

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.

Keberhasilan rehabilitasi pasien pasca-stroke tidak hanya bergantung pada pemulihan fungsi motorik melalui fisioterapi, namun sangat dipengaruhi oleh manajemen faktor risiko vaskular secara berkelanjutan. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 25-30% penyintas stroke akan mengalami serangan ulang yang sering kali lebih fatal. Hipertensi tetap menjadi faktor risiko tunggal yang paling signifikan, di mana setiap kenaikan tekanan darah sistolik sebesar 20 mmHg akan menggandakan risiko stroke berulang. Ketidakmampuan dalam mengontrol tekanan darah pada fase pemulihan merupakan ancaman nyata terhadap efektivitas program rehabilitasi yang sedang dijalankan.[2]

Pentingnya pemantauan tekanan darah secara intensif pasca-stroke didasari oleh fakta bahwa fluktuasi tekanan darah yang tidak terkendali merupakan pemicu utama terjadinya serangan stroke sekunder. Penelitian menunjukkan bahwa manajemen tekanan darah yang agresif dapat menurunkan risiko stroke berulang secara signifikan, mengingat pasien pasca-stroke memiliki ambang toleransi vaskular yang lebih rendah dibandingkan individu sehat. Ketidakstabilan tekanan darah sistolik, terutama saat pasien melakukan aktivitas fisik atau latihan fisioterapi, sering kali menjadi indikator adanya gangguan autoregulasi serebral yang meningkatkan risiko

perdarahan atau iskemia baru. Oleh karena itu, integrasi teknologi monitoring tekanan darah yang bersifat kontinu dan non-invasif dalam perangkat rehabilitasi menjadi krusial untuk memastikan bahwa intensitas latihan yang diberikan tidak melampaui batas keamanan hemodinamik pasien, sekaligus memberikan data objektif bagi klinis dalam melakukan intervensi preventif yang lebih dini. [3]

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Banyak faktor risiko penyebab terjadinya stroke, termasuk merokok, kurangnya aktivitas fisik, melakukan diet dan tidak sehat, mengonsumsi alkohol, hipertensi, fibrilasi atrium, peningkatan kadar lipid darah, obesitas, jenis kelamin pria, disposisi genetik, dan faktor psikologis. Namun riwayat Hipertensi merupakan penyebab utama terjadinya stroke. Hipertensi memegang peran sebesar 51% kematian akibat stroke. Salah satu dari lima orang yang menderita hipertensi memiliki masalah yaitu kurangnya kontrol terhadap tekanan darah. [4] Pasien yang mengalami stroke dan berhasil bertahan pada bulan pertama memiliki risiko kematian sekitar 10% dalam satu tahun pertama, serta risiko stroke berulang sebesar 43% dalam 10 tahun. Pengendalian tekanan darah tinggi terbukti mampu menurunkan risiko stroke berulang hingga 30%, namun dalam prakteknya, pengendalian tekanan darah pada penyintas stroke masih belum optimal. Di Kanada, sekitar 38.000 orang mengalami stroke setiap tahun, dengan 80% berhasil bertahan pada fase akut. Namun, lemahnya pencegahan sekunder diduga menyebabkan sekitar 1.500 kejadian stroke berulang dan banyak kematian tambahan setiap tahun. Penyebab buruknya pengendalian tekanan darah melibatkan faktor pasien dan tenaga kesehatan, termasuk variasi respons individu terhadap obat, efek samping obat, rendahnya kepatuhan terapi, keterbatasan penerapan pedoman klinis, serta ketidakpastian manfaat terapi pada tingkat individu. Hal ini menegaskan bahwa pedoman klinis bersifat panduan umum dan belum sepenuhnya menjawab kebutuhan personal setiap pasien.[5] Pasien yang pernah mengalami stroke memiliki risiko serangan ulang yang jauh lebih tinggi dalam satu hingga lima tahun pertama. Berdasarkan penelitian dalam *Jurnal Kesehatan* (2021), terdapat hubungan yang signifikan antara tekanan darah sistolik yang tidak terkontrol (di atas 140 mmHg) dengan kejadian stroke berulang.

Tekanan darah yang tinggi dan berfluktuasi memberikan stres mekanik pada dinding pembuluh darah serebral yang sudah rapuh, sehingga meningkatkan risiko ruptur atau penyumbatan kembali. [6]

Pada penyintas stroke, mekanisme autoregulasi otak (kemampuan otak untuk menjaga aliran darah tetap stabil meski tekanan darah berubah) sering kali mengalami kerusakan. Hal ini menyebabkan aliran darah ke otak menjadi sangat bergantung pada tekanan darah sistemik. Sedikit saja lonjakan tekanan darah dapat menyebabkan edema serebral atau perdarahan intraserebral baru, yang memvalidasi perlunya deteksi dini melalui sensor PPG dalam perangkat rehabilitasi.[7]

Pemilihan material untuk perangkat rehabilitasi medis berbasis *3D printing* harus mengintegrasikan ketahanan mekanis, keamanan biologis, dan kenyamanan pengguna secara holistik. Penelitian menunjukkan bahwa *Polyethylene Terephthalate Glycol* (PETG) merupakan material yang paling optimal untuk struktur penahan beban (*load-bearing*) karena memiliki perilaku kegagalan ulet (*ductile failure*) yang lebih aman dan resistensi superior terhadap degradasi akibat kelembapan atau keringat dibandingkan material PLA yang cenderung getas [8]. Untuk komponen antarmuka yang bersentuhan langsung dengan kulit, penggunaan *Thermoplastic Polyurethane* (TPU) sangat direkomendasikan karena terbukti memiliki biokompatibilitas tinggi dan tidak bersifat sitotoksik, sehingga mencegah risiko iritasi selama penggunaan jangka panjang [9]. Pendekatan teknis ini harus disempurnakan dengan metode seleksi material hibrida yang turut mempertimbangkan aspek psikofisik dan kualitas sentuhan permukaan (*tactile feel*) guna meningkatkan kenyamanan psikologis serta kepatuhan pasien dalam menjalani sesi terapi [10].

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.[11]

Tabel 1.1 Parameter Output Sistem

Parameter	Sensor	Kondisi Aman (Zona Hijau)	Peringatan (Zona Kuning)	Bahaya / STOP (Zona Merah)	Standar Acuan Medis
Saturasi Oksigen (SpO2)	MAX30102	95% - 100%	90% - 94%	< 90%	[12]
Tekanan Darah Sistolik (Estimasi)	Algoritma (PPG)	< 140 mmHg	140 - 179 mmHg	≥ 180 mmHg	[13]
Detak Jantung (Heart Rate)	MAX30102	60 - 100 BPM (Atau 50-70% HR Max)	101 - 120 BPM	> 120 BPM (Atau >85% HR Max)	[14]
Kekuatan Genggaman	FX1901	Target Tercapai (Sesuai Set Point)	Tremor Terdeteksi (Fluktuasi Tinggi)	Drop > 50% (Kelelahan Otot Akut)	[15]
Orientasi Tangan	BNO055	0° - 30° (Posisi Netral/Ekstensi)	> 30° (Deviasi Ringan)	Posisi Salah / Ekstrem (Flexi Berlebih)	[16]

Tabel 1.2 Solusi Yang Telah Ada

Solusi	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
--------	-----------	------------	-----------

Tensimeter Digital Lengan Atas	Merupakan standar medis (<i>Gold Standard</i>) untuk pengukuran tekanan darah non-invasif dengan akurasi dan reliabilitas tinggi.	Tidak praktis (menggunakan manset pompa), tidak dapat melakukan pengukuran secara <i>continuous</i> saat pasien bergerak/latihan, dan tidak memiliki fitur pengukuran saturasi oksigen (SpO2).	[17]
<i>Pulse Oximeter Fingertip</i>	Sangat portabel, harga terjangkau (<i>Low Cost</i>), dan penggunaan mudah (<i>User Friendly</i>) untuk memantau saturasi oksigen (SpO2) secara instan.	Hanya memiliki fungsi tunggal (SpO2 & Nadi), tidak dapat mengukur tekanan darah, dan data tidak terintegrasi dengan riwayat aktivitas fisik pasien (data terpisah).	[18]
<i>High-End Smartwatch</i>	Mampu memantau multiparameter (HR, SpO2, dan Estimasi BP) dalam satu perangkat <i>wearable</i> serta mendukung pemantauan jarak jauh.	Biaya sangat tinggi, fitur tekanan darah memerlukan kalibrasi rutin dengan tensimeter manset agar akurat, dan tidak memiliki sensor khusus untuk mengukur kekuatan gengaman (kg) fisioterapi.	[19]

Menurut analisis solusi yang telah ada, teknologi pemantauan tekanan darah pasien mandiri saat ini memiliki beberapa keterbatasan. Alat pengukur tekanan darah konvensional biasanya berbasis manset (*cuff-based*) yang tidak praktis, membuat tidak nyaman jika digunakan secara sering, dan biasanya hanya menampilkan angka hasil pengukuran tanpa sistem interpretasi yang cerdas atau peringatan dini. Belum

ada perangkat genggam murah yang dimaksudkan untuk memantau tekanan darah secara praktis sambil menilai risiko hipertensi. Karena keterbatasan ini, pasien yang telah mengalami stroke lebih sulit untuk memantau batas hemodinamik aman mereka sendiri di rumah. Hal ini juga menyulitkan mereka untuk mengidentifikasi risiko stroke sekunder, yang merupakan jenis stroke yang lebih parah.

1.1.2 Analisis Masalah dan Konstrain

1. Aspek Kesehatan

Kurangnya pengawasan tekanan darah secara mandiri adalah masalah utama bagi pasien pasca-stroke. Ini karena hipertensi adalah faktor risiko utama stroke lanjutan (stroke sekunder). Tidak melakukan pengawasan teratur kondisi hemodinamik pasien dapat menyebabkan lonjakan tekanan darah pasien tidak terdeteksi sejak awal, yang dapat menyebabkan komplikasi fatal seperti pembuluh darah pecah atau penyumbatan otak berulang.

2. Aspek Teknologi

Perangkat pengukur tekanan darah saat ini yang dapat dibeli di toko atau digunakan pasien di rumah sebagian besar tidak praktis dan hanya menampilkan angka ukur tanpa interpretasi otomatis. Tidak ada device non-invasif yang menggunakan metode komputasi untuk memproses data tekanan darah dan menentukan tingkat bahaya secara real-time. Intervensi pencegahan oleh tenaga medis atau keluarga sering kali terlambat dilakukan karena keadaan sistem ini.

3. Aspek Ekonomi

Biaya perawatan medis lebih tinggi daripada serangan stroke pertama jika hipertensi menyebabkan komplikasi atau serangan stroke berulang. Sebaliknya, mayoritas pasien kehilangan kesempatan untuk mencegah komplikasi karena kurangnya alat pengukur tekanan darah yang cerdas, portabel, dan mudah diakses.

Pada akhirnya, keadaan ini akan berdampak negatif pada kesehatan keluarga dan sistem jaminan kesehatan nasional.

4. Aspek Sosial

Keluarga pasien (*caregiver*) yang mendampingi pasien di rumah sering kali tidak memiliki pengetahuan medis yang cukup untuk menafsirkan nilai tekanan darah pasien secara mandiri. Karena tidak adanya sistem yang dapat secara otomatis mengklasifikasikan status risiko dan peringatan dini yang juga dikenal sebagai *feedback* keselamatan, pasien dan keluarga mereka rentan mengalami kecemasan yang tinggi terhadap kemungkinan stroke berulang, yang pada gilirannya menyebabkan kualitas hidup yang lebih buruk dan masalah psikologis bagi mereka yang telah pulih dari stroke.

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

1. Fungsi Integrasi & Kesehatan (ISO/SNI)
 - a. Standar Keselamatan (ISO 14971): Untuk mencegah risiko fatal dari stroke lanjutan, perancangan alat harus menyertakan fitur manajemen risiko. Misalnya, sistem peringatan dini (*Early Warning System*) akan aktif secara otomatis saat parameter tekanan darah melewati ambang batas aman.
 - b. Integrasi Sensor: Sistem harus mampu mengakuisisi data fisiologis secara simultan untuk memberikan korelasi yang valid dengan mengklasifikasikan status tingkat risiko hipertensi pasien.
2. Ekonomi (*Affordability*)
 - a. Target Biaya: Biaya Tujuan: Target Bill of Materials (BOM) adalah tidak lebih dari Rp 2.000.000 untuk biaya prototipe produksi. Dibandingkan dengan alat ukur medis impor yang mahal, pendekatan ini bertujuan agar perangkat pemantau hipertensi yang pintar dan portabel ini dapat menjadi alternatif

mandiri yang terjangkau dan layak bagi pasien pasca-stroke.

3. Konstrains Teknologi & Waktu (*Feasibility*)

- a. Konektivitas Berkelanjutan: Untuk memastikan pengiriman data klasifikasi dan riwayat (*logging*) tekanan darah ke cloud atau aplikasi mobile secara konsisten, sistem harus menggunakan protokol komunikasi hemat daya (*BLE* atau *Wi-Fi*). Ini akan menghindari penggunaan baterai yang berlebihan oleh pasien setiap hari.
- b. Batasan Waktu: Implementasi algoritma pada mikrokontroler dan pengembangan perangkat keras harus diselesaikan, diuji akurasi, dan dibuat dalam waktu < 6 bulan, yang sesuai dengan periode pengerjaan Tugas Akhir.

1.1.3 Kebutuhan yang harus dipenuhi

Perumusan kebutuhan yang jelas dan terstruktur diperlukan untuk membangun sistem yang dirancang untuk berfungsi dengan baik. Ini mencakup aspek fungsional, yaitu kemampuan dan layanan utama yang harus diberikan sistem, dan aspek non-fungsional, yaitu kualitas, standar, dan batasan kinerja sistem. Di bawah ini adalah persyaratan yang harus dipenuhi sebagai dasar pengembangan sistem secara menyeluruh:

1. Sistem mampu mengukur dan mengestimasi tekanan darah sistolik dan diastolik secara kontinu dan akurat.
2. Sistem dapat melakukan pemantauan kondisi hemodinamik kesehatan secara mandiri di rumah.
3. Sistem dapat mendeteksi dan mengklasifikasi status risiko hipertensi.
4. Sistem harus dapat menampilkan digitalisasi Logbook dan Visualisasi tren progres.
5. Sistem menggunakan mekanisme peringatan dini untuk keamanan pasien (*early warning*)

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan analisis masalah diatas maka sistem ini diharuskan untuk mampu mengawasi stabilitas tekanan darah sebagai faktor risiko utama stroke lanjutan,

guna menjembatani celah pengawasan antara fasilitas medis dan rumah, memastikan keamanan pasien selama proses pemantauan 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 yang mampu mengintegrasikan dan memantau parameter hemodinamik pasien stroke dengan gejala hipertensi secara *real-time*. Dengan mempertahankan pemantauan pada ambang batas tekanan darah yang aman bagi pasien pasca-stroke, memungkinkan pasien untuk mendapatkan pemantauan kesehatan yang berkelanjutan di rumah tanpa ketergantungan pada alat konvensional, sehingga risiko serangan stroke berulang akibat hipertensi yang tidak terkendali dapat diminimalisir melalui deteksi dini yang tepat.

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 utama untuk pengawasan fisiologis. Sensor optik *Photoplethysmography* (PPG) untuk mendeteksi gelombang volume darah guna mengestimasi parameter vital seperti detak jantung, saturasi oksigen (SpO₂), dan tren tekanan darah. Sensor ini bekerja secara *real-time* untuk memberikan gambaran lengkap antara kualitas aktivitas fisik dan respon kardiovaskuler pasien.

2. *Computation Capability*

Solusi yang ditawarkan memiliki kemampuan untuk menggunakan metode komputasi cerdas untuk mengolah data dari sensor fisiologis dengan tingkat akurasi

yang tinggi. Sistem dapat menghitung estimasi tekanan darah dan parameter penting lainnya secara akurat dan berkelanjutan melalui unit komputasi. Sistem secara bersamaan membandingkan data hasil olahan dengan parameter klinis yang telah ditetapkan. Perangkat komputasi harus sangat akurat dan efisien untuk memberikan *biofeedback* secara *real-time* dan memicu peringatan keselamatan otomatis bagi pasien jika ada perubahan pada tekanan darah pasien yang penting.

3. Output Capability

Solusi yang ditawarkan memiliki kemampuan untuk memberikan output intuitif berupa visualisasi data dan notifikasi peringatan. Output utama pada layar perangkat menampilkan data tekanan darah, *heart rate* dan status kondisi tekanan darah saat ini secara *real-time*. Selain itu, sistem dilengkapi indikator visual (*display*) atau alarm (*buzzer*) yang berfungsi sebagai peringatan dini (*Early Warning System*) apabila terdeteksi tanda-tanda kelelahan fisik atau risiko hipertensi mendadak, sehingga pasien dapat segera menghentikan aktivitas.

4. Networking Capability (ISO 80001-1)

Sistem harus dapat berkoneksi nirkabel hibrida, seperti Bluetooth Low Energy dan Wi-Fi. Sementara fitur Wi-Fi memungkinkan sinkronisasi data riwayat (*logging*) ke basis data komputasi awan (*cloud*) secara otomatis, fitur Bluetooth memungkinkan transmisi data latihan yang cepat (*low latency*) ke aplikasi ponsel pasien untuk visualisasi grafik yang mulus. Tenaga medis yang bekerja dari jarak jauh dapat melacak data hasil kondisi penting pasien dengan teknologi ini.

5. Data Logging

Sistem dapat mengatur penyimpanan data yang terstruktur. Fitur ini secara otomatis mencatat dan menyusun rekam medis digital untuk setiap sesi latihan. Rekaman ini mencakup timestamp (waktu), durasi latihan, nilai tekanan darah rata-rata, denyut nadi, dan status tekanan darah saat ini. Tren perkembangan pasien dapat dianalisis

secara objektif dengan data historis ini untuk menentukan penyesuaian dosis latihan selanjutnya.

6. Notification Capability

Sistem memiliki kemampuan manajemen notifikasi proaktif yang beroperasi secara hibrida pada perangkat fisik dan aplikasi seluler (*cross-platform*). Mekanisme ini dirancang untuk menyampaikan dua jenis informasi kritis yaitu peringatan keselamatan (*safety alerts*) dan umpan balik (*feedback*). Jika algoritma komputasi mendeteksi parameter vital melewati ambang batas aman (misalnya estimasi tekanan darah sistolik > 140 mmHg), sistem secara instan memicu notifikasi prioritas tinggi berupa alarm suara dan getaran pada alat, serta notifikasi darurat (*push notification*) ke ponsel pasien atau pendamping. Selain fungsi darurat, kapabilitas ini juga mencakup pengiriman notifikasi terjadwal untuk mengingatkan waktu latihan dan memberikan laporan pencapaian target harian guna menjaga motivasi serta konsistensi pasien dalam menjalani program rehabilitasi mandiri.

1.2.1.2 Fitur Tambahan

1. Low Energy

Solusi harus dirancang untuk memaksimalkan efisiensi daya. 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 dan aktuator terintegrasi ke dalam satu unit genggam (*handheld*). Desain *All-in-One* ini menghilangkan kebutuhan akan peralatan terpisah yang memakan tempat (seperti tensimeter meja), sehingga alat mudah digunakan di mana saja, bahkan di ruang terbatas.

3. Rekomendasi *Home Exercise*

Alat ini berfungsi sebagai asisten kesehatan pintar yang memudahkan pasien yang telah mengalami stroke untuk memantau kondisi hemodinamik mereka sendiri dan dengan bimbingan. Tekanan darah pasien dipantau secara *real-time* oleh sistem. Jika ada perubahan yang melampaui ambang batas aman, sistem akan memberikan notifikasi atau peringatan otomatis kepada pasien, sehingga mereka dapat mengambil tindakan pencegahan atau beristirahat sebelum kondisi kesehatan mereka memburuk.

4. ISO 14971 (*User Friendly*)

Kriteria ini membutuhkan desain alat yang mudah dioperasikan, terutama untuk pasien yang mengalami keterbatasan fisik setelah stroke. Konsep pengguna ramah diwujudkan oleh mekanisme pengoperasian yang mudah digunakan (Single-Action Monitoring): pasien dapat mengukur parameter tekanan darah secara langsung dengan menempelkan jari mereka pada sensor optik tanpa memasang manset konvensional atau sensor tambahan yang kompleks. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kepatuhan pasien untuk memantau tekanan darah mereka sendiri di rumah dan mengurangi risiko kesalahan penggunaan.

1.2.2 Usulan Solusi

Permasalahan mengenai sulitnya melakukan pemantauan dan 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 genggam 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:

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

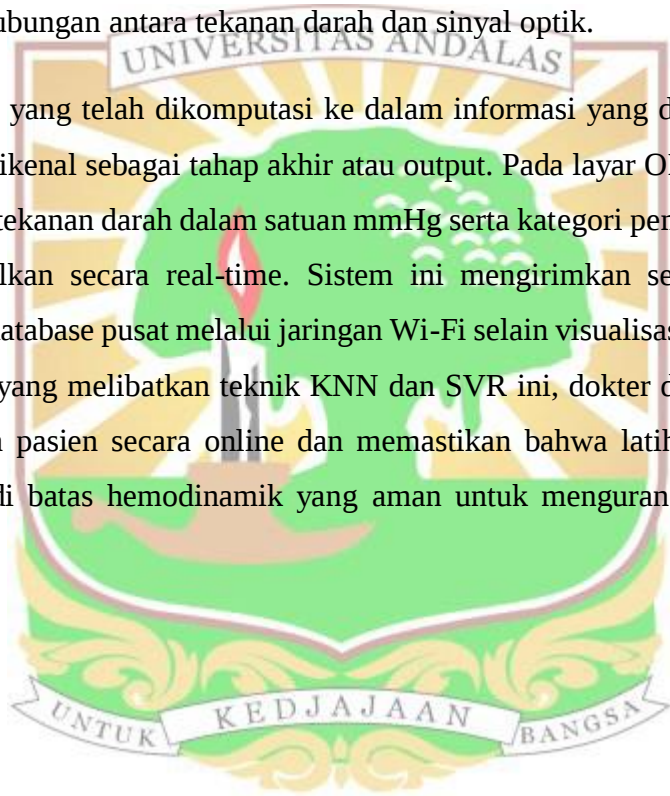
Dalam situasi ini, penggunaan KNN sangat efektif karena mampu membuat keputusan klasifikasi yang konsisten terhadap data sensor yang bersifat linier tetapi memiliki variasi antar-individu yang berbeda.

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.

$$\min \frac{1}{2} ||w||^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \quad (2)$$

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.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{aktual} - y_{prediksi})^2 \quad (3)$$

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 Latihan	
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.

