

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Tubuh manusia secara biomekanika dirancang untuk bergerak dan mempertahankan keseimbangan beban pada struktur tulang belakang. Dalam kondisi ideal, sistem muskuloskeletal bekerja secara sinergis untuk mempertahankan postur netral dengan distribusi beban yang seimbang. Namun, gaya hidup modern dan tuntutan pekerjaan yang berbasis komputer telah memaksa tubuh untuk berada dalam posisi statis dalam jangka waktu yang lama. Perubahan perilaku ini seringkali memicu adopsi postur tubuh yang tidak fisiologis, seperti menunduk, membungkuk atau kepala yang terdorong ke depan. Secara medis, penyimpangan dari posisi netral tulang belakang ini bukan hanya masalah estetika, melainkan awal dari gangguan biomekanika serius yang berdampak pada kesehatan *muskuloskeletal* [1].

Kondisi ini menjadikan postur duduk yang buruk sebagai masalah utama karena merupakan awal dari perubahan struktur tubuh yang bersifat permanen. Berbeda dengan aktivitas fisik yang bersifat dinamis, duduk dengan postur buruk dilakukan selama berjam-jam setiap hari secara tidak sadar. Kondisi seperti ini yang menyebabkan otot pektoralis memendek dan otot punggung melemah. Gangguan ini tidak hanya menyebabkan kelelahan sesaat, tetapi juga memicu perubahan pada struktur tulang belakang [2].

Selain gangguan postur dalam bidang sagital, postur duduk buruk juga sering muncul dalam bidang frontal atau *asymmetric sitting posture*, di mana tubuh cenderung condong ke kiri atau kanan. Kondisi ini menyebabkan distribusi beban yang tidak seimbang dan meningkatkan beban otot secara unilateral, sehingga mempercepat terjadinya kelelahan otot serta meningkatkan risiko nyeri dan keterbatasan gerak. Akumulasi dari gangguan postur dan beban otot ini pada akhirnya menuju pada dua konsekuensi utama: keluhan nyeri kronis dan keterbatasan gerak. Kelainan struktur tulang belakang akibat adaptasi posisi bungkuk akan mengurangi fleksibilitas tubuh, yang secara signifikan membatasi mobilitas dan menurunkan kualitas tubuh penderitanya dalam jangka panjang [3].

Dampak gangguan postur tersebut tidak hanya dirasakan secara individual, tetapi juga melibatkan berbagai kelompok dengan karakteristik aktivitas duduk yang berbeda. Beberapa pihak (*stakeholder*) terlibat langsung dalam permasalahan ini, di antaranya:

1. Pekerja kantoran, sebagai kelompok berisiko tinggi pertama karena durasi duduk panjang dan aktivitas statis di depan komputer.
2. Mahasiswa, sebagai kelompok berisiko tertinggi selanjutnya karena beraktivitas di depan komputer saat mengerjakan tugas-tugas yang berhubungan dengan internet.
3. Guru dan Dosen, kelompok profesi yang memiliki karakteristik kerja unik, yaitu kombinasi antara duduk statis dalam durasi panjang, aktivitas mengajar berbasis komputer, serta postur berdiri dan menunduk berulang saat menyiapkan materi atau melakukan penilaian.

Apabila permasalahan ini dapat diatasi, manfaatnya akan dirasakan oleh semua pihak. Pekerja kantoran dan mahasiswa dapat menjaga postur tubuh lebih baik, mengurangi risiko nyeri punggung, dan meningkatkan kenyamanan dalam beraktivitas. Guru dan dosen akan memperoleh peningkatan produktivitas serta berkurangnya angka absensi.

Dengan demikian, gangguan akibat postur tubuh yang buruk perlu mendapat perhatian serius. Upaya pencegahan dan sistem deteksi dini menjadi langkah penting dalam mengurangi risiko gangguan pada tulang belakang.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Bagian ini menyajikan informasi pendukung yang menjelaskan bentuk gangguan postur duduk serta parameter biomekanik dan fisiologis yang relevan sebagai dasar perancangan sistem deteksi. Postur duduk yang tidak ergonomis dapat muncul dalam berbagai bentuk dan berpotensi menimbulkan gangguan muskuloskeletal apabila berlangsung dalam jangka waktu lama.

Masalah postur duduk yang tidak ergonomis dibagi dalam berbagai bentuk. Berdasarkan literatur medis dan ergonomi, terdapat gangguan spesifik yang paling sering terjadi pada pekerja kantor, mahasiswa dan guru atau dosen, yaitu *Thoracic Hyperkyphosis*. Gangguan tersebut menunjukkan bahwa permasalahan postur duduk tidak hanya berkaitan dengan perubahan posisi tulang belakang, tetapi juga berhubungan dengan peningkatan beban biomekanik.

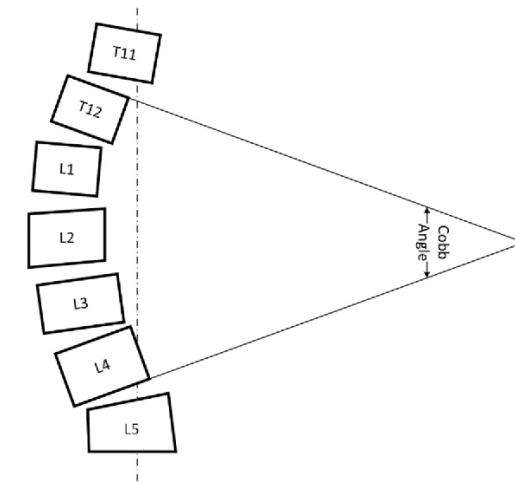
Untuk mendukung perancangan sistem deteksi yang terstruktur, permasalahan postur duduk dalam penelitian ini dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama sebagai berikut.

A. Postur Duduk Condong Kiri, Kanan, Membungkuk, serta Kelelahan Otot Punggung

Selain gangguan pada postur kepala, aktivitas duduk jangka panjang juga sering memunculkan gangguan postur dalam bidang sagital dan frontal, seperti postur membungkuk (*Thoracic Hyperkyphosis*), *Slouched Sitting*, serta posisi duduk miring ke kiri atau kanan (*asymmetric sitting posture*). *Thoracic Hyperkyphosis* (Bungkuk) adalah gangguan kelengkungan berlebihan pada tulang belakang bagian atas (punggung) yang menciptakan postur membungkuk. Postur duduk membungkuk yang kronis menyebabkan sindrom silang atas. Kondisi ini ditandai dengan ketidakseimbangan otot yang spesifik, otot-otot dada kaku, sementara otot-otot punggung atas melemah. Selain menyebabkan nyeri, *Thoracic Hyperkyphosis* yang parah dapat mengurangi mobilitas tulang rusuk, yang secara biomekanika terbukti dapat menghambat fungsi pernapasan optimal karena ruang gerak paru-paru menjadi terbatas [4].

Slouched Sitting atau duduk merosot adalah posisi di mana panggul meluncur ke depan kursi, menyebabkan hilangnya kelengkungan alami punggung bawah. Posisi ini mengubah kurva lumbar menjadi datar atau cembung. Hal ini meningkatkan tekanan di dalam bantalan tulang belakang secara signifikan dan meregangkan ligamen secara berlebihan, yang merupakan faktor resiko utama terjadinya nyeri punggung bawah. Data klinis menunjukkan hubungan kuat antara perilaku duduk ini dengan keluhan nyeri. Survei gangguan muskuloskeletal mencatat bahwa keluhan paling sering dialami akibat duduk lama adalah nyeri punggung bawah (64,6%), diikuti oleh nyeri leher dan bahu (59,7%) [1].

Cobb Angle adalah pengukuran yang paling umum digunakan untuk mengukur derajat kelainan tulang belakang. Skema pengukuran sudut Cobb yang mana sudut Cobb didefinisikan sebagai sudut antara garis perpanjangan pelat ujung atas tubuh tulang belakang yang paling miring dalam segmen yang melengkung dan garis perpanjangan pelat ujung bawah tubuh tulang belakang yang paling miring di bawahnya.



Gambar 1.1 Cobb Angle

Degree of Cobb Angle ($^{\circ}$)	Classification
$<10^{\circ}$	Normal
$10^{\circ} < x < 25^{\circ}$	Mild
$25^{\circ} < x < 45^{\circ}$	Moderate
$>45^{\circ}$	Severe

Gambar 1.2 Klasifikasi Cobb Angle

Deviasi lateral lebih dari 10° dari garis median menunjukkan postur asimetris, dan apabila melebihi 15° selama lebih dari 5 menit, berisiko menyebabkan nyeri unilateral.

Selain itu, fleksi anterior (membungkuk) lebih dari 20° dari posisi tegak dapat meningkatkan tekanan diskus hingga 140% dibandingkan posisi berdiri [5]. Analisis distribusi tekanan duduk juga memberikan indikasi objektif terhadap keseimbangan tubuh. Pada postur seimbang, asimetri tekanan kiri–kanan kurang dari 10%, sedangkan pada postur condong lateral asimetri meningkat hingga lebih dari 15%. Postur membungkuk menggeser tekanan ke arah depan dan mengurangi kontak dengan sandaran punggung. Perubahan pola tekanan ini dapat terdeteksi dalam waktu 5–10 detik setelah postur berganti [6].

Bentuk gangguan postur yang telah disebutkan diatas menunjukkan bahwa masalah utama pada aktivitas duduk lama tidak hanya terletak pada perubahan bentuk tulang

belakang, tetapi juga pada peningkatan beban dan kerja otot penopang postur. Peningkatan beban biomekanik ini memaksa otot-otot punggung, bahu, dan pinggang untuk berkontraksi secara statis dalam durasi yang panjang.

Hal ini menunjukkan adanya kebutuhan akan sistem pemantauan yang mampu mendeteksi perubahan postur secara real-time serta mudah diterapkan pada lingkungan kerja dan belajar. Berbagai solusi telah dikembangkan untuk mengatasi berbagai bentuk gangguan postur duduk yang disajikan pada tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1 Solusi Yang Sudah Ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan
Posture Guard – A Human Sitting Posture Detection And Alarming System [7]	1. Menggunakan teknologi modern (computer vision dan machine learning) sehingga mampu memantau postur tubuh secara real-time menggunakan webcam tanpa perangkat tambahan. 2. Memberikan umpan balik langsung berupa visual dan audio, sehingga pengguna bisa segera melakukan koreksi postur. 3. Mampu mengklasifikasikan postur ke dalam lima kelas yang cukup detail (Normal, Neck, Shoulders, Forward Bend, Backward Bend).	1. Performa menurun cukup signifikan pada data pengguna baru (unseen faces) dan lingkungan berbeda, dengan rata-rata presisi hanya sekitar 64%. 2. Sensitif terhadap perubahan lingkungan dan kondisi pencahayaan, sehingga keandalan sistem belum sepenuhnya stabil. 3. Ketergantungan pada webcam membuat sistem bergantung pada posisi kamera dan kualitas perangkat. 4. Tidak dapat mengetahui keadaan kelelahan dari otot punggung dan distribusi tekanan secara langsung

Intelligent Posture Detection System for Improved Ergonomics [8]	Menggunakan kombinasi <i>load cell</i> dan <i>ultrasonic</i> sensor sehingga deteksi postur lebih akurat karena mempertimbangkan distribusi berat dan jarak punggung ke sandaran.	1. Tidak dapat mengukur kelelahan pada otot punggung 2. Tidak dapat memonitoring kondisi leher saat duduk 3. Mengganggu kenyamanan duduk karena sensornya tidak ditutupi
Aplikasi pengingat postur berbasis waktu [9]	1. Sederhana dan mudah diakses karena tidak memerlukan perangkat khusus selain <i>smartphone</i> atau aplikasi sederhana 2. Rendah biaya dan praktis karena umumnya hanya berbasis notifikasi waktu tanpa sensor khusus sehingga biaya pengembangan dan penggunaan relatif rendah 3. Cocok untuk kebiasaan dasar seperti berdiri atau istirahat periodik yang terbukti meningkatkan kenyamanan kerja dan mengurangi ketegangan otot ringan	1. Tidak sensitif terhadap kondisi postur nyata karena notifikasi hanya berdasarkan interval waktu. 2. Potensi “Alarm Fatigue” karena sering menerima pemberitahuan yang tidak relevan. 3. Kurang mendukung evaluasi biomekanik karena tidak menyediakan informasi kuantitatif tentang sudut sendi, kemiringan tubuh, atau variabel biomekanik lainnya yang penting untuk penilaian postur ergonomis yang detail

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

Dalam menganalisis permasalahan yang telah diangkat, perlu diperhatikan aspek-aspek yakni mulai dari aspek ekonomi, lingkungan, sustainabilitas, manufakturabilitas dan etika.

1. Aspek Ekonomi

Dari aspek ekonomi, gangguan postur duduk yang buruk seperti *Thoracic Hyperkyphosis*, postur duduk asimetris kiri–kanan akibat duduk berkepanjangan dapat menimbulkan beban finansial yang signifikan. Beban ini mencakup biaya fisioterapi, perawatan nyeri punggung, serta rehabilitasi gangguan muskuloskeletal jangka panjang [10]. Dibandingkan dengan biaya pengobatan tersebut, penerapan alat deteksi dan pencegahan dini memiliki potensi biaya yang jauh lebih rendah. Oleh karena itu, konstrain utama dari aspek ekonomi adalah solusi yang dirancang harus bersifat *low cost* $\leq Rp\ 15.000.000$ agar dapat menjadi alternatif yang ekonomis dan terjangkau bagi pengguna dalam mencegah berbagai gangguan postur duduk sejak dini [11].

2. Aspek Sustainability

Dari aspek sustainability, alat dirancang untuk digunakan dalam jangka waktu panjang oleh stakeholder dalam aktivitas duduk sehari-hari. Mengingat gangguan postur terjadi secara kumulatif, sistem harus mampu mendukung penggunaan berkelanjutan tanpa memerlukan penggantian perangkat secara keseluruhan. Oleh karena itu, solusi yang ditawarkan perlu bersifat *sustainable*, dengan desain modular dan komponen yang mudah diganti apabila terjadi kerusakan. Konstrain dari aspek ini adalah sistem harus dirancang dengan struktur yang memungkinkan perawatan dan perbaikan secara mandiri, sehingga usia penggunaan alat lebih panjang dan limbah elektronik dapat diminimalkan [12][13].

3. Aspek Kesehatan

Dari segi aspek kesehatan, postur duduk yang tidak tepat tidak hanya menyebabkan satu jenis gangguan, melainkan dapat memicu berbagai permasalahan biomekanik, seperti postur membungkuk pada punggung dan pinggang. Apabila kondisi-kondisi tersebut berlangsung dalam jangka waktu lama tanpa terdeteksi, risiko terjadinya nyeri kronis dan penurunan fungsi gerak akan semakin meningkat. Oleh karena itu, sistem yang dikembangkan perlu mampu mengidentifikasi dan memprediksi berbagai bentuk postur duduk yang tidak ergonomis secara akurat sejak tahap awal [14].

Dari sisi standar kesehatan dan ergonomi, perancangan sistem ini selaras dengan prinsip-prinsip yang direkomendasikan oleh *International Organization for Standardization (ISO)*, khususnya standar ergonomi interaksi manusia sistem yang menekankan bahwa teknologi

pendukung aktivitas kerja harus dirancang agar tidak menimbulkan beban fisik tambahan bagi pengguna. Prinsip serupa juga ditegaskan oleh pedoman ergonomi kerja dari *Occupational Safety and Health Administration (OSHA)*, yang menyarankan agar posisi kepala, leher, dan punggung tetap berada dalam kondisi netral selama aktivitas duduk untuk meminimalkan risiko gangguan muskuloskeletal [15].

Sejalan dengan rekomendasi tersebut, sistem pemantauan postur yang aman tidak boleh memberikan tekanan tambahan pada tubuh, membatasi pergerakan alami pengguna, atau menimbulkan rasa tidak nyaman selama digunakan. Oleh karena itu, pendekatan berbasis *sensor non-invasif*, serta penggunaan perangkat yang ringan dan ergonomis menjadi aspek penting dalam menjamin keamanan penggunaan sistem.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, konstrain utama dari aspek kesehatan dalam perancangan sistem ini adalah bahwa sistem harus aman digunakan, tidak menimbulkan efek samping fisik maupun psikologis, serta tidak mengganggu aktivitas normal pengguna meskipun digunakan dalam jangka waktu lama. Sistem diharapkan berfungsi sebagai alat pemantauan dan peringatan dini yang bersifat preventif, sehingga pengguna dapat melakukan koreksi postur secara mandiri sebelum muncul keluhan atau gangguan kesehatan yang lebih serius.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Dalam pembuatan alat, ada beberapa kebutuhan utama yang harus dipenuhi oleh alat, sebagai berikut :

1. Sistem harus mampu membedakan postur duduk yang buruk seperti tubuh condong ke arah kiri, kanan, bersandar, maupun membungkuk dan postur tubuh yang benar selama sistem aktif.
2. Sistem harus mampu memperoleh data orientasi atau pergerakan tubuh pengguna melalui sensor yang digunakan sebagai *input* sistem.
3. Sistem harus mampu mengolah data sensor secara *real-time*
4. Sistem harus memberikan *feedback* berupa notifikasi ke pengguna.
5. Sistem harus memberikan saran penanggulangan lebih lanjut jika postur duduk yang buruk sering terjadi

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan kebutuhan yang telah diidentifikasi, tujuan utama proyek ini adalah:

1. Mengembangkan sistem yang mampu membedakan postur duduk yang benar dan postur duduk yang buruk secara akurat selama sistem aktif digunakan oleh pengguna.
2. Menghasilkan sistem yang mampu beroperasi dalam jangka waktu lama dengan konsumsi daya yang rendah sehingga efisien dan mendukung penggunaan berkelanjutan.
3. Merancang sistem yang mampu mengenali dan mengklasifikasikan perubahan postur tubuh, seperti condong ke kiri, condong ke kanan, bersandar dan membungkuk, menggunakan metode komputasi yang sesuai untuk memastikan identifikasi postur yang tepat.
4. Membangun aplikasi *mobile* yang berfungsi sebagai *dashboard* untuk memberikan notifikasi kepada pengguna

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

1. Fitur Dasar

a. *Sensing Capability*

Sistem harus mendeteksi postur tubuh pengguna (membungkuk atau tidak) melalui proses komputasi.

b. *Computation Capability*

Masing-masing solusi yang diusulkan memiliki metode komputasi tersendiri untuk proses penyelesaian masalah.

c. *Notification Capability*

Sistem harus mampu memberi peringatan kepada pengguna saat terjadi postur badansaat duduk tanpa mengganggu konsentrasi untuk menghindari jenuh akibat notifikasi yang berlebihan.



d. Modular

Sistem dirancang dengan arsitektur modular, yaitu tersusun atas beberapa modul fungsional yang saling terintegrasi dalam satu kesatuan sistem, namun tetap dapat beroperasi dan dikembangkan secara relatif independen.

e. Mobile Integrated

Sistem terintegrasi dengan aplikasi mobile yang menampilkan visualisasi hasil monitoring (grafik aktivitas otot serta notifikasi peringatan) dengan tampilan yang mudah dipahami.

1.2.2 Usulan Solusi

a. Solusi I: Sistem Yang Menggunakan Sensor IMU untuk *monitoring* Postur Duduk Secara *Real-Time* Berbasis Aplikasi Mobile.

Sistem yang dikembangkan pada solusi ini dirancang memungkinkan pendeteksian postur tubuh menggunakan sensor IMU, dapat bekerja secara mandiri namun tetap terhubung dalam satu sistem terpadu.

Sistem pendeteksian postur tubuh ini beroperasi dengan sensor *surface Inertial Measurement Unit* (IMU) dalam sebuah *pipeline* data yang canggih, dimana data dikumpulkan secara *real-time* untuk mendeteksi dan mengoreksi masalah postur. Proses dimulai ketika sensor IMU yang terdiri dari *accelerometer* dan *gyroscope*, dipasang di punggung bawah, melacak orientasi tubuh untuk mendeteksi perubahan seperti condong ke samping, bersandar atau membungkuk, dengan data yang diproses melalui algoritma sensor *fusion* seperti *Kalman Filter* untuk menghasilkan estimasi orientasi yang stabil dan akurat. Data sensor kemudian digabungkan dalam tahap *preprocessing*, di mana data IMU menjalani *windowing* untuk menganalisis segmen waktu, memungkinkan penggabungan fitur multimodal yang komprehensif [16].

Dengan pendekatan sistem ini, setiap sistem berperan dalam memantau aspek postur berbeda namun saling melengkapi. Data yang diperoleh dari *computer vision*, IMU tidak hanya dianalisis secara terpisah, tetapi diintegrasikan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi postur duduk. Integrasi data tersebut memungkinkan sistem untuk mengidentifikasi kondisi postur yang tidak ideal secara lebih komprehensif. Selanjutnya, sistem memberikan umpan balik kepada pengguna sebagai bentuk intervensi dini agar koreksi postur dapat dilakukan sebelum menimbulkan keluhan nyeri atau gangguan muskuloskeletal. Dengan mekanisme pemantauan yang berkelanjutan, solusi ini diharapkan dapat membantu

pengguna menjaga postur duduk yang lebih baik serta mengurangi risiko gangguan postur akibat aktivitas duduk dalam jangka waktu lama.

Sebagai antarmuka utama antara sistem dan pengguna, aplikasi *mobile* dirancang untuk menampilkan hasil pemantauan postur dan kondisi otot secara *real-time* dalam bentuk yang mudah dipahami. Aplikasi ini menerima data hasil pengolahan dari seluruh modul, yaitu *computer vision*, IMU, kemudian menyajikannya dalam bentuk indikator kondisi postur. Selain itu, aplikasi berfungsi sebagai media pemberian umpan balik kepada pengguna melalui notifikasi atau peringatan ketika terdeteksi postur duduk yang tidak ideal. Dengan adanya aplikasi *mobile*, pengguna dapat memantau kondisi postur duduknya secara mandiri dan melakukan koreksi secara langsung, sehingga sistem tidak hanya berperan sebagai alat *monitoring*, tetapi juga sebagai sarana edukatif dan preventif dalam menjaga kesehatan postur tubuh selama aktivitas duduk.

b. Solusi II: Sistem dengan sensor berat dengan IMU untuk mendeteksi posisi leher dan posisi duduk

Solusi ini berupa sistem pemantauan ergonomi duduk yang memperoleh *input* dari sumber sensor yang bekerja secara terintegrasi. Data posisi duduk diperoleh dari sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) yang menghasilkan data percepatan dan kecepatan sudut pada tiga sumbu. Data ini merepresentasikan orientasi dan pergerakan tubuh bagian atas serta leher pengguna selama aktivitas duduk.

Pada tahap pemrosesan, Data dari sensor IMU diproses menggunakan metode sensor *fusion* untuk memperoleh sudut orientasi leher dan tubuh pengguna secara lebih stabil dan akurat. Dari sudut orientasi ini, sistem menghitung parameter postur seperti *Craniovertebral Angle* untuk merepresentasikan posisi leher, serta sudut kemiringan tubuh untuk menggambarkan posisi duduk. Nilai-nilai sudut tersebut kemudian dibandingkan dengan batas postur ergonomis yang telah ditentukan untuk mengidentifikasi apakah posisi leher dan posisi duduk berada dalam kondisi ergonomis atau tidak [18].

Hasil dari seluruh proses tersebut berupa informasi mengenai sudut kemiringan tubuh untuk menggambarkan posisi leher dan posisi duduk. Seluruh informasi ini kemudian diintegrasikan dan ditampilkan pada *dashboard* aplikasi dalam bentuk visualisasi dan status kondisi pengguna. Sistem juga dapat memberikan peringatan apabila terdeteksi postur yang tidak

ergonomis yang berpotensi menimbulkan gangguan muskuloskeletal apabila dibiarkan dalam jangka waktu tertentu [19].

c. Solusi III: Sistem Monitoring Berbasis *Computer Vision* dengan Algoritma *Pose Estimation*

Solusi ini menghilangkan kebutuhan perangkat *wearable* sama sekali. Sistem ini hanya menggunakan *webcam* yang sudah ada di laptop atau terpasang di monitor. Perangkat lunak di komputer akan menganalisis video dari *webcam* secara *real-time* untuk mendeteksi dan mengestimasi postur pengguna menggunakan algoritma *pose estimation*.

Algoritma *pose estimation* merupakan teknologi yang digunakan untuk mendeteksi posisi dan orientasi bagian tubuh manusia melalui gambar atau video. Teknologi ini banyak diterapkan dalam pengenalan aktivitas, pelacakan gerakan, animasi, permainan, serta *Human-Computer Interaction* (HCI). Secara umum, *pose estimation* terdiri atas pendekatan *single pose estimation*, yang mendeteksi postur satu orang, dan *multi pose estimation*, yang mampu mendeteksi beberapa orang dengan jumlah dan posisi yang tidak diketahui. Dalam penerapannya, pendekatan *single pose estimation* dapat menggunakan metode *direct regression-based* atau *heatmap-based* untuk menentukan lokasi titik-titik kunci pada tubuh.

Salah satu implementasi yang dapat digunakan adalah MediaPipe dari Google, yang mampu mendeteksi berbagai titik kunci tubuh manusia melalui *webcam*. Sistem dapat melakukan kalibrasi awal ketika pengguna duduk dengan posisi tegak, kemudian memantau perubahan postur secara *real-time*. Apabila pengguna terdeteksi membungkuk atau berada pada posisi yang tidak sesuai, sistem dapat memberikan notifikasi sebagai pengingat untuk memperbaiki postur.

Keunggulan pendekatan ini adalah tidak memerlukan perangkat keras tambahan karena hanya memanfaatkan *webcam* yang telah tersedia pada komputer atau laptop. Selain mendeteksi posisi membungkuk, sistem juga berpotensi menganalisis kondisi postur lainnya, seperti kemiringan leher dan ketidaksejajaran bahu. Namun, pendekatan ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti masalah privasi akibat penggunaan kamera secara terus-menerus, ketergantungan terhadap kondisi pencahayaan dan pandangan kamera, serta kebutuhan sumber daya komputasi yang lebih besar untuk melakukan pemrosesan video secara *real-time*.

Secara keseluruhan, *pose estimation* menawarkan solusi monitoring postur yang praktis dan mudah diakses karena memanfaatkan perangkat yang telah dimiliki pengguna. Dengan pengelolaan privasi yang baik dan pemrosesan yang dilakukan secara lokal, pendekatan ini dapat menjadi alternatif modern dalam mendeteksi dan memantau postur duduk.

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Tabel 1.2 Analisis House Of Quality

House Of Quality				Fitur					
 = 1 (Weak)  = 3 (Medium)  = 5 (Strong)		Importance Rating	Percentage of Importance	Sensing Capability	Computation Capability	Notification Capability	Modular	Mobile Integrated	Low Maintenance
Konstrain	Biaya Tidak Melebihi Rp. 15.000.000	4	28,57%						-
	Tidak Ada Biaya Langgannan dan perawatan mudah	5	35,71%						-
	Tidak Menyebabkan Efek Samping Lain Ketika Alat Dipakai	5	35,71%						-
Importance Rating				44	24	44	62	44	218
Percentage of Importance Rating				20,18%	11%	20,18%	28,4%	20,18%	100%
Solusi I									4.59
Solusi II									3.05
Solusi III									3.05

Perhitungan *House of Quality*

Fitur Dasar:

$$\text{Solusi I: } (5 \times 20,18\%) + (5 \times 11\%) + (5 \times 20,18\%) + (5 \times 28,4\%) + (3 \times 20,18\%) = 459,34\% \\ = 4.59$$

$$\text{Solusi II: } (3 \times 20,18\%) + (3 \times 11\%) + (5 \times 20,18\%) + (1 \times 28,4\%) + (3 \times 20,18\%) = 305,38\% \\ = 3.05$$

$$\text{Solusi III: } (3 \times 20,18\%) + (5 \times 11\%) + (5 \times 20,18\%) + (1 \times 28,4\%) + (1 \times 20,18\%) = 305,38\% \\ = 3.05$$

Analisis Hubungan Fitur Dasar dengan Konstrain.

Analisis hubungan antara fitur dasar sistem dan konstrain dilakukan untuk menilai sejauh mana fitur-fitur utama yang dirancang mampu memenuhi batasan desain yang telah ditetapkan. Konstrain yang digunakan dalam pengembangan sistem ini mencakup aspek *low cost*, *low maintenance*, dan *usability*, yang mencerminkan kebutuhan praktis pengguna sekaligus keberlanjutan sistem dalam penggunaan jangka panjang.

Fitur *sensing capability* memiliki keterkaitan yang cukup kuat dengan konstrain biaya dan perawatan. Sistem yang ditujukan untuk mendeteksi postur tubuh, posisi leher, serta kelelahan otot secara akurat menuntut penggunaan sensor yang beragam dan presisi. Berdasarkan Tabel *House of Quality*, hubungan antara *sensing capability* dan konstrain *low cost* berada pada tingkat sedang hingga lemah, yang menunjukkan adanya kompromi antara tingkat akurasi pendeteksian dan biaya implementasi. Semakin kompleks konfigurasi sensor yang digunakan, semakin besar pula dampaknya terhadap biaya perangkat keras serta kebutuhan kalibrasi dan pemeliharaan.

Fitur *computation capability* berkaitan erat dengan aspek biaya dan *usability*. Proses komputasi yang lebih kompleks memerlukan sumber daya pemrosesan yang lebih tinggi, yang dapat meningkatkan konsumsi daya dan biaya sistem. Pada Tabel *House of Quality*, *computation capability* memiliki bobot kepentingan yang relatif tinggi (sekitar 20%), menandakan bahwa kemampuan pemrosesan merupakan elemen penting dalam sistem. Namun demikian, kemampuan ini tetap perlu dioptimalkan agar tidak menurunkan kenyamanan pengguna akibat latensi atau beban sistem yang berlebihan.

Fitur *notification capability* menunjukkan hubungan yang sangat kuat dengan konstrain *usability*. Hal ini tercermin pada Tabel *House of Quality* melalui bobot kepentingan tertinggi sebesar 28,4%, yang mengindikasikan bahwa efektivitas mekanisme notifikasi menjadi faktor paling krusial dalam penerimaan sistem oleh pengguna. Sistem diharapkan mampu memberikan peringatan yang tepat waktu dan informatif tanpa menimbulkan gangguan atau

kejenjutan akibat notifikasi yang terlalu sering. Oleh karena itu, perancangan notifikasi yang seimbang dan adaptif menjadi elemen kunci dalam menjamin keberlangsungan penggunaan sistem.

Fitur modularitas dimaknai sebagai pembagian sistem ke dalam modul-modul analisis fungsional yang masing-masing berfokus pada aspek postur yang berbeda, seperti pendeteksian postur duduk condong kiri, condong kanan, bersandar dan membungkuk. Pendekatan ini memungkinkan setiap aspek dianalisis secara lebih spesifik dengan metode *sensing* dan komputasi yang sesuai, tanpa saling mempengaruhi antar modul. Meskipun pada Tabel *House of Quality* modularitas memiliki bobot kepentingan yang relatif lebih rendah (11%), fitur ini tetap berperan penting dalam menjaga kejelasan informasi, fleksibilitas pengembangan sistem, serta peningkatan *usability* secara keseluruhan.

Fitur *mobile integrated* memiliki hubungan yang kuat dengan konstrain *usability*. Integrasi sistem dengan aplikasi mobile memungkinkan hasil pemantauan ditampilkan dalam bentuk visualisasi yang intuitif dan mudah dipahami oleh pengguna. Dalam Tabel *House of Quality*, fitur ini memiliki bobot kepentingan yang sebanding dengan *sensing* dan *computation capability* (sekitar 20%), yang menunjukkan bahwa kemudahan akses dan pemahaman informasi melalui perangkat *mobile* merupakan faktor penting dalam meningkatkan pengalaman pengguna.

Analisis Hubungan Setiap Solusi dengan Fitur Dasar.

Analisis hubungan antara setiap solusi yang diusulkan dengan fitur dasar dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana masing-masing solusi mampu memenuhi kebutuhan sistem secara keseluruhan. Penilaian ini mengacu pada bobot kepentingan setiap fitur serta kekuatan hubungan yang ditampilkan pada Tabel *House of Quality*, sehingga diperoleh gambaran objektif mengenai tingkat kesesuaian tiap solusi.

Solusi I menunjukkan tingkat keterkaitan yang sangat kuat dengan hampir seluruh fitur dasar sistem. Hal ini tercermin dari perolehan nilai total tertinggi pada Tabel *House of Quality*, yaitu 4,59. Solusi ini memiliki hubungan yang kuat terhadap fitur *sensing capability*, *computation capability*, *notification capability*, dan *mobile integrated*, karena menerapkan pendekatan multimodal yang menggunakan teknologi IMU dalam sebuah arsitektur modular. Tingginya tingkat kesesuaian tersebut menunjukkan bahwa Solusi I mampu menjawab kebutuhan utama

sistem secara menyeluruh, khususnya dengan mempertimbangkan aspek *usability* yang memiliki bobot kepentingan paling besar.

Solusi II memperoleh nilai total 3,05, yang menggambarkan tingkat pemenuhan fitur dasar pada level menengah. Berdasarkan Tabel *House of Quality*, Solusi II masih menunjukkan hubungan yang cukup kuat pada fitur *sensing capability* dan *computation capability*, namun memiliki hubungan yang lebih lemah pada fitur modularitas dan sebagian aspek *notification capability*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun Solusi II mampu menjalankan fungsi dasar pemantauan postur dan kelelahan otot, fleksibilitas pengembangan sistem serta kualitas interaksi dengan pengguna belum seoptimal Solusi I.

Solusi III juga memperoleh nilai total 3,05, dengan keunggulan utama pada aspek *computation capability* dan kemudahan integrasi perangkat lunak. Berdasarkan Tabel *House of Quality*, solusi ini menunjukkan hubungan yang kuat pada fitur komputasi dan sensing berbasis visi, namun memiliki hubungan yang lemah pada fitur modularitas dan *mobile integrated*. Ketergantungan yang tinggi pada satu sumber data utama, yaitu kamera, serta terbatasnya integrasi sensor fisiologis menyebabkan Solusi III kurang mampu memberikan pemenuhan fitur dasar secara komprehensif dibandingkan solusi lainnya.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Setelah tabel HoQ dianalisis, maka dapat disimpulkan bahwa Solusi yang menempati total nilai tertinggi Adalah solusi I. Dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang akan mengolah data yang berbeda yang didapat dari sensor IMU. Solusi I lebih efektif karena menjawab masalah postur duduk dalam satu alat. Sensor IMU dipilih karena memiliki dua kemampuan komputasi untuk menganalisis postur tubuh dengan efektif yaitu *Accelerometer* dan *Gyroscope* yang mana *Accelerometer* akan mendeteksi vektor gravitasi untuk menentukan posisi tegak dan *Gyroscope* untuk mendeteksi sudut derajat dan berapa lama pengguna membungkuk. Output Solusi I nantinya menggunakan aplikasi *mobile* yang di dalamnya terdapat notifikasi (*Soundtrack* atau Tampilan *Visual*), data *history* untuk melacak kemajuan mereka yang dapat membawa perubahan perilaku positif.

Dari segi *sensing*, *long lasting* dan *computation*, Solusi ini juga memiliki nilai tinggi dalam HoQ, penggunaan sensor *wearable* yang terhubung ke aplikasi *mobile* memastikan akurasi data postur, sementara pemrosesan data di *mobile* membuatnya lebih interaktif.