

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Stroke adalah masalah kesehatan global yang sangat serius. Secara klinis, stroke didefinisikan sebagai sindrom neurologis yang terjadi secara mendadak akibat adanya gangguan peredaran darah di otak, baik itu karena penyumbatan (stroke iskemik) maupun perdarahan (stroke hemoragik). Berdasarkan data Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) tahun 2018, prevalensi stroke di Indonesia menunjukkan peningkatan yang signifikan yakni 10,9/1000 penduduk[1].

Selain angka mortalitas yang tinggi, stroke juga memberikan dampak disabilitas jangka panjang. Sekitar 40% dari penderita stroke yang selamat dari cacat permanen dan membutuhkan bantuan dalam menjalani aktivitas sehari-hari. Kondisi ini tidak hanya membebani pasien, tetapi juga keluarga serta petugas medis.

Rehabilitasi stroke tradisional biasanya melibatkan terapi fisik, okupasi, dan terapi wicara yang dilakukan secara rutin di fasilitas kesehatan. Namun, metode ini menghadapi berbagai kendala, seperti keterbatasan tenaga ahli, fasilitas, biaya tinggi, dan motivasi pasien yang rendah karena latihan yang monoton dan membosankan. Oleh karena itu, diperlukan solusi inovatif yang dapat meningkatkan efektivitas rehabilitasi sekaligus memberikan pengalaman terapi yang menyenangkan dan mudah diakses.[2]

Sepanjang periode rehabilitasi, sekitar 92% latihan rehabilitasi dilaksanakan di rumah, dan 8% dilaksanakan di rumah sakit. Pasien perlu melaporkan perkembangan harian mereka di rumah dan mengunjungi rumah sakit secara teratur untuk penilaian kemajuan. Hal ini menyebabkan beban yang sangat besar pada sumber daya pelayanan kesehatan. HBR merupakan metode yang diperlukan di mana pasien melakukan serangkaian aktivitas fisik di rumah. Pasien menunjukkan kepatuhan dan motivasi yang rendah terhadap program latihan rehabilitasi, pengaruh utamanya adalah kurangnya umpan balik yang berkelanjutan dan pemantauan latihan yang tepat waktu di rumah. Oleh karena itu, sistem yang memungkinkan pelatihan dan penilaian rehabilitasi berbasis rumah sangat

dibutuhkan. Sistem tersebut harus memenuhi persyaratan berikut: pertama, harus hemat biaya, memastikan ketersediaan yang luas tanpa beban keuangan yang berlebihan pada pasien, dan mudah diintegrasikan ke dalam rutinitas pasien; kedua, dapat memberikan penilaian tepat waktu atas latihan pasien di rumah; dan ketiga, harus mempertimbangkan privasi pengguna di lingkungan rumah.[3]

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Upaya promotif yang dilakukan layanan fisioterapi untuk meningkatkan derajat kesehatan masyarakat berupa memelihara dan meningkatkan gerak dan fungsi tubuh dengan sasaran layanan adalah orang yang sehat agar tidak terkena penyakit. Sedangkan upaya preventif yang dilakukan layanan fisioterapi yaitu pencegahan terhadap gangguan gerak serta keterbatasan fungsi, ketidakmampuan individu yang berpotensi untuk mengalami gangguan gerak dan fungsi tubuh akibat faktor kesehatan, sosial ekonomi maupun gaya hidup salah satunya yaitu dengan memberikan penyuluhan, pengobatan dan pemulihan untuk mengurangi keluhan nyeri, dan melakukan program untuk meningkatkan fleksibilitas tubuh, daya tahan atau kebugaran, serta keselarasan postur dalam aktivitas sehari-hari.[4]

Stroke Secara umum dibedakan dalam beberapa fase, yaitu Stroke Fase Akut: 2 Minggu Pertama Pasca Serangan Stroke, Stroke Fase Subakut: Antara 2 Minggu - 6 Bulan Pasca Stroke dan Stroke Fase Kronis: Diatas 6 Bulan Pasca Stroke . Pada tatalaksana penanganan fisioterapi pada pasien stroke iskemik akut disarankan untuk dilakukan mobilisasi dini pasien yang terkena stroke dengan tingkat keparahan yang tidak berat untuk mencegah terjadinya komplikasi.[5]

Aktivitas fisik didefinisikan sebagai setiap gerakan tubuh yang dihasilkan oleh otot rangka yang menghasilkan pengeluaran energi, seperti yang dilakukan selama aktivitas hidup sehari-hari di rumah, di tempat kerja, selama waktu luang, atau transportasi. Latihan fisik adalah suatu jenis aktivitas fisik dengan ciri-ciri khusus; dilakukan secara berulang-ulang, secara terencana dan terstruktur, untuk meningkatkan atau mempertahankan kebugaran jasmani. Aktivitas fisik penting dilakukan setelah stroke, mengembalikan kapasitas sebelum stroke, serta untuk pencegahan sekunder dengan memperbaiki faktor risiko stroke. Manfaat kesehatan

dari aktivitas fisik dan olahraga teratur telah dijelaskan dengan baik di banyak literatur. Selain menjadi faktor risiko yang dapat dimodifikasi untuk stroke, aktivitas fisik dan olahraga juga dapat menjadi neuroprotektif. Tingkat aktivitas fisik dan olahraga pasca-stroke memainkan peran penting dalam pemulihan dan neuroplastisitas.[6]

Pemilihan mekanisme genggam pada perancangan alat ini mengacu pada mekanisme squeeze yang digunakan oleh Jamar Dynamometer. Berdasarkan penelitian Kim et al. dalam jurnal 'Development of an integrated digital hand grip dynamometer', disebutkan bahwa mekanisme Jamar merupakan standar emas (gold standard) dalam pengukuran klinis karena memiliki validitas dan reliabilitas yang telah teruji secara medis.[7]

Tabel 1. 1 Parameter Output Sistem

Parameter	Sensor	Kondisi Aman (Zona Hijau)	Peringatan (Zona Kuning)	Bahaya / STOP (Zona Merah)	Standar Acuan Medis
Kekuatan Genggaman	Load Cell	Target Tercapai (Sesuai Set Point)	Tremor Terdeteksi (Fluktuasi Tinggi)	Drop > 50% (Kelelahan Otot Akut)	[8]
Orientasi Tangan	MPU6050	0° - 30° (Posisi Netral/Ekstensi)	> 30° (Deviasi Ringan)	Posisi Salah/ Ekstrem (Flexi Berlebih)	[9]

Tabel 1. 2 Solusi Yang Telah Ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Jamar dynamometer	Sederhana, portabel, Data kuantitatif instan, reliabilitas tinggi.	Hanya mengukur kekuatan genggam, tidak memberi informasi tentang koordinasi atau aktivitas fungsional.	[10]
Wearable EMG Armband	Memantau aktivitas otot secara <i>real-time</i> . Dapat mengukur aktivasi neuromuskular pada pasien stroke/lumpuh. Memberi <i>insight</i> tentang kapan otot bekerja meski gerakan minimal.	Membutuhkan pemasangan tepat agar sinyal bersih. Rentan noise/artefak gerakan. Interpretasi sinyal butuh tenaga medis yang paham EMG.	[11]
IMU / Wrist Accelerometer	<i>Portable</i> , ringan, mudah dipasang. Bisa merekam kualitas & kuantitas gerakan tangan/lengan dalam aktivitas sehari-hari. Cocok untuk monitoring di rumah (tele-rehab).	Data perlu diunduh & diproses dengan <i>software</i> . Hasil tidak instan seperti dynamometer. Bisa dipengaruhi posisi sensor atau kurangnya kepatuhan pasien	[12]

Berdasarkan analisis terhadap keenam solusi yang telah ada, ditemukan bahwa teknologi pemantauan rehabilitasi saat ini masih memiliki keterbatasan dan belum terintegrasi secara komprehensif. Sebagian besar evaluasi pemulihan motorik masih bertumpu pada metode penilaian manual yang bersifat subjektif, atau menggunakan instrumen medis konvensional yang berdimensi besar dan berbiaya tinggi sehingga sulit diakses secara mandiri. Belum ada perangkat genggam portabel yang terjangkau yang mampu mengintegrasikan pengukuran kekuatan genggam (*grip strength*) dan stabilitas pergerakan tangan (*tremor*) secara simultan ke dalam sistem evaluasi berbasis komputasi cerdas. Kesenjangan ini menyulitkan fisioterapis dalam memantau progresivitas pemulihan fisik pasien secara kuantitatif, terutama saat pasien melakukan latihan mandiri di rumah (*home exercise*). Oleh karena itu, diperlukan sebuah perangkat pemantau motorik portabel yang mampu mengukur parameter fisik tangan secara objektif, terintegrasi, dan *real-time*.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

1. Aspek Kesehatan

Masalah mendasar yang dihadapi adalah evaluasi pemulihan motorik pasca-stroke yang masih bertumpu pada pemeriksaan fisik manual berkala di fasilitas medis. Saat pasien menjalani latihan mandiri di rumah (*home exercise*), perkembangan fungsi fisik ekstremitas atas khususnya kekuatan genggam tangan (*grip strength*) dan stabilitas gerakan (*tremor*) tidak terpantau secara objektif dan kontinu. Ketiadaan pencatatan parameter fisis yang presisi ini menyulitkan pemantauan efektivitas terapi, memperlambat proses pemulihan neuromuskular, serta meningkatkan risiko salah latihan yang dapat memicu cedera otot.

2. Aspek Teknologi

Instrumen evaluasi motorik yang tersedia saat ini umumnya masih berupa alat ukur konvensional (seperti dinamometer mekanik) yang tidak menyimpan riwayat data, atau perangkat rehabilitasi laboratorium yang berdimensi besar dan rumit. Belum tersedianya perangkat genggam portabel yang mampu mengintegrasikan akuisisi multi-sensor fisis (sensor gaya tekan dan sensor inersia) secara *real-time* dengan

algoritma klasifikasi cerdas (*Edge AI*) menyebabkan terputusnya kontinuitas data perkembangan motorik antara pasien di rumah dan fisioterapis.

3. Aspek Ekonomi

Program pemulihan motorik pasca-stroke membutuhkan proses fisioterapi jangka panjang yang membebani finansial pasien dari segi biaya kunjungan dan transportasi medis rutin. Di sisi lain, instrumen evaluasi dan rehabilitasi motorik canggih (seperti perangkat robotik klinis) memiliki harga yang sangat mahal sehingga tidak terjangkau (*accessible*) untuk penggunaan personal. Ketiadaan solusi pemantau motorik berbasis IoT yang ekonomis membatasi kesempatan pasien untuk mendapatkan evaluasi pemulihan fisik yang layak secara mandiri.

4. Aspek Sosial

Keluarga pasien (*caregiver*) tidak memiliki kompetensi klinis untuk menilai apakah latihan fisik yang dilakukan pasien di rumah sudah menunjukkan kemajuan fungsi motorik yang nyata. Tanpa adanya sistem antarmuka digital yang menyajikan umpan balik (*feedback*) visual dan kuantitatif mengenai status pemulihan tangan secara instan, pasien kerap mengalami kecemasan, ketidakpastian progres, dan hilangnya motivasi, yang berujung pada tingginya angka penghentian latihan mandiri (*drop-out* terapi).

Agar solusi yang dirancang dapat direalisasikan secara nyata dan terukur, berikut adalah batasan-batasan (konstran) yang ditetapkan sebagai acuan desain:

1. Fungsi Integrasi & Kesehatan (ISO/SNI)

- a. Standar Keselamatan (ISO 14971): Perancangan alat wajib menyertakan fitur manajemen risiko, yaitu sistem peringatan dini (*Early Warning System*) yang aktif otomatis saat parameter vital melewati ambang batas aman, guna mencegah risiko stroke lanjutan saat latihan.
- b. Integrasi Sensor: Sistem harus mampu mengakuisisi dua jenis data berbeda (biomekanik dan fisiologis) secara simultan dalam satu *timeline* pengambilan data untuk memberikan korelasi yang valid.

2. Ekonomi (*Affordability*)

- a. Target Biaya: Biaya produksi purwarupa harus diminimalisir (target BOM < Rp 2.000.000) dengan menggunakan komponen sensor yang tersedia luas namun tetap memenuhi standar akurasi linearitas yang dapat diterima, agar solusi ini menjadi alternatif yang layak secara ekonomi dibanding alat impor.
3. Konstrain Teknologi & Waktu (*Feasibility*)
 - a. Konektivitas Berkelanjutan: Sistem harus menggunakan protokol komunikasi hemat daya (BLE/Wi-Fi) untuk menjamin pengiriman data riwayat (*logging*) secara terus-menerus ke *cloud* tanpa membebani daya baterai secara berlebihan.
 - b. Batasan Waktu: Pengembangan algoritma fusi sensor (penggabungan data motorik dan vital) serta fabrikasi alat harus diselesaikan dalam kurun waktu < 6 bulan sesuai periode Tugas Akhir.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Untuk mewujudkan sistem yang dirancang agar berjalan optimal, diperlukan perumusan kebutuhan secara jelas dan terstruktur. Kebutuhan ini mencakup aspek fungsional, yang berkaitan dengan kemampuan dan layanan utama yang harus disediakan sistem, serta aspek non fungsional, yang berhubungan dengan kualitas, standar, dan batasan kinerja sistem. Uraian berikut memaparkan kebutuhan yang harus dipenuhi sebagai dasar pengembangan sistem secara menyeluruh.

1. Sistem mampu terintegrasi Parameter Pemulihan dan Risiko (*Dual-Monitoring*)
2. Sistem dapat melakukan pemantauan berkelanjutan di luar fasilitas kesehatan
3. Sistem harus dapat menampilkan digitalisasi Logbook dan Visualisasi tren progres

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan analisis masalah diatas maka sistem ini diharuskan untuk mampu mengukur kemajuan kekuatan motorik tangan pasien pasca-stroke secara objektif untuk menjembatani celah pengawasan antara fasilitas medis dan rumah, memastikan keamanan pasien selama proses rehabilitasi mandiri, serta memfasilitasi deteksi dini terhadap potensi komplikasi berulang melalui integrasi

data kesehatan yang berkelanjutan serta menyediakan platform pemantauan yang telah terintegrasi.

1.2 Solusi

Solusi yang diambil dari permasalahan ini lebih berfokus pada penyediaan sistem monitoring rehabilitasi mandiri yang mampu mengintegrasikan pengukuran kekuatan motorik tangan, sistem ini memastikan proses pemulihan otot dapat berlangsung secara optimal tanpa memicu risiko komplikasi atau serangan stroke berulang.

1.2.1 Karakteristik Produk

Berdasarkan permasalahan tersebut, berikut beberapa fitur penting yang perlu ada pada solusi yang ditawarkan.

1.2.1.1 Fitur Dasar

1. Sensing Capability (ISO/TS 22067)

Sistem mengintegrasikan sensor fisik utama untuk akuisisi data motorik ekstremitas atas secara terpadu. Pertama, sensor tekanan digunakan untuk mendeteksi besaran gaya gengaman tangan (grip strength) secara linier dan presisi. Kedua, sensor inersia (IMU) digunakan untuk mendeteksi fluktuasi getaran (tremor) serta dinamika pergerakan tangan dalam ruang 3D. Kedua sensor ini bekerja secara simultan untuk menghasilkan data fisis kuantitatif yang menggambarkan kemampuan koordinasi dan kekuatan mekanis otot tangan pasien.

2. Computation Capability

Solusi yang ditawarkan memiliki kemampuan komputasi cerdas berbasis Edge AI untuk mengolah parameter motorik yang diperoleh dari sensor. Unit komputasi melakukan tahap normalisasi fitur (StandardScaler) dan mengeksekusi algoritma K-Nearest Neighbors (KNN) guna mengklasifikasikan tingkat pemulihan motorik pasien (Motorik Berat, Motorik Sedang, atau Membaik). Pemrosesan data secara lokal pada subsistem aplikasi mobile memastikan efisiensi kalkulasi jarak

Euclidean, memberikan hasil klasifikasi yang cepat (real-time), serta menghemat kapasitas memori mikrokontroler.

3. Output Capability

Solusi yang ditawarkan mampu menyajikan keluaran intuitif berupa visualisasi data dan umpan balik interaktif. Antarmuka aplikasi mobile menampilkan data kuantitatif kekuatan genggam tangan (Kg), tingkat getaran (tremor), status klasifikasi motorik, serta jumlah repetisi latihan secara real-time. Selain itu, sistem dilengkapi dengan indikator visual pada dasbor aplikasi dan sinyal audio (buzzer) sebagai penanda interaktif saat pasien mencapai target latihan atau menyelesaikan sesi terapi.

4. Networking Capability (ISO 80001-1)

Sistem dilengkapi kapabilitas konektivitas nirkabel untuk menjamin transmisi data latihan yang cepat (low latency). Mikrokontroler mentransmisikan data mentah hasil pembacaan sensor ke basis data cloud (Firebase Realtime Database) melalui jaringan Wi-Fi. Selanjutnya, aplikasi mobile melakukan sinkronisasi data secara otomatis untuk komputasi dan visualisasi. Teknologi nirkabel ini memungkinkan data hasil latihan motorik pasien dapat dipantau oleh fisioterapis secara jarak jauh (tele-rehabilitation) tanpa kendala kabel yang membatasi pergerakan tangan.

5. Data Logging

Sistem memiliki kemampuan manajemen penyimpanan data yang terstruktur. Fitur ini secara otomatis mencatat dan menyimpan setiap sesi latihan ke dalam rekam medis digital, yang mencakup: penanda waktu (timestamp), durasi latihan, nilai kekuatan genggam (rata-rata dan puncak), profil getaran (tremor), jumlah repetisi, serta riwayat hasil klasifikasi motorik. Data historis ini memungkinkan fisioterapis menganalisis tren perkembangan motorik pasien (progresif atau regresif) guna menentukan penyesuaian target latihan selanjutnya secara objektif.

6. Notification Capability

Sistem memiliki kemampuan manajemen notifikasi proaktif pada aplikasi mobile untuk mendukung kedisiplinan latihan mandiri pasien. Fitur ini memberikan umpan balik kepatuhan (adherence feedback) berupa pengingat jadwal latihan rutin (push notification) dan notifikasi pencapaian target performa motorik (seperti peningkatan kekuatan genggam atau penyelesaian repetisi). Mekanisme notifikasi ini dirancang untuk menjaga konsistensi, menekan angka putus terapi (drop-out), serta meningkatkan motivasi pasien dalam menjalani rehabilitasi fisik mandiri di rumah..

1.2.1.2 Fitur Tambahan

1. Low Energy

Solusi harus dirancang untuk memaksimalkan efisiensi daya, mengingat alat ini memproses banyak sensor sekaligus. Efisiensi energi jangka panjang ini memungkinkan penggunaan nirkabel (*wireless*) dan mobilitas tinggi. Hal ini krusial untuk perangkat *home-use* bertenaga baterai yang harus berfungsi secara konsisten untuk durasi sesi latihan yang panjang tanpa perlu sering diisi ulang.

2. Compact Size

Solusi harus memiliki ukuran yang ringkas dan portabel, dimana seluruh sensor (Tekanan, IMU, dan) terintegrasi ke dalam satu unit genggam (*handheld*). Desain *All-in-One* ini menghilangkan kebutuhan akan peralatan terpisah yang memakan tempat sehingga alat mudah digunakan di mana saja, bahkan di ruang terbatas.

3. Rekomendasi *Home Exercise*

Alat ini berfungsi sebagai asisten rehabilitasi cerdas yang memberikan instruksi latihan mandiri secara terpandu. sistem akan memberikan saran intensitas latihan berdasarkan capaian kekuatan otot, namun secara otomatis akan merekomendasikan istirahat atau penurunan intensitas jika terdeteksi detak jantung atau tekanan darah pasien melampaui ambang batas aman.

4. ISO 14971 (*User Friendly*)

Kriteria ini mewajibkan desain yang mudah dioperasikan, terutama bagi pasien pasca-stroke dengan keterbatasan motorik. Konsep *User Friendly* diwujudkan melalui mekanisme "*Single-Action Monitoring*": pasien cukup menggenggam alat untuk mengukur kekuatan dan parameter vital sekaligus, tanpa perlu memasang manset atau sensor tambahan yang rumit. Hal ini mengurangi risiko kesalahan penggunaan (*use error*) dan meningkatkan kepatuhan pasien dalam menjalani terapi mandiri.

1.2.2 Usulan Solusi

Permasalahan mengenai sulitnya melakukan pemantauan perkembangan pemulihan motorik secara berkelanjutan serta minimnya pengawasan terhadap parameter tekanan darah sebagai faktor risiko stroke berulang, menuntut adanya penyelesaian melalui solusi teknologi yang lebih lanjut.

Oleh karena itu, dalam pembahasan ini akan diuraikan tiga jenis usulan solusi yang dirancang untuk mengintegrasikan pengukuran kekuatan genggaman tangan dengan sistem monitoring hemodinamik secara *real-time* guna memastikan proses rehabilitasi yang aman dan terukur.

1.2.2.1 Solusi 1: Sistem Monitor Hemodinamik Terkoreksi Gerak (*Motion-Corrected Hemodynamic Monitor*)

Solusi pertama mengusulkan pengembangan perangkat rehabilitasi cerdas yang mengintegrasikan fungsi pengukuran beban mekanik dan pemantauan tanda vital dalam satu arsitektur perangkat keras terpadu. Pendekatan ini dirancang untuk mengatasi tantangan utama dalam pengukuran fisiologis dinamis, yaitu distorsi sinyal akibat pergerakan fisik (*motion artifact*) saat pasien melakukan latihan genggaman tangan. Sistem ini dibangun menggunakan mikrokontroler berkinerja tinggi yang mengakuisisi data secara simultan dari tiga komponen sensor utama: sensor tekanan, sensor optik PPG (*Photoplethysmography*), dan sensor inersia IMU (*Inertial Measurement Unit*). Integrasi ketiga sensor ini bertujuan untuk menciptakan mekanisme *monitoring* yang tidak hanya mengukur kekuatan otot,

tetapi juga mampu mengestimasi tekanan darah secara kontinu tanpa menggunakan manset (*cuffless*) dengan tingkat akurasi yang tetap terjaga meskipun terjadi aktivitas motorik.

Sistem ini memungkinkan interpretasi data yang pintar dengan menggunakan dua metode komputasi utama yang tertanam di dalam mikrokontroler ESP32. Metode pertama menggunakan algoritma supervised learning yang dikenal sebagai *K-Nearest Neighbor (KNN)* untuk mengklasifikasikan tingkat pemulihan motorik pasien. KNN bekerja dengan memetakan input dari sensor gaya (load cell) dan sensor IMU ke dalam ruang fitur multidimensi. Kemudian, terhadap dataset referensi yang telah tersimpan, rumus jarak geometri digunakan untuk menghitung jarak. Prinsip utama KNN adalah memberikan label kategori (seperti Lemah, Sedang, atau Kuat) berdasarkan mayoritas kelas dari sejumlah k tetangga terdekat. KNN bekerja dengan menghitung jarak Euclidean antara data *real-time* (x) dengan data latih (y) dalam ruang fitur:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Persamaan 1.1 Rumus Euclidean

Dalam situasi ini, penggunaan KNN sangat efektif karena mampu membuat keputusan klasifikasi yang konsisten terhadap data sensor yang bersifat linier tetapi memiliki variasi antar-individu yang berbeda.

Support Vector Regression (SVR) adalah teknik komputasi kedua yang sangat penting untuk memantau tanda vital. Karena kemampuan SVR untuk menangani regresi data non-linier yang kompleks, itu adalah pilihan yang tepat untuk estimasi tekanan darah tanpa cuff.

$$\min_{w, b, \xi, \xi^*} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*)$$

Persamaan 1.2 Rumus SVR

SVR bekerja dengan mencari fungsi pemetaan yang meminimalkan kompleksitas model sambil meminimalkan penyimpangan sebesar epsilon dari nilai tekanan darah target. Ini membedakannya dari regresi konvensional. SVR menggunakan kernel Fungsi Basis Radial (RBF) untuk menangani dinamika sinyal PPG yang sangat sensitif. RBF memetakan fitur seperti waktu kedatangan pulse (PAT) dan morfologi nadi ke dimensi yang lebih tinggi, yang memungkinkan estimasi yang lebih akurat hubungan antara tekanan darah dan sinyal optik.

Replikasi data yang telah dikomputasi ke dalam informasi yang dapat digunakan secara klinis dikenal sebagai tahap akhir atau output. Pada layar OLED perangkat, hasil estimasi tekanan darah dalam satuan mmHg serta kategori pemulihan motorik KNN ditampilkan secara real-time. Sistem ini mengirimkan semua parameter kesehatan ke database pusat melalui jaringan Wi-Fi selain visualisasi lokal. Dengan integrasi IPO yang melibatkan teknik KNN dan SVR ini, dokter dapat memantau perkembangan pasien secara online dan memastikan bahwa latihan fisik pasien tetap berada di batas hemodinamik yang aman untuk mengurangi risiko stroke berulang.

1.2.2.2 Solusi 2: Sistem Sinkronisasi Neuro-Kardiovaskular Berbasis Waktu Rambat Pulsa (*Pulse Transit Time*)

Solusi kedua mengusulkan sebuah pendekatan diagnostik yang lebih mendalam dengan mengintegrasikan parameter aktivitas listrik jantung dan fleksibilitas motorik melalui sistem pemantauan berbasis *Pulse Transit Time (PTT)*. Pada tahap input, data diambil dari tiga sumber sensasi berbeda secara sinkron dalam satu basis waktu. Sementara sensor PPG di ujung jari mendeteksi gelombang pulsa arteri perifer, sensor EKG satu ujung menangkap sinyal biopotensial jantung untuk menentukan puncak gelombang R. Sensor gaya dan sensor tekuk (Flex) merekam tingkat kelengkungan jari dan intensitas kontraksi motorik secara bersamaan. Tujuan dari kombinasi input ini adalah untuk menemukan hubungan antara kecepatan aliran darah dan kemampuan fungsional saraf pasien yang mengalami stroke.

Mikrokontroler menjalankan dua algoritma pintar untuk mengolah data fusion sensor selama tahap proses. Metode *K-Nearest Neighbor (KNN)* digunakan untuk

mengolah parameter motorik. Algoritma KNN ini menggabungkan input dari sensor gaya dan fleksibel untuk mengkategorikan kemajuan rehabilitasi jari ke dalam kategori fungsional tertentu. Kategori-kategori ini termasuk fleksibel, normal, atau kaku. Dengan menggunakan perhitungan jarak Euclidean, KNN membandingkan karakteristik kelengkungan dan tekanan tangan pada dataset latih. Dalam hal ini, sistem akan mengidentifikasi status motorik pasien berdasarkan mayoritas label dari tetangga terdekat dalam ruang fitur. Metode ini memastikan tim medis menerima penilaian spastisitas otot yang dapat diukur dan tidak bias.

Metode Artificial Neural Network (ANN), yang bergantung pada parameter Pulse Transit Time (PTT), digunakan untuk melakukan estimasi hemodinamik secara bersamaan. Karena hubungan antara PTT dan tekanan darah sangat tidak linier, ANN digunakan sebagai mesin regresi melalui lapisan saraf tiruan (hidden layers). PTT dihitung sebagai interval waktu antara munculnya puncak R pada elektrokardiogram dan puncak sistolik pada PPG. Tekanan darah sistolik dan diastolik diestimasi oleh jaringan setelah menerima data aktivitas motorik, nilai PTT, dan denyut nadi. Selanjutnya, jaringan melakukan pembobotan sinaptik. Keunggulan adaptivitas yang diberikan oleh penggunaan ANN termasuk kemampuan sistem untuk menyesuaikan model estimasinya dengan profil elastisitas pembuluh darah pasien yang berbeda, yang menghasilkan tingkat akurasi yang lebih individual daripada rumus matematik konvensional.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{aktual} - y_{prediksi})^2$$

Persamaan 1.3 Rumus Mean Squared Error (MSE)

Tahap output sistem ini menyediakan representasi data yang lengkap bagi pasien dan tenaga medis. Pada antarmuka perangkat, hasil klasifikasi tingkat fleksibilitas jari KNN dan nilai tekanan darah ANN ditampilkan secara real-time. Semua informasi ini menunjukkan apakah terapi fisik berhasil, dan mereka juga berfungsi sebagai peringatan jika aktivitas motorik tertentu menyebabkan tekanan darah tinggi yang berbahaya bagi jantung. Solusi 2 menawarkan alat monitoring neuro-kardiovaskular yang sangat detail dan tervalidasi secara klinis untuk mencegah komplikasi stroke lanjutan dengan mengintegrasikan alur IPO yang melibatkan sinkronisasi EKG-PPG dan kecerdasan buatan (KNN & ANN).

1.2.2.3 Solusi 3: Sistem Pemetaan Tekanan Taktil dan Validasi Hemodinamik Osilometrik Terintegrasi

Solusi ketiga mengusulkan sebuah sistem pemantauan yang mengedepankan akurasi klinis absolut dan analisis distribusi gaya tekan melalui pendekatan *Tactile Mapping*. Berbeda dengan solusi sebelumnya yang berbasis estimasi, solusi ini menggunakan mekanisme Sistem Pneumatik Digital yang terintegrasi langsung untuk mengukur tekanan darah secara fisik, serta FSR (*Force Sensitive Resistor*) Matrix Array untuk memetakan kekuatan setiap jari secara individual. Arsitektur ini dirancang untuk menjawab kebutuhan tenaga medis akan data yang tervalidasi secara medis (*clinically validated*) sekaligus memberikan gambaran detail mengenai pola pemulihan saraf motorik halus pada pasien pasca-stroke yang sering kali mengalami ketimpangan kekuatan antar jari.

Pada aspek akuisisi data motorik, perangkat ini menggunakan FSR Matrix Array yang dipasang secara melingkar pada gagang perangkat. Konfigurasi sensor ini terdiri dari beberapa titik sensor tekanan independen yang mampu mendeteksi distribusi gaya tekan dari masing-masing jari secara terpisah. Hal ini memungkinkan sistem untuk menghasilkan profil kekuatan tangan yang dinamis, sehingga fisioterapis dapat mengidentifikasi apakah pasien cenderung hanya menggunakan jari-jari tertentu (*compensatory gripping*) atau sudah mulai mencapai pemulihan kekuatan yang merata. Dari sisi hemodinamik, sistem dilengkapi dengan unit Sensor Tekanan Udara (*Pressure Transducer*), pompa mikro, dan katup solenoid yang dihubungkan ke manset pergelangan tangan. Unit ini bekerja secara otomatis untuk melakukan pengukuran tekanan darah menggunakan prinsip osilometri yang merupakan standar baku pada perangkat tensimeter digital medis.

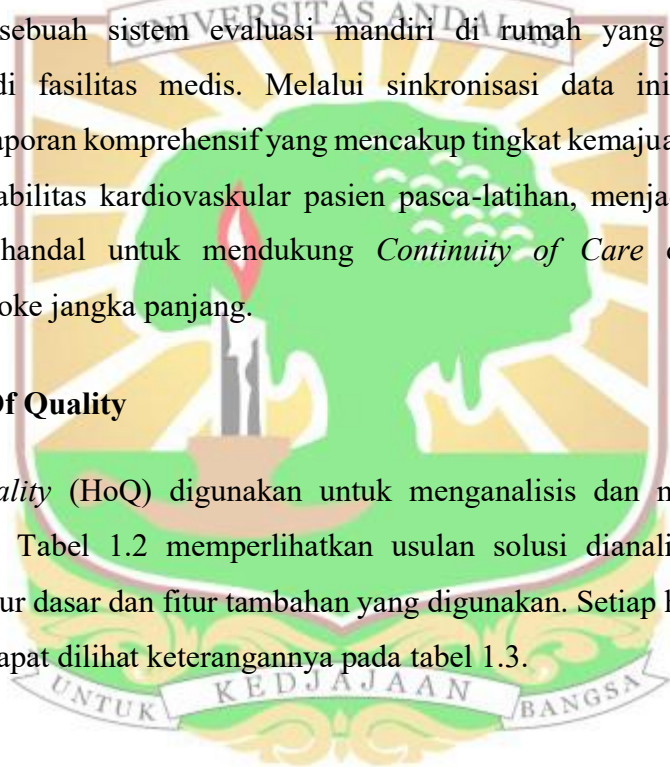
Metode komputasi yang diterapkan dalam solusi ini menggabungkan algoritma deterministik untuk data klinis dan algoritma pengenalan pola untuk data motorik. Untuk parameter tekanan darah, mikrokontroler menjalankan Algoritma Osilometrik dengan teknik pemfilteran *Band-Pass* digital untuk mengisolasi osilasi nadi dari tekanan statis manset. Sistem mencari *Maximum Amplitude Algorithm* (MAA) untuk menentukan *Mean Arterial Pressure* (MAP), yang kemudian dikonversi menjadi nilai sistolik dan diastolik yang akurat sesuai standar ISO.

Sementara itu, untuk data kekuatan tangan, digunakan metode *Pattern Recognition* berbasis *K-Means Clustering*. Algoritma ini mengelompokkan pola distribusi tekanan dari matriks FSR ke dalam beberapa kategori klinis pemulihan motorik, seperti "Genggaman Dominan Ulnar" atau "Genggaman Sinkron", yang memberikan wawasan diagnostik lebih dalam daripada sekadar angka kekuatan total.

Secara sistematis, Solusi 3 menawarkan keunggulan dalam hal validitas data karena menggunakan metode pengukuran tekanan darah yang telah diakui secara klinis. Integrasi antara *heatmap* kekuatan jari dan data tekanan darah osilometrik menciptakan sebuah sistem evaluasi mandiri di rumah yang setara dengan pemantauan di fasilitas medis. Melalui sinkronisasi data ini, sistem dapat memberikan laporan komprehensif yang mencakup tingkat kemajuan motorik halus serta profil stabilitas kardiovaskular pasien pasca-latihan, menjadikannya solusi yang paling handal untuk mendukung *Continuity of Care* dalam program rehabilitasi stroke jangka panjang.

1.2.3 House Of Quality

House of Quality (HoQ) digunakan untuk menganalisis dan memprioritaskan usulan solusi. Tabel 1.2 memperlihatkan usulan solusi dianalisa berdasarkan pemenuhan fitur dasar dan fitur tambahan yang digunakan. Setiap hubungan diberi simbol yang dapat dilihat keterangannya pada tabel 1.3.



Tabel 1. 3 House Of Quality

			▲	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	
	Rating	Percentage Rating	Sensing Capability(ISO/TS 22067)	Computation Capability	Output Capability	Networking Capability(ISO 80001-1)	Notification Capability	Data Logging	Low Energy	Compact Size	Rekomendasi Latih	
Standar Keselamatan	5	29.41%	●	●	○	○		○	△	○	○	
Biaya	4	23.52%	○		○	△			○	○		
Konektivitas	3	17.64%			○	●	●	●	○		○	
Batasan Waktu	5	29.41%		●	○	○		△		○		
Importance Rating			37	50	51	49	15	35	26	42	24	329
Percentage Rating			11.2%	15.19%	15.50%	14.89%	4.55%	10.63%	7.9%	12.76%	7.29%	100%
Solusi 1: Hand Held			●	○	○	●	○	●	○	●	○	3.98
Solusi 2: Smart Glove			●	○	○	●	○	●	○	○	○	3.73
Solusi 3: Armband			○	●	○	●	○	○	△	○	○	3.44

Tabel 1. 4 Keterangan Hubungan Simbol HoQ

Simbol	Nilai	Hubungan
●	5	Berhubungan erat
○	3	Berhubungan Normal
△	1	Berhubungan Jauh
Kosong		Tidak berhubungan

Standar keselamatan memiliki Hubungan Erat (Nilai 5) dengan Sensing Capability dan Computation Capability. Sistem keselamatan bertumpu sepenuhnya pada akurasi data. Sensor (Sensing) wajib membaca tanda vital dan gaya genggam dengan presisi tinggi tanpa *error*, dan unit pemroses (Computation) harus mampu mengolah data tersebut serta mendeteksi bahaya (seperti hipertensi atau kelelahan) secara *real-time*. Kegagalan pada dua fitur ini berisiko fatal bagi pengguna. Hubungan Normal (Nilai 3) dengan Output, Networking, Data Logging, Compact Size, dan Rekomendasi Latihan. Fitur Output dan Networking penting untuk menyampaikan peringatan bahaya kepada pasien atau tenaga medis. Data Logging berfungsi menyimpan bukti riwayat jika terjadi insiden. Compact Size mencegah cedera otot akibat beban alat berlebih, dan Rekomendasi Latihan memastikan dosis latihan berada dalam batas aman. Hubungan Jauh (Nilai 1) dengan Low Energy. Meskipun efisiensi daya diperlukan, sistem keselamatan (monitoring sensor aktif

terus-menerus) seringkali membutuhkan konsumsi daya yang stabil dan cukup besar. Oleh karena itu, prioritas penghematan energi menjadi sekunder dibandingkan performa keselamatan (*safety first*).

Low cost memiliki Hubungan Normal (Nilai 3) dengan Sensing Capability, Output Capability, Low Energy, dan Compact Size. Pemilihan komponen sensor dan layar output kelas menengah (*mid-range*) diperlukan untuk menyeimbangkan antara performa yang valid dengan harga jual yang ekonomis. Fitur Low Energy (baterai kecil) dan Compact Size (material casing minimalis) juga berkontribusi secara moderat dalam menekan biaya produksi material (*Bill of Materials*). Hubungan Jauh (Nilai 1) dengan Networking Capability. Modul komunikasi nirkabel (Wi-Fi/Bluetooth) pada mikrokontroler modern (seperti ESP32) umumnya sudah terintegrasi dengan harga murah, sehingga fitur jejaring tidak lagi menjadi komponen yang membebani biaya produksi secara signifikan dibandingkan sensor fisik.

Konektivitas Hubungan Erat (Nilai 5) dengan Networking Capability, Notification Capability, dan Data Logging. Ini adalah inti dari konektivitas. Networking adalah jalurnya, Notification adalah pesannya, dan Data Logging adalah isi informasinya. Tanpa integrasi yang erat dari ketiga fitur teknis ini, tujuan agar alat dapat dipantau jarak jauh (*tele-rehabilitasi*) tidak akan tercapai. Hubungan Normal (Nilai 3) dengan Output Capability, Low Energy, dan Rekomendasi Latihan. Output layar diperlukan untuk menampilkan status koneksi (terhubung/terputus). Low Energy penting karena transmisi data nirkabel menguras baterai, sehingga protokol hemat daya harus diterapkan. Rekomendasi Latihan seringkali diperbarui atau diunduh melalui konektivitas ini.

Batasan waktu memiliki Hubungan Erat (Nilai 5) dengan Computation Capability. Waktu pengembangan perangkat lunak (koding) seringkali menjadi hambatan utama. Penggunaan algoritma komputasi yang efisien dan pemilihan mikrokontroler dengan dukungan *library* yang luas sangat menentukan apakah proyek dapat selesai cepat atau molor. Hubungan Normal (Nilai 3) dengan Output Capability, Networking Capability, dan Compact Size. Penggunaan modul layar dan komunikasi yang *plug-and-play* (mudah dipasang) serta desain mekanik yang

ringkas (Compact Size) membantu mempercepat proses perakitan fisik dan integrasi sistem agar sesuai jadwal. Hubungan Jauh (Nilai 1) dengan Data Logging. Dalam fase pengembangan cepat (prototyping), sistem pencatatan data yang kompleks seringkali disederhanakan terlebih dahulu. Implementasi fitur logging dasar dianggap tidak memakan waktu pengembangan yang signifikan dibandingkan algoritma utama.

Berikut perhitungan menggunakan *house of quality* ketiga solusi terhadap fitur dasar yaitu:

Solusi 1 :

$$(5 \times 11.2\%) + (3 \times 15.19\%) + (3 \times 15.50\%) + (5 \times 14.89\%) + (3 \times 4.55\%) + (5 \times 10.63\%) + (3 \times 7.9\%) + (5 \times 12.76\%) + (3 \times 7.29\%) = 3.98$$

Solusi 2:

$$(5 \times 11.2\%) + (3 \times 15.19\%) + (3 \times 15.50\%) + (5 \times 14.89\%) + (3 \times 4.55\%) + (5 \times 10.63\%) + (3 \times 7.9\%) + (3 \times 12.76\%) + (3 \times 7.29\%) = 3.73$$

Solusi 3 :

$$(3 \times 11.2\%) + (5 \times 15.19\%) + (3 \times 15.50\%) + (5 \times 14.89\%) + (3 \times 4.55\%) + (3 \times 10.63\%) + (1 \times 7.9\%) + (3 \times 12.76\%) + (3 \times 7.29\%) = 3.44$$

Ketiga solusi yang ditawarkan, berhubungan erat dengan *sensing capability*, *Networking Capability*, dan *Data Logging* karena sistem yang ditawarkan dilengkapi sensor, sistem dapat memberikan hasil pengukuran ke device pasien, dan menyimpan progress perkembangan kekuatan alat gerak tangan pasien.

Solusi 1: Solusi ini memiliki hubungan erat dengan *Sensing Capability*, *Networking*, dan *Data Logging*. Integrasi sensor Tekanan, Inersia (IMU), dan PPG dalam satu *mainboard* memungkinkan pengambilan data motorik dan fisiologis secara simultan dengan presisi tinggi. *Output Capability* dan *Notification Capability* bernilai normal karena meskipun memiliki layar OLED terintegrasi untuk memberikan umpan balik dan notifikasi langsung, ukuran layarnya terbatas dibandingkan antarmuka aplikasi HP. *Computation Capability* bernilai normal (○) karena pengolahan algoritma KNN dan estimasi vital pada perangkat genggam

bersifat efisien dan tidak membebani mikrokontroler secara berlebihan. 1. Desain genggam (*all-in-one*) tanpa kabel yang menjuntai atau kain sarung tangan membuatnya sangat ringkas. Pasien stroke dengan tangan yang kaku (*spastic*) jauh lebih mudah menggenggam batang alat ini dibandingkan harus memasukkan jari satu per satu ke dalam sarung tangan. Penggunaan layar OLED dan sensor optik membutuhkan daya moderat. Meskipun tidak seboros pemrosesan sinyal otot, konsumsi dayanya tetap perlu dimanajemen dengan baik agar bertahan lama. Sistem mampu memberikan saran sederhana langsung di layar (misal: "Tambah Kekuatan"), namun untuk analisis mendalam tetap bergantung pada aplikasi eksternal.

Solusi 2: Solusi ini memiliki hubungan erat dengan *Sensing Capability*, *Networking*, dan *Data Logging*. Keunggulan utamanya adalah sensor Flex yang mampu merekam pergerakan setiap jari secara individual, menghasilkan *Data Logging* yang sangat kaya akan detail posisi jari. Namun, *Output* dan *Notification Capability* bernilai normal karena solusi ini umumnya tidak memiliki layar pada sarung tangannya dan sangat bergantung pada notifikasi visual di perangkat eksternal (HP/Tablet). *Computation Capability* bernilai normal karena data resistansi sensor relatif mudah diolah. Meskipun fleksibel, sarung tangan memiliki dimensi yang lebih besar karena melibatkan material kain dan *velcro*. Bagi pasien stroke, proses pemakaian (*donning/doffing*) sarung tangan seringkali sulit dan memakan tempat penyimpanan yang lebih besar dibanding alat genggam. Membutuhkan daya untuk banyak sensor tekuk (*flex*) dan modul komunikasi, namun masih dalam batas wajar untuk perangkat *wearable*. Saran latihan biasanya tidak disampaikan oleh alat secara langsung (karena minim output), melainkan sepenuhnya melalui aplikasi yang terhubung.

Solusi 3: Solusi ini memiliki hubungan erat dengan *Networking Capability* karena ketergantungan mutlak pada transmisi data nirkabel untuk visualisasi sinyal yang kompleks. Namun, solusinya hanya memiliki hubungan normal (○) dengan *Sensing Capability* karena kerentanan sensor sEMG terhadap *noise* (keringat/pergeseran) yang mengurangi akurasi di lingkungan rumah. *Data Logging* bernilai normal karena data sinyal listrik otot sulit diinterpretasikan historisnya oleh pengguna

awam. *Computation Capability* memiliki tantangan tersendiri (pada beberapa kasus dianggap lemah atau butuh *resource* tinggi) karena membutuhkan algoritma DSP (*Digital Signal Processing*) yang berat. Ini adalah kelemahan terbesar. Pemrosesan sinyal sEMG secara *real-time* dan pengambilan sampel frekuensi tinggi (High Sampling Rate) menguras baterai dengan sangat cepat, membuatnya kurang ideal untuk penggunaan jangka panjang tanpa sering diisi ulang. Meskipun berbentuk gelang (*armband*), alat ini harus dipasang ketat di lengan atas atau bawah. Dimensinya relatif ringkas, namun kebutuhan akan elektroda yang menempel kulit membuatnya kurang praktis dibandingkan sekadar menggenggam alat. Interpretasi sinyal otot menjadi rekomendasi gerakan ("Apakah otot saya sudah kontraksi benar?") sangat sulit dilakukan tanpa visualisasi grafik di aplikasi eksternal.

Setelah dilakukan akumulasi penilaian, diperoleh hasil bahwa Solusi 1, yaitu sistem monitoring terintegrasi yang menggabungkan Sensor Tekanan, Sensor Inersia (IMU), dan Sensor PPG, memiliki nilai total tertinggi dibandingkan usulan solusi lainnya.

1.2.4 Solusi Yang Dipilih

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan menggunakan *House of Quality* (HoQ) dengan menganalisa hubungan seluruh usulan solusi terhadap fitur dasar dan fitur tambahan, diperoleh Solusi 1 yaitu sistem monitoring terintegrasi dengan menggunakan Sensor Tekanan, Sensor Inersia (IMU), dan Sensor PPG merupakan solusi terbaik untuk menyelesaikan masalah. Solusi 1 memiliki nilai yang lebih tinggi dan lebih unggul dibandingkan solusi lainnya. Dilihat dari keterhubungan solusi dengan fitur dasar, Solusi 1 menempati nilai yang paling tinggi karena kemampuan sensornya yang komprehensif. Begitu juga ketika dianalisa berdasarkan fitur tambahan, Solusi 1 juga menempati urutan tertinggi diantara solusi lainnya terutama pada aspek kemudahan penggunaan dan biaya. Solusi 1 dipilih karena integrasi ketiga sensor tersebut dapat mendeteksi kekuatan tangan, sudut gerak, serta kondisi vital (jantung dan oksigen) pasien pasca stroke secara bersamaan dan akurat. Saat pasien menggenggam sistem tersebut, maka sistem akan menampilkan data performa motorik dan status keselamatan fisiologis secara *real-*

time, serta mengirimkan data riwayat tersebut ke *device* pasien. Dengan terpilihnya Solusi 1, diharapkan sistem dapat menyediakan platform pemantauan ganda (pemulihan gerak dan pencegahan risiko) yang nyaman dan aman, hingga dapat menjadi acuan fisioterapis untuk mengambil tindakan selanjutnya pada sesi fisioterapi berikutnya.

