactur*

I. PENDAHULUAN

Ergonomi merupakan suatu konsep yang sangat penting dalam desain sistem, mesin, peralatan, pekerjaan, lingkungan, dan aspek lain yang berhubungan dengan interaksi manusia.. Dalam penerapannya, ergonomi tidak hanya terfokus pada mesin ergonomis, tetapi juga melibatkan perancangan sistem dan fasilitas kerja yang memperhitungkan perilaku, kemampuan, dan keterbatasan manusia. Ergonomi juga terkait dengan optimalisasi, efisiensi, kesehatan, keamanan manusia, dan kenyamanan di tempat kerja [1]. Analisis postur tubuh dan aktivitas yang dilakukan oleh pekerja menjadi krusial dalam mengidentifikasi risiko biomekanik, terutama terkait dengan beban kerja pada tempat kerja. Posisi tubuh yang tidak

nyaman dapat mengurangi konsentrasi pekerja, meningkatkan frekuensi kecelakaan, dan memicu gangguan muskuloskeletal. Oleh karena itu, banyak metode analisis telah dikembangkan oleh ahli ergonomi, seperti *Rapid Upper Limb Assessment (RULA)* [2], *Rapid Entire Body Assesment (REBA)* [3], *Ovako Working Posture Analysis System (OWAS)* [4], dan *Nordic Body Map (NBM)* [5], untuk mengevaluasi dampak postur tubuh terhadap kesehatan.

RULA merupakan metode yang mudah untuk menilai risiko postur kerja. Penelitian sebelumnya [6], [7] menunjukkan bahwa metode observasional dianggap efektif dalam menilai beban kerja biomekanik, dengan keunggulan lebih fleksibel dan sedikit memakan waktu dibandingkan

dengan pengukuran skala laboratorium. RULA memungkinkan untuk memperoleh indeks numerik yang mewakili nilai kuantitatif risiko yang dihadapi pekerja selama aktivitas kerja yang ditargetkan, serta menentukan tingkat prioritas intervensi dan tindakan yang diperlukan. Metode RULA disarankan untuk identifikasi gangguan postur anggota tubuh atas, leher, dan punggung terkait dengan tindakan otot dan beban eksternal yang diterapkan pada tubuh. Metode ini dirujuk dalam standar internasional untuk penilaian risiko kerja [8] dan disebut sebagai metode terpilih untuk pencegahan Gangguan *Muskuloskeletal Disorders* (MSDs) oleh *International Ergonomics Association* (IEA) dan *World Health Organization* (WHO) [9]. Metode ini juga luas diterapkan dalam berbagai konteks kerja, terutama aktivitas kerja industri (sektor sekunder) dan produksi barang dan jasa (sektor tersier), yang ditandai dengan standarisasi tugas, geometri, gerakan, dan frekuensi eksekusi yang memungkinkan prediksi dan kuantifikasi beban kerja biomekanik secara sistematis dan terkontrol. Meskipun telah ada standar internasional yang mengatasi risiko biomekanik, penggunaan metode ini biasanya dilakukan secara manual oleh para ahli yang mengidentifikasi postur, tindakan, atau sudut sendi yang dapat menyebabkan bias subjektif, yang menyebabkan postur berisiko tinggi selama periode operasional terabaikan [10], [11]. Tantangan terhadap metode ini adalah untuk memberikan perbaikan segera atau pemantauan jangka panjang dari risiko kecelakaan kerja, karena memerlukan penilaian *offline*. Secara keseluruhan, dalam penggunaannya memakan waktu dan rawan kesalahan saat meninjau postur kerja secara manual. Oleh karena itu, mengotomatiskan identifikasi kerangka berisiko tinggi untuk penyelidikan lebih lanjut akan menjadi pendekatan yang berguna dan praktis.

Penilaian risiko gangguan MSDs secara *real-time* merupakan tantangan penelitian yang terus dihadapi [12]. Untuk mengatasi kendala ini, sejumlah penelitian telah mengusulkan berbagai metode, seperti pemasangan sensor pada tubuh, penggunaan sistem penangkapan gerak optik, dan analisis gerak berbasis gambar. Sebagai contoh, sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) telah digunakan untuk mengevaluasi *Ergonomic Assessment WorkSheet* (EAWS) [13] dan RULA. Namun, penggunaan metode ini dapat memengaruhi gerakan subjek dan menghasilkan evaluasi yang kurang akurat. Metode optik melibatkan penempatan penanda reflektif pada sendi atau posisi tertentu pada tubuh manusia untuk mendapatkan sudut atau postur sendi [14]. Penerapannya di lingkungan kerja sangat menantang, dan ketepatan penempatan penanda reflektif dapat terpengaruh oleh faktor lingkungan. Setiap metode akuisisi yang membutuhkan pemasangan sensor atau penanda optik pada tubuh manusia dapat memengaruhi alur kerja dan menyebabkan hasil penilaian yang tidak tepat.

Machine vision melibatkan teknik analisis gambar untuk mengukur gerakan dan sudut sendi tanpa menggunakan sensor yang dipasang pada tubuh manusia. Postur kerja dan gambar bergerak dapat direkam selama pengoperasian dalam waktu lama, dan kamera dapat menjadi alat yang tepat yang mudah dipasang di tempat kerja untuk mengumpulkan informasi. Model MediaPipe adalah model pengenalan postur yang menggunakan deep learning untuk menghitung sudut sambungan berdasarkan posisi sambungan dalam

gambar RGB [15]. Model ini menyediakan koordinat 2D dan 3D dari 33 sendi tubuh (*landmark*). Studi terbaru telah mengusulkan penggunaan model MediaPipe untuk mengenali postur kerja dan menemukan *landmark* secara *real-time* tanpa menggunakan sensor yang terpasang pada sendi tubuh.

Studi ini bertujuan untuk mengembangkan penilaian metode RULA dengan mengintegrasikan *machine vision* dan sudut sambungan sendi yang dihitung dari model MediaPipe. Langkah pertama adalah mengestimasi 33 *landmark* postur kerja yang diperoleh dari mengekstrak gambar atau foto. Kemudian memodifikasi *landmark* untuk menyesuaikan penilaian postur kerja kriteria RULA. Kemudian dilanjutkan dengan memberi garis penghubung setiap *landmark* dan *line-connection* yang selanjutnya digunakan untuk menghitung sudut sambungan. Selanjutnya sudut sambungan digunakan untuk penilaian postur kerja RULA dalam memperkirakan tingkat resiko MSDs. Pengujian meliputi estimasi postur kerja RULA dan menghitung skor RULA pada postur kerja pekerja. Implementasi sistem yang diusulkan selanjutnya digunakan untuk mengestimasi postur kerja pekerja, serta dibandingkan dengan jurnal referensi.

II. STUDI PUSTAKA

2.1 METODE PENILAIAN RISIKO ERGONOMI

Gangguan MSDs merupakan permasalahan kesehatan terkait pekerjaan yang krusial [16], [17] dan disebabkan oleh akumulasi beban muskuloskeletal akibat postur yang tidak sesuai yang diambil oleh pekerja selama pekerjaan manual. Untuk mengurangi MSDs, ahli ergonomi telah menggunakan protokol penilaian risiko ergonomi yang membantu mereka mengevaluasi risiko, yang didasarkan pada pengamatan langsung di lokasi kerja. Meskipun mudah digunakan dan dapat diterapkan pada banyak skenario kerja, metode ini memerlukan kegiatan pengamatan di lapangan atau analisis manual yang memakan waktu dan biaya. RULA [2] adalah alat penilaian "cepat" yang memberikan skor dari 1 (risiko terendah) hingga 7 (risiko tertinggi) untuk tugas yang dianalisis. Ini dilakukan dengan membandingkan sudut yang diambil oleh beberapa sendi tubuh (misalnya, leher terhadap punggung, siku, bahu, lutut) dengan rentang angular yang telah ditentukan. Metode ini juga mempertimbangkan beban otot dan frekuensi pengulangan postur dalam tugas untuk menghitung skor, tetapi tidak mempertimbangkan total durasi siklus. Metode RULA yang dikembangkan oleh Dr. Lynn McAtamney melalui beberapa tahap dibagi menjadi dua bagian yang disebut sebagai grup A dan grup B, sebagai berikut:

Grup A terdiri dari kriteria penilaian lengan atas, lengan bawah, dan pergelangan tangan,

Table 1. The Score of Upper Arm Movements

Movement	Score	Change Score
20° extension - 20° flexion	1	+1 if the shoulder is raising
Extension > 20° or 20° - 40° flexion	2	+1 if the upper arm is abducted
45° - 90° flexion	3	-1 if leaning, or the load of the arm is supported
90° flexion or >	4	

Nilai untuk lengan atas (Tabel 1) akan berada dalam rentang 1-6. Penilaian ini didasarkan pada sejauh mana bahu melakukan fleksi atau ekstensi, bersama dengan penyesuaian untuk bahu yang diangkat dan/atau diabdiksi. Fleksi bahu merujuk pada pergerakan anterior lengan atas dalam bidang sagital (gerakan ke depan), sementara ekstensi bahu merujuk

pada pergerakan posterior lengan atas dalam bidang sagital (gerakan ke belakang). Penyesuaian untuk elevasi dan abduksi lengan atas (bahu) juga dapat diterapkan. Penting untuk mencatat kemungkinan penyesuaian skor (-1) yang digunakan jika bahu pekerja didukung atau pekerja condong ke depan dengan cara tertentu sehingga gravitasi membantu posisi bahu.

Table 2. The Score of Lower Arm Movement

Movement	Score	Change Score
60° – 100° flexion	1	+1 if the arm moves beyond the center line of the body or its side
<60° flexion atau >100° flexion	2	

Nilai untuk lengan bawah (Tabel 2) akan berada dalam rentang 1 - 3. Penilaian ini bergantung pada seberapa besar fleksi atau pembengkokan siku. Pilih penyesuaian lengan bawah jika salah satu lengan bawah bekerja melintasi garis tengah atau ke arah luar tubuh.

Table 3. The Score of Wrist Movements

Movement	Score	Change Score
Netral Position	1	
0° – 15° flexion / extension	2	+1 if the wrists are on either radial or ulnar deviation
>15° flexion / extension	3	

Nilai untuk pergelangan tangan (Tabel 3) akan berada dalam rentang 1 - 4. Penilaian ini bergantung pada sejauh mana fleksi atau ekstensi pergelangan tangan, disertai dengan kemungkinan penyesuaian +1 jika diperlukan deviasi pergelangan tangan. Pilih putaran pronasi atau supinasi pergelangan tangan jika pergelangan tangan berputar di tengah rentang gerak atau jika pergelangan tangan berputar di atau dekat ujung rentang gerak.

Grup B, Skor dan rentangnya terdiri dari leher, tubuh, dan kaki sebagai berikut:

Table 4. The Score of Neck Movements

Movement	Score
0° – 10° flexion	1
10° – 20° flexion	2
> 30° flexion	3
If in extension	4

Skor penempatan leher (Tabel 4) akan berada dalam rentang 1 - 6. Penilaian ini berdasarkan seberapa besar fleksi atau ekstensi leher, disertai dengan penyesuaian untuk memutar atau membengkokkan leher ke samping. Fleksi leher adalah gerakan dagu ke arah dada dari posisi leher netral. Ekstensi leher adalah memindahkan dagu menjauh dari dada (ke belakang) dari posisi leher netral. Para ahli biomekanika menggunakan berbagai *landmark* dan metode untuk mendefinisikan posisi netral (atau titik nol antara fleksi dan ekstensi) dari leher. Definisi netral sebagai postur kepala atau leher ketika tubuh berdiri tegak (duduk atau berdiri lurus).

Table 5. The Score of Back Movement (torso)

Movement	Score
When sitting down, and the arm is supported well, and the corner of thigh – body is 90° or >	1
0° – 20° flexion	2
20° – 60° flexion	3
> 60° flexion	4

Skor posisi batang tubuh (Tabel 5) akan berada dalam rentang 1 - 6. Penilaian ini bergantung pada seberapa besar fleksi atau ekstensi batang tubuh, disertai dengan penyesuaian untuk memutar atau membengkokkan batang tubuh/punggung ke samping (fleksi lateral). Fleksi batang tubuh didefinisikan sebagai gerakan anterior (ke depan) dari

batang tubuh dalam bidang sagital (seperti membungkuk mencapai ujung kaki). Ekstensi batang tubuh didefinisikan sebagai gerakan posterior (ke belakang) dari batang tubuh dalam bidang sagital (seperti melukis langit-langit).

Nilai posisi kaki akan menjadi 1 atau 2. Jika kaki dan kaki didukung dengan distribusi berat yang merata, nilai tambahannya adalah +1. Jika kaki dan kaki tidak didukung atau terdapat distribusi berat yang tidak merata, nilai tambahannya adalah +2.

Selanjutnya skor yang diperoleh dari Tabel 1 – 3 digunakan untuk mengisi Tabel 6.

Table 6. Group A' Posture Score

Upper Arm	Forearm	Wrists							
		1		2		3		4	
		w.twist							
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	2	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	4	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Untuk mengisi skor pada Tabel 7 diperlukan skor yang diperoleh pada Tabel 4 – 5 dan kriteria posisi kaki.

Table 7. Group B's Posture Score

Neck	Back											
	1		2		3		4		5		6	
	legs											
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	8	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

Skor dari Tabel 6 dan Tabel 7 digunakan untuk menentukan skor RULA pada Tabel 8.

Table 8. Grand Score

	D							
		1	2	3	4	5	6	7+
C	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	5	6	6	7	7
	7	5	5	6	6	7	7	7
	8	5	5	6	7	7	7	7

2.2 ALAT PENILAIAN RISIKO ERGONOMI

Untuk efisiensi waktu dalam menganalisis gambar dengan metode RULA, beberapa penelitian mengusulkan alat penilaian risiko ergonomi otomatis atau semi-otomatis. Pada awalnya, sistem-sistem tersebut didasarkan pada akuisisi postur tubuh manusia melalui perangkat keras pemantauan gerak tingkat tinggi, seperti sensor optik atau inersial yang dapat digunakan seperti pada penelitian [18]–[20]. Kendala dari instrumen-instrumen ini adalah, di satu sisi, investasi ekonomi tinggi yang diperlukan untuk

memperolehnya dan, di sisi lain, penggunaan yang tidak praktis di lingkungan manufaktur, misalnya memerlukan pekerja untuk mengenakan sensor yang invasif selama akuisisi. Untuk mengurangi biaya dan menghilangkan penggunaan sensor, beberapa penelitian mengusulkan sistem berbasis alat pemantauan gerak berbiaya rendah, Microsoft Kinect v2, misalnya [21], [22], untuk mengumpulkan secara otomatis sudut-sudut sendi yang diperlukan untuk penilaian risiko ergonomi menggunakan RULA. Namun, meskipun Microsoft Kinect v2 adalah peralatan berbiaya rendah jika dibandingkan dengan peralatan berakhir tinggi, tetapi mengalami masalah oklusi [23], [24]. Oklusi tubuh manusia adalah hal yang normal dalam lingkungan manufaktur, dan karena menghasilkan akuisisi tubuh manusia yang parsial, Kinect tidak dapat menjadi solusi universal yang dipilih. Menggabungkan data yang diperoleh dari kamera kedalam algoritma *deep learning* adalah solusi efektif untuk memprediksi sudut-sudut sendi yang teroklusi oleh rintangan, namun memerlukan pemrosesan komputasi yang tinggi [22].

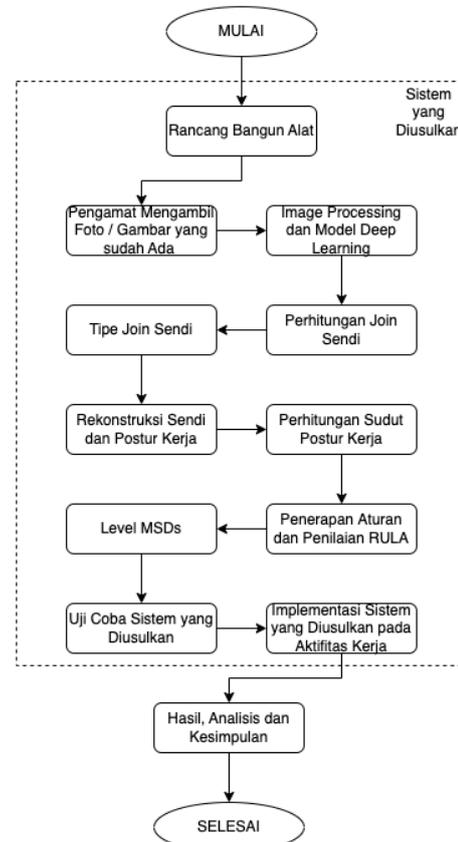
2.3 DEEP LEARNING ESTIMASI SENDI DAN POSTUR

Teknologi estimasi postur tubuh berdasarkan akuisisi pemrosesan gambar menggunakan teknik kecerdasan buatan semakin mendapatkan momentum. Contoh pertama adalah OpenPose. Ini dapat mendeteksi dan melacak postur tubuh, tangan, dan wajah dengan akurasi baik dan tanpa masalah oklusi [25], dan terbukti efektif dalam melakukan penilaian risiko ergonomi [26]. Namun, memerlukan kinerja sebuah komputer berkomputasi yang tinggi [27]. Sebuah metode baru, yang disebut *tf-pose-estimation* diusulkan. Ini dikembangkan sebagai alat ringan untuk memungkinkan perhitungan *real-time*. Karena komputasinya yang ringan, metode ini juga dapat diaplikasikan pada perangkat android, akurasinya sebagai alat bantu ahli ergonomi dalam menilai risiko ergonomi cukup baik [28]. Kemudian, Google mengusulkan MediaPipe. Metode ini mempunyai beberapa fitur seperti mendeteksi postur tubuh, deteksi pose, deteksi tangan, deteksi iris, yang akurasinya telah dinilai dalam beberapa penelitian [29], [30]. Semua karya yang disajikan di sini memiliki karakteristik umum: mereka diuji hanya di bawah kondisi terkendali di lingkungan laboratorium. Validasi metode tersebut secara terapan di lingkungan industri (misalnya, pabrik manufaktur) adalah langkah berikutnya yang dapat dikembangkan. Makalah ini mengusulkan sistem otomatis yang memanfaatkan metode yang disajikan dalam [31] untuk melakukan beberapa penilaian risiko ergonomi menggunakan metode RULA, dengan menambahkan beberapa fitur dan antarmuka alat yang ramah pengguna, dan mengujinya di lingkungan manufaktur.

III. METODE

Pada penelitian ini, kami mengusulkan pengembangan metode RULA berbasis *image processing* dan *deep learning* untuk meningkatkan penilaian ergonomi risiko kerja secara otomatis. Sistem yang kami usulkan meliputi perancangan *hardware* dan *software*. Metode yang kami usulkan dapat dilihat pada Gambar 1. Pada diagram alur penelitian tersebut, disajikan rincian mengenai langkah-langkah pengerjaan dari perancangan alat, perancangan *software* yang terdiri

dari: pengambilan gambar, pemrosesan gambar, estimasi *landmark* menggunakan MediaPipe, modifikasi *landmark* dan postur, rekonstruksi sendi dan postur, perhitungan sudut kriteria RULA, menghasilkan skor RULA, dan resiko kerja. Kami juga melakukan validasi sistem yang kami usulkan dengan mengestimasi postur kerja terhadap kriteria RULA, lalu implementasi untuk menghitung skor RULA terhadap beberapa postur kerja, serta membandingkannya dengan metode manual dari jurnal referensi.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian.

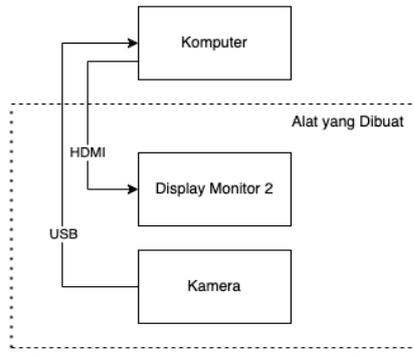
A. Pemrosesan Komputasi

Software yang diusulkan dijalankan pada sebuah workstation PC dengan prosesor Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2686 v4 @ berkecepatan 2.30 GHz (36 CPUs) dan RAM 64.00 GB, serta GPU yang digunakan adalah NVIDIA GeForce GTX 1080 Ti, yang menjalankan Windows 11 Pro. Setelah gambar dikumpulkan, sudut-sudut sendi dihitung oleh sistem yang diusulkan, yang beroperasi pada workstation PC yang sama. Untuk menghindari kemungkinan perbedaan hasil yang disebabkan oleh kesalahan aproksimasi, sistem ini digunakan untuk menghitung skor RULA dengan mempertimbangkan sudut yang diekstraksi secara otomatis.

B. Hardware dan Instrumen

Instrumen yang telah dibuat terdiri dari sebuah monitor tampilan kedua dan kamera yang terhubung dengan perangkat komputer. Monitor display tampilan kedua dihubungkan dengan komputer melalui koneksi HDMI, sementara kamera terhubung dengan komputer melalui koneksi USB.

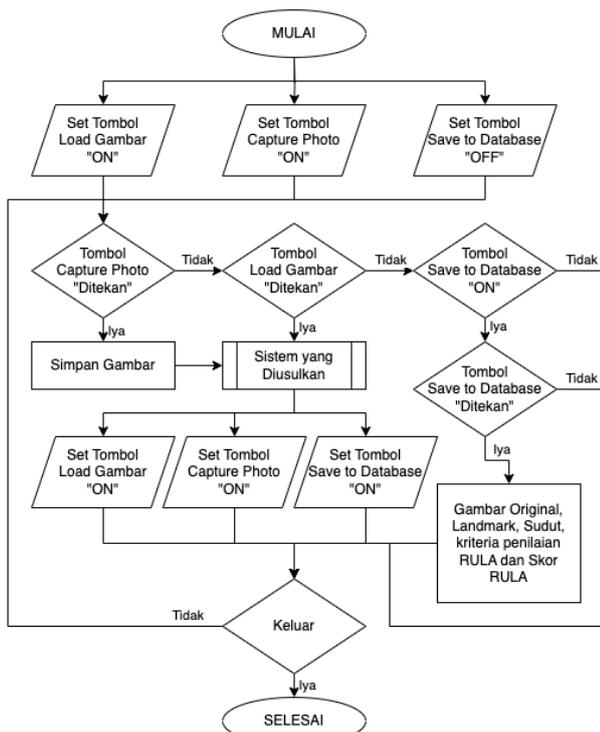
Diagram perancangan *hardware* dapat dilihat pada Gambar 2. Pada diagram ini, disajikan rincian mengenai susunan dan koneksi antara monitor tampilan kedua, kamera, dan perangkat komputer. Koneksi HDMI digunakan untuk menghubungkan monitor tampilan kedua agar dapat menampilkan *Guide User Interface* (GUI). Monitor display tampilan kedua di atur sehingga memiliki orientasi *potrait*. Di sisi lain, koneksi USB digunakan untuk memastikan kamera dapat terhubung dengan perangkat komputer sehingga dapat mentransfer data atau gambar atau foto. Melalui perangkat keras yang telah dirancang ini, diharapkan dapat memfasilitasi pengambilan data atau gambar yang diperlukan.



Gambar 2. Diagram Perancangan Hardware.

C. Software

Diagram perencanaan perangkat lunak pada Gambar 3 dapat dijelaskan sebagai berikut. Perancangan *software* berbasis antarmuka grafis pengguna (GUI) menggunakan pemrograman Python memiliki tiga tombol akses. Tombol 1, "Load Gambar" berfungsi untuk mengambil gambar dari direktori komputer, kemudian melanjutkan dengan sistem yang diusulkan pada Gambar 1.



Gambar 3. Diagram Perancangan Software.

Tombol 2, "Capture Photo" berfungsi untuk mengambil foto secara *real-time* dari kamera, yang kemudian diteruskan dengan sistem yang diusulkan pada Gambar 1. Tombol 3, "Save to Database" berfungsi untuk menyimpan data seperti *landmark*, sudut, skor kriteria RULA, skor RULA, dan indeks risiko ergonomi pada basis data. Saat pertama kali *software* dijalankan, hanya tombol 1 dan 2 yang aktif, sementara tombol 3 tidak aktif. tombol 3 akan menjadi aktif setelah terdapat postur kerja yang dihasilkan dari tombol 1 atau tombol 2. Hal ini dirancang untuk memberikan fungsionalitas yang lebih terarah dan efisien bagi pengguna, memastikan bahwa tombol 3 hanya dapat digunakan ketika data yang relevan telah diakuisisi melalui tombol 1 atau tombol 2.

D. Persamaan

Untuk memperoleh *landmark* koordinat x dan y pada suatu gambar $L_n(X_n, Y_n)$ menggunakan persamaan (1),

$$L_n(X_n, Y_n) = (x_n \cdot W, y_n \cdot H) \quad (1)$$

Dimana, L_n adalah nomor *landmark* ke-n. x_n, y_n adalah koordinat *landmark* normalisasi x dan y bernilai antara 0 - 1. X_n, Y_n adalah koordinat *landmark* aktual x dan y pada suatu gambar. W, H adalah lebar dan tinggi gambar. Lebar (W) dan tinggi (H) gambar diperoleh dengan menggunakan fungsi *img.shape* pada python.

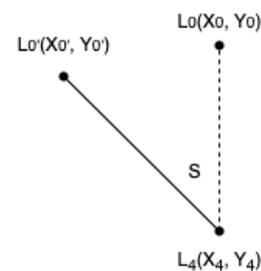
Jarak garis antara dua *landmark* ($J_{n,n}$) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2):

$$J_{n1,n2} = \sqrt{(X_{n2} - X_{n1})^2 + (Y_{n2} - Y_{n1})^2} \quad (2)$$

Sedangkan koordinat *landmark* tengah diantara 2 *landmark* diperoleh dengan menggunakan persamaan (3),

$$L_{nt}(X_{n1}, Y_{n2}) = \frac{\overrightarrow{L_{n1,n2}}}{2} = \left(\frac{X_{n1} + X_{n2}}{2}, \frac{Y_{n1} + Y_{n2}}{2} \right) \quad (3)$$

Dimana, $\overrightarrow{L_{n1,n2}}$ adalah vektor dari 2 *landmark*.



Gambar 3. Contoh Pengukuran Sudut.

Determinan utama dari postur tubuh adalah sudut yang terbentuk oleh garis leher dan garis tubuh terhadap sumbu y. Dalam konteks ini, garis leher dibentuk dengan menghubungkan tengah bahu dan tengah telinga, dengan tengah bahu dianggap sebagai titik pivot. Secara bersamaan, garis tubuh didefinisikan oleh hubungan antara tengah pinggul dan tengah bahu, di mana tengah pinggul dianggap sebagai titik pivot dalam hal ini. Sudut-sudut khusus ini, yang terbentuk oleh titik-titik penting ini, memainkan peran

dasar dalam memahami dan menilai postur tubuh, memberikan ukuran kuantitatif untuk menganalisis penyesuaian dan orientasi bagian atas tubuh.

Sebagai contoh kita mengambil bagian leher, maka kita dapat mengidentifikasi beberapa *landmark* yang penting dalam analisis ini. Secara khusus, ketika mempertimbangkan titik L_0 , koordinat L -nya sama dengan L_4 . Untuk mempermudah perhitungan, kita tentukan bahwa Y_0 adalah 0, pilihan ini dibuat untuk mensederhanakan Y_0 tetap valid untuk semua nilai Y . Dalam mencari sudut antara ketiga titik pada Gambar 3, kita menggunakan pendekatan vektor [32]. Sudut antara dua vektor, yaitu $\vec{L}_{4,0'}$ dan $\vec{L}_{4,0}$, dapat dihitung dengan persamaan vektor. Untuk mendapatkan sudut vektor 2D (θ) menggunakan persamaan \cos^{-1} (4),

$$\theta = \cos^{-1}((\vec{L}_{4,0'} \cdot \vec{L}_{4,0}) / (|\vec{L}_{4,0'}| \cdot |\vec{L}_{4,0}|)) \quad (4)$$

Menyelesaikan (θ) dengan mengaplikasikan 2 titik menjadi persamaan (5),

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(Y_2 - Y_1) \cdot (-Y_1)}{\sqrt{(X_2 - Y_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 \cdot Y_1}} \right) \quad (5)$$

Menghitung sudut (S) pada Gambar 3, diketahui π sebesar 3,14,

$$S = \left[\frac{180}{\pi} \cdot \theta \right] \quad (6)$$

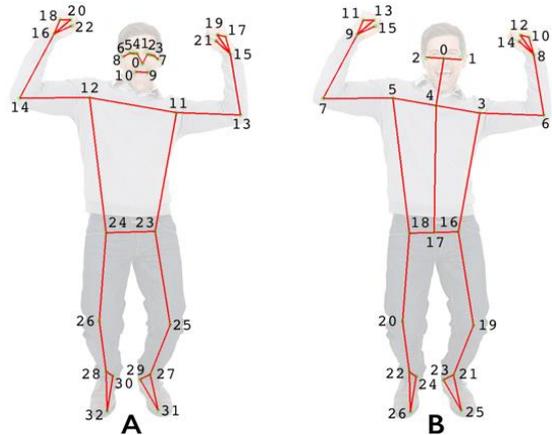
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Langkah pertama adalah kami memodifikasi *landmark* dan *line-connection*. Dengan Gambar 4A diperoleh menggunakan MediaPipe, sedangkan Gambar 4B adalah metode yang diusulkan. Luaran 33 *landmark* MediaPipe: 0 - nose; 1 - left eye (inner); 2 - left eye; 3 - left eye (outer); 4 - right eye (inner); 5 - right eye; 6 - right eye (outer); 7 - left ear; 8 - right ear; 9 - mouth (left); 10 - mouth (right); 11 - left shoulder; 12 - right shoulder; 13 - left elbow; 14 - right elbow; 15 - left wrist; 16 - right wrist; 17 - left pinky; 18 - right pinky; 19 - left index; 20 - right index; 21 - left thumb; 22 - right thumb; 23 - left hip; 24 - right hip; 25 - left knee; 26 - right knee; 27 - left ankle; 28 - right ankle; 29 - left heel; 30 - right heel; 31 - left foot index; 32 - right foot index.

Luaran 27 *landmark* sistem yang diusulkan: 0 - upper neck; 1 - left ear; 2 - right ear; 3 - left shoulder; 4 - lower neck; 5 - right shoulder; 6 - left elbow; 7 - right elbow; 8 - left wrist; 9 - right wrist; 10 - left pinky; 11 - right pinky; 12 - left index; 13 - right index; 14 - left thumb; 15 - right thumb; 16 - left hip; 17 - center hip; 18 - right hip; 19 - left knee; 20 - right knee; 21 - left ankle; 22 - right ankle; 23 - left heel; 24 - right heel; 25 - left foot index; 26 - right foot index.

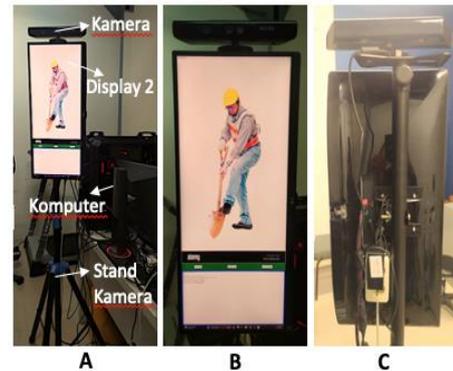
Untuk memudahkan dalam hal perbandingan, pada Gambar 4 menggunakan latar belakang orang dengan tingkat transparansi 70% sehingga *landmark* dan *line-connection* terlihat lebih kontras untuk dianalisa. MediaPipe menghasilkan 33 *landmark*. Sedangkan penelitian yang kami usulkan menghasilkan 27 *landmark* dengan menghilangkan *landmark* pada Gambar 4A: 1 - left eye (inner); 2 - left eye; 3 - left eye (outer); 4 - right eye (inner); 5 - right eye; 6 - right eye (outer); 9 - mouth (left); 10 - mouth (right). Sebaliknya untuk penelitian ini, kami memerlukan garis

leher dan garis sehingga pada Gambar 4B menambahkan *landmark*: 0 - upper neck; 4 - lower neck; 17 - center hip.



Gambar 4. Perbedaan Landmark (titik hijau ber-label angka) dan Line-Connection (garis merah) pada Estimasi Postur. A. MediaPipe. B. Penelitian yang Diusulkan.

Hasil perancangan *hardware* ditunjukkan pada Gambar 5. Monitor display kedua berdiri dengan orientasi portrait di stand kamera, kemudian posisi kamera berada di atasnya. Posisi kamera berada di ketinggian 200 cm dari lantai. Dengan posisi ini jarak optimal pekerja yang diamati dengan alat yang diusulkan antara 200 - 400 cm. Dimensi keseluruhan alat tinggi 200 cm dan luas area melingkar 80 cm.



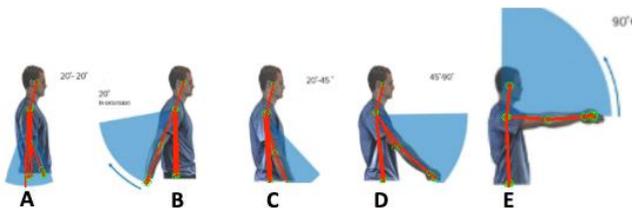
Gambar 5. Rancang Bangun Alat. A. Tampilan Keseluruhan Alat, B. Tampak depan, C. Tampak Belakang.

Aplikasi *software* yang dirancang berbasis GUI menggunakan pemrograman python yang didukung library Numpy, Tkinter, OpenCv, MediaPipe, Math. Antarmuka GUI *software* memiliki lebar 320 dan tinggi 900 pixel. Monitor display kedua mempunyai spesifikasi lebar 1440 dan tinggi 2560 pixel. GUI *software* dapat di *resize* secara proporsional atau ukuran maksimal monitor display kedua. Seperti pada Gambar 6, GUI dibagi menjadi 3 grup. Grup 1 merupakan komponen canvas, berfungsi untuk menampilkan gambar original pekerja dan hasil estimasi postur kerja (*landmark* dan *line-connection*). Grup 2 merupakan kumpulan tombol, dimana cara kerja sesuai dengan diagram alur pada Gambar 3. Grup 3 merupakan *console* berfungsi untuk menampilkan notifikasi, apa yang sedang diproses, skor dan indeks resiko ergonomi kerja.



Gambar 6. Antarmuka Software yang Diusulkan.

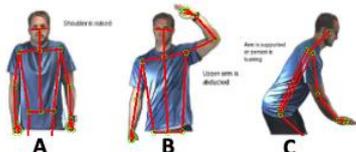
Hasil pengujian sistem yang diusulkan diaplikasikan pada kriteria penilaian RULA. Visualisasi data pada Gambar 5 – 15 menggunakan posisi gambar bagian tubuh berada dibawah hasil estimasi postur metode yang diusulkan. Gambar 7 menyajikan hasil estimasi postur metode yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA sudut lengan atas yang dibentuk sesuai dengan Tabel 1. Gambar 7A menunjukkan lengan atas membentuk sudut ekstensi 20° - fleksi 20° , Gambar 7B menunjukkan lengan atas membentuk sudut ekstensi $> 20^\circ$, Gambar 7C menunjukkan lengan atas membentuk sudut fleksi 20° - 45° , Gambar 7D menunjukkan lengan atas membentuk sudut fleksi 45° - 90° , dan Gambar 7E menunjukkan lengan atas membentuk sudut fleksi $> 90^\circ$.



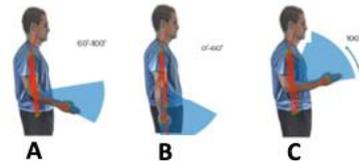
Gambar 7. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Sudut Lengan Atas. A. Ekstensi 20° - fleksi 20° . B. Ekstensi $> 20^\circ$. C. Fleksi 20° - 45° . D. Fleksi 45° - 90° . E. Fleksi $> 90^\circ$.

Gambar 8 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA tambahan sudut lengan atas yang dibentuk sesuai dengan Tabel 1. Gambar 8A menunjukkan pundak naik melebihi posisi normal, Gambar 8B menunjukkan salah satu atau dua lengan atas diangkat, Gambar 8C menunjukkan lengan posisi menyangga.

Gambar 9 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA sudut lengan bawah yang dibentuk sesuai dengan Tabel 2. Gambar 9A menunjukkan lengan bawah membentuk sudut fleksi 60° - 100° , Gambar 9B menunjukkan lengan bawah membentuk sudut fleksi $< 60^\circ$, Gambar 9C menunjukkan lengan bawah membentuk sudut fleksi $> 100^\circ$.

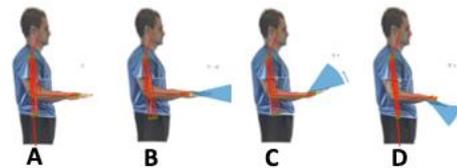


Gambar 8. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Tambahan Sudut Lengan Atas. A. Bahu terangkat. B. Lengan Atas Terangkat. C. Lengan Posisi Menyangga.



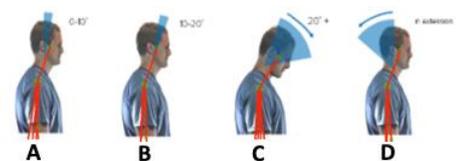
Gambar 9. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Sudut Lengan Bawah. A. Fleksi 60° - 100° . B. Fleksi $< 60^\circ$. C. Fleksi $> 100^\circ$.

Gambar 10 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA sudut telapak tangan yang dibentuk sesuai dengan Tabel 3. Gambar 10A menunjukkan telapak tangan posisi netral 0° , Gambar 10B menunjukkan telapak tangan sudut fleksi atau ekstensi 0° - 15° , Gambar 10C menunjukkan telapak tangan membentuk sudut fleksi $> 15^\circ$, Gambar 10D menunjukkan telapak tangan membentuk sudut ekstensi $> 15^\circ$.



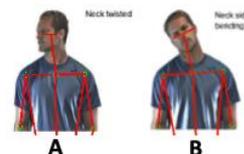
Gambar 10. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Sudut Telapak Tangan. A. Netral 0° . B. Fleksi atau ekstensi 0° - 15° . C. Fleksi $> 15^\circ$. D. Ekstensi $> 15^\circ$.

Gambar 11 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA sudut leher yang dibentuk sesuai dengan Tabel 4. Gambar 11A menunjukkan leher membentuk sudut fleksi 0° - 10° , Gambar 11B menunjukkan leher membentuk sudut fleksi 10° - 20° , Gambar 11C menunjukkan te leher membentuk sudut fleksi $> 30^\circ$, Gambar 11D menunjukkan leher membentuk sudut ekstensi.



Gambar 11. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Sudut Leher. A. Fleksi 0° - 10° . B. Fleksi 10° - 20° . C. Fleksi $> 30^\circ$. D. Ekstensi.

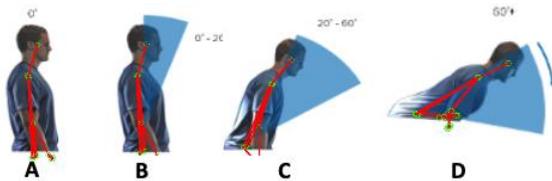
Gambar 12 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA tambahan sudut leher. Gambar 12A menunjukkan leher memutar ke samping, Gambar 12B menunjukkan leher menekuk ke samping.



Gambar 12. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Tambahan Sudut Leher. A. Leher Memutar. B. Leher Menekuk.

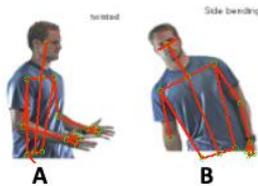
Gambar 13 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA sudut punggung yang dibentuk sesuai dengan Tabel 5. Gambar 13A menunjukkan punggung tegak 0° , Gambar 13B

menunjukkan punggung membentuk sudut fleksi 0° - 20°, Gambar 13C menunjukkan punggung membentuk sudut fleksi 20° - 60°, Gambar 13D menunjukkan punggung membentuk sudut fleksi > 60°.

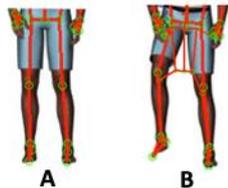


Gambar 13. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Sudut Punggung. A. 0°. B. Fleksi 0° - 20°. C. Fleksi 20° - 60°. D. Fleksi > 60°.

Gambar 14 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA tambahan sudut punggung. Gambar 14A menunjukkan punggung memutar ke samping, Gambar 14B menunjukkan punggung menekuk ke samping.



Gambar 14. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Tambahan Sudut Punggung. A. Punggung Memutar. B. Punggung Menekuk.

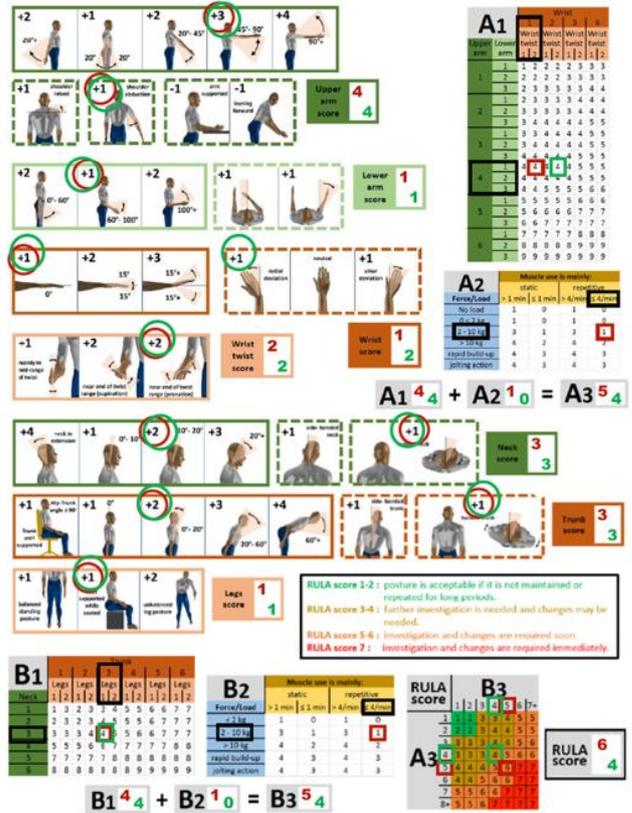


Gambar 15. Hasil Estimasi Postur Kriteria RULA Tambahan Kaki. A. Posisi Normal. B. Posisi Menahan Salah Satu.

Gambar 15 menyajikan hasil estimasi postur sistem yang diusulkan dapat merekonstruksi dengan baik kriteria RULA tambahan sudut kaki. Gambar 15A menunjukkan posisi kaki normal, Gambar 15B menunjukkan posisi kaki menahan salah satu.



Gambar 16. Postur Kerja Hasil Implementasi Sistem yang Diusulkan pada Pekerja Operator Forklift (Titik Hijau adalah Landmark dan Garis Merah adalah Line-Connections).



Gambar 17. Skor RULA Hasil Implementasi Sistem yang Diusulkan pada Pekerja Operator Forklift dan Perbandingan Hasil.

Hasil implementasi sistem pada pekerja operator forklift dapat dilihat melalui Gambar 16, yang menunjukkan postur kerja setelah penerapan sistem yang diusulkan. Pada gambar tersebut, titik hijau menandakan posisi landmark, sedangkan garis merah menggambarkan line-connections antara landmark. Dari hasil sistem yang diusulkan, terlihat peningkatan dalam penyesuaian postur kerja pekerja operator forklift, yang dapat meningkatkan akurasi estimasi penilaian RULA.

Gambar 17 menunjukkan hasil skor RULA setelah implementasi sistem pada pekerja operator forklift. Skor RULA digunakan sebagai indikator evaluasi ergonomi, dengan perbandingan hasil referensi jurnal [33] dan dengan sistem yang diusulkan. Pada gambar tersebut tanda merah menunjukkan hasil yang kami peroleh dari referensi jurnal, sedangkan tanda hijau merupakan sistem yang diusulkan. Namun sistem yang diusulkan pada penelitian ini memiliki keterbatasan dalam menilai kriteria RULA dalam hal estimasi pembebanan dan durasi aktifitas pekerja. Hal ini dikarenakan metode yang diusulkan menggunakan metode pengolahan gambar sehingga tidak dapat memproses durasi aktifitas pekerja secara otomatis. Selain itu estimasi pembebanan juga belum dapat direalisasikan disebabkan oleh luasan permukaan benda belum tentu menunjukkan beban benda berat, sehingga pada metode ini belum dapat direalisasikan. Dapat ditunjukkan pada Gambar 17 skor RULA di kolom A2 untuk referensi jurnal memberikan angka 1, sedangkan sistem yang ditunjukkan memberikan angka 0. Lalu pada pada Gambar 17 skor RULA di kolom B2 untuk referensi jurnal memberikan angka 1, sedangkan sistem yang ditunjukkan memberikan angka 0. Sehingga skor RULA akhir pada penilaian tersebut referensi jurnal

memperoleh skor 6, sedangkan sistem yang diusulkan memperoleh skor 4. Secara keseluruhan sistem yang diusulkan mempunyai keunggulan menilai skor RULA lebih efektif dan efisien dalam menilai kriteria postur kerja.

V. KESIMPULAN

Rancang bangun sistem (*hardware* dan *software*) dapat beroperasi dengan normal dapat ditunjukkan pada Gambar 5 - 6. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu merekonstruksi postur kerja sesuai kriteria RULA yang dapat ditunjukkan pada Gambar 7 - 15. Implementasi hasil estimasi postur kerja menggunakan sistem yang diusulkan pada pekerja operator forklift dapat diestimasi dengan baik sesuai dengan Gambar 16. Sistem yang diusulkan mempunyai keunggulan menilai skor RULA lebih akurat dan efisien dalam menilai kriteria postur kerja terlihat pada Gambar 17.

REFERENSI

- [1] B. D. Lowe, P. G. Dempsey, and E. M. Jones, "Ergonomics assessment methods used by ergonomics professionals," *Appl. Ergon.*, vol. 81, p. 102882, 2019.
- [2] L. McAtamney and E. N. Corlett, "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders," *Appl. Ergon.*, vol. 24, no. 2, pp. 91–99, 1993.
- [3] L. McAtamney and S. Hignett, "Rapid entire body assessment," in *Handbook of human factors and ergonomics methods*, CRC press, 2004, pp. 97–108.
- [4] G. B. Scott and N. R. Lambe, "Working practices in a perchery system, using the OVAKO Working posture Analysing System (OWAS)," *Appl. Ergon.*, vol. 27, no. 4, pp. 281–284, 1996.
- [5] D. K. Sofyan, "Determination of Musculoskeletal Disorders (MSDs) complaints level with Nordic Body Map (NBM)," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 505, no. 1, p. 12033.
- [6] G. C. David, "Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders," *Occup. Med. (Chic. Ill.)*, vol. 55, no. 3, pp. 190–199, 2005.
- [7] R. Y. Zare M., Biau S., Croq M., "Development of a biomechanical method for ergonomic evaluation: Comparison with observational method," *Int. J. Soc. Manag. Econ. Bus. Eng.*, vol. 8, pp. 223–227, 2014.
- [8] "Ergonomics—Manual handling—Part 3: Handling of Low Loads at High Frequency," *Int. Organ. Stand. Geneva, Switz.*, vol. 11228, p. 3, 2007.
- [9] C. D. Occhipinti E., "IEA/WHO toolkit for WMSDs prevention: Criteria and practical tools for a step by step approach," *Work*, vol. 41, pp. 3937–3944, 2012.
- [10] C. E. Bagagiolo G., Laurendi V., "Safety Improvements on Wood Chippers Currently in Use: A Study on Feasibility in the Italian Context," *Agriculture*, vol. 7, no. 98, 2017.
- [11] P. A. Potočnik I., "Forestry Ergonomics and Occupational Safety in High Ranking Scientific Journals from 2005–2016," *Croat. J. For. Eng.*, vol. 38, pp. 291–310, 2017.
- [12] F. Vignais, N., Miezal, M., Bleser, G., Mura, K., Gorecky, D., & Marin, "Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing," *Appl. Ergon.*, vol. 44, no. 4, pp. 566–574, 2013.
- [13] A. Malaisé, P. Maurice, F. Colas, and S. Ivaldi, "Activity recognition for ergonomics assessment of industrial tasks with automatic feature selection," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, no. 2, pp. 1132–1139, 2019.
- [14] B. Busch, G. Maeda, Y. Mollard, M. Demangeat, and M. Lopes, "Postural optimization for an ergonomic human-robot interaction," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 2778–2785.
- [15] J.-L. Perez-Medina, K. B. Jimenes-Vargas, L. Leconte, S. Villarreal, Y. Rybarczyk, and J. Vanderdonck, "ePHoRt: towards a reference architecture for tele-rehabilitation systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97159–97176, 2019.
- [16] I.-J. Kim, "The role of ergonomics for construction industry safety and health improvements," *J. Ergon.*, vol. 7, no. 2, pp. 2–5, 2017.
- [17] L. Punnett and D. H. Wegman, "Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 14, no. 1, pp. 13–23, 2004.
- [18] D. Battini, A. Persona, and F. Sgarbossa, "Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 77, pp. 1–10, 2014.
- [19] C. Huang, W. Kim, Y. Zhang, and S. Xiong, "Development and validation of a wearable inertial sensors-based automated system for assessing work-related musculoskeletal disorders in the workspace," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 17, p. 6050, 2020.
- [20] N. Vignais, M. Miezal, G. Bleser, K. Mura, D. Gorecky, and F. Marin, "Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing," *Appl. Ergon.*, vol. 44, no. 4, pp. 566–574, 2013.
- [21] V. M. Manghisi, A. E. Uva, M. Fiorentino, M. Gattullo, A. Boccaccio, and A. Evangelista, "Automatic ergonomic postural risk monitoring on the factory shopfloor—the ergosentinel tool," *Procedia Manuf.*, vol. 42, pp. 97–103, 2020.
- [22] A. Abobakr *et al.*, "RGB-D ergonomic assessment system of adopted working postures," *Appl. Ergon.*, vol. 80, pp. 75–88, 2019.
- [23] W. Kim, J. Sung, D. Saakes, C. Huang, and S. Xiong, "Ergonomic postural assessment using a new open-source human pose estimation technology (OpenPose)," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 84, p. 103164, 2021.
- [24] P. Plantard, E. Auvinet, A.-S. Le Pierres, and F. Multon, "Pose estimation with a kinect for ergonomic studies: Evaluation of the accuracy using a virtual mannequin," *Sensors*, vol. 15, no. 1, pp. 1785–1803, 2015.
- [25] M. Ota *et al.*, "Verification of reliability and validity of motion analysis systems during bilateral squat using human pose tracking algorithm," *Gait Posture*, vol. 80, pp. 62–67, 2020.
- [26] L. Li, T. Martin, and X. Xu, "A novel vision-based real-time method for evaluating postural risk factors associated with musculoskeletal disorders," *Appl. Ergon.*, vol. 87, p. 103138, 2020.
- [27] J. G. da Silva Neto, J. M. X. N. Teixeira, and V. Teichrieb, "Analyzing embedded pose estimation solutions for human behaviour understanding," in *Anais Estendidos do XXII Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada*, 2020, pp. 30–34.
- [28] T. Agostinelli, A. Generosi, S. Ceccacci, R. K. Khamaisi, M. Peruzzini, and M. Mengoni, "Preliminary validation of a low-cost motion analysis system based on RGB cameras to support the evaluation of postural risk assessment," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 22, p. 10645, 2021.

- [29] V. Chunduru, M. Roy, and R. G. Chittawadigi, "Hand tracking in 3d space using mediapipe and pnp method for intuitive control of virtual globe," in *2021 IEEE 9th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 2021, pp. 1–6.
- [30] A. Halder and A. Tayade, "Real-time vernacular sign language recognition using mediapipe and machine learning," *J. homepage www.ijrpr.com ISSN*, vol. 2582, p. 7421, 2021.
- [31] A. Altieri, S. Ceccacci, A. Talipu, and M. Mengoni, "A low cost motion analysis system based on RGB cameras to support ergonomic risk assessment in real workplaces," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2020, vol. 83983, p. V009T09A067.
- [32] L. Li and X. Xu, "A deep learning-based RULA method for working posture assessment," in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 2019, vol. 63, no. 1, pp. 1090–1094.
- [33] D. Mijatovic, "RSI Day Webinar Series: Ergonomic Prevention Tools," *OHCOW*, 2022. [Online]. Available: https://www.ohcow.on.ca/wp-content/uploads/2022/03/rsiDay2022_RULA.pdf.