

Perancangan Lengan Prostesis untuk Penyandang Tunadaksa Menggunakan Metode *Quality Function Deployment (QFD)*

1st Dimas aria Putra Hartono

Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

diarputraa@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Ilma Mufidah

Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ilmamufidah@telkomuniversity.ac.id

3rd Agus Kusnayati

Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

guskus@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Penyandang tunadaksa dengan keterbatasan fungsi lengan sering mengalami kesulitan dalam menjalankan aktivitas sehari-hari secara mandiri. Ketergantungan pada satu lengan yang masih berfungsi menyebabkan distribusi beban kerja tubuh menjadi tidak seimbang dan berpotensi menimbulkan kelelahan otot serta gangguan muskuloskeletal. Kondisi ini menunjukkan perlunya alat bantu yang dirancang sesuai dengan kebutuhan pengguna, khususnya dari aspek kenyamanan, kemudahan penggunaan, dan keseimbangan beban kerja. Penelitian ini bertujuan merancang konsep lengan prostesis yang dapat mendukung aktivitas harian penyandang tunadaksa sekaligus mengurangi beban kerja berlebih pada lengan dominan. Metode *Quality Function Deployment (QFD)* digunakan untuk menerjemahkan kebutuhan pengguna (*Voice of Customer*) ke dalam spesifikasi teknis perancangan. Tahapan penelitian meliputi observasi aktivitas harian, wawancara, pengisian kuesioner *Nordic Body Map* untuk mengidentifikasi keluhan fisik, serta pengukuran antropometri sebagai dasar penentuan dimensi desain. Data dianalisis melalui penyusunan *House of Quality (HoQ)* untuk menentukan prioritas teknis perancangan. Hasil penelitian menghasilkan konsep lengan prostesis dengan fokus pada bobot ringan, kenyamanan, kemudahan pemasangan, serta ketahanan untuk aktivitas harian ringan.

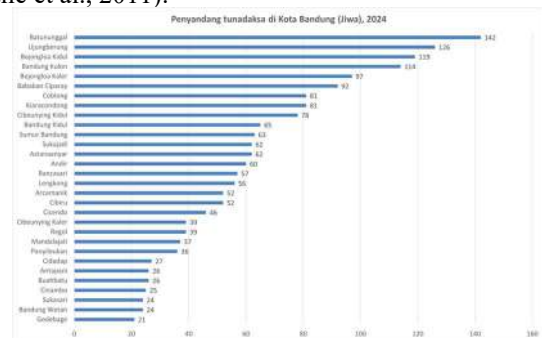
Kata kunci— *House of Quality (HoQ)*, *Lengan Prostesis*, *Quality Function Deployment (QFD)*, *Tunadaksa*

I. PENDAHULUAN

Disabilitas merupakan kondisi yang memengaruhi kemampuan individu dalam menjalankan aktivitas sehari-hari secara optimal. World Health Organization (WHO) melalui *World Report on Disability* menjelaskan bahwa disabilitas tidak hanya disebabkan oleh gangguan medis, tetapi merupakan hasil interaksi antara kondisi kesehatan individu dengan hambatan lingkungan dan sosial yang membatasi partisipasi penuh dalam masyarakat (WHO, 2011). Pandangan ini dikenal sebagai model bio-psiko-sosial, yang menempatkan disabilitas sebagai isu sistemik dan bukan semata-mata permasalahan individu. Di Indonesia, penyandang disabilitas masih menghadapi berbagai keterbatasan yang berdampak signifikan terhadap kualitas hidup dan kemandirian mereka (Abdul Halim, 2021).

Salah satu bentuk disabilitas yang berdampak besar terhadap aktivitas fungsional adalah tunadaksa, khususnya kehilangan anggota gerak bagian lengan dan kaki (Raut et al., 2020). Individu dengan kondisi ini cenderung bergantung pada satu lengan dominan untuk melakukan berbagai aktivitas, sehingga meningkatkan beban kerja pada sisi tubuh tersebut. Ketergantungan berlebih dalam jangka panjang

berpotensi menyebabkan kelelahan otot, nyeri sendi, serta gangguan muskuloskeletal, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi gerak dan kualitas hidup penyandang disabilitas (Ostlie et al., 2011).



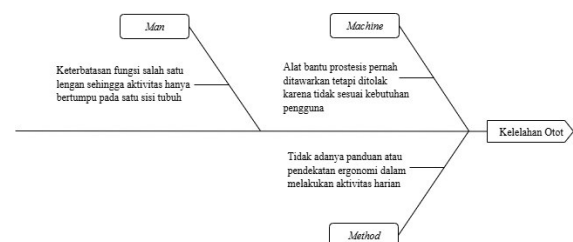
GAMBAR 1

Penyandang Tunadaksa di Kota Bandung (Jiwa), 2024

Sumber: (BPS, 2024)

Gambar 1 menyajikan distribusi jumlah penyandang disabilitas tunadaksa di Kota Bandung tahun 2024 berdasarkan kecamatan, yang bersumber dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Bandung. Data dalam satuan jiwa menunjukkan variasi sebaran tunadaksa antarwilayah. Kecamatan Batununggal mencatat jumlah tertinggi sebesar 142 jiwa, diikuti Ujungberung (126 jiwa), Bojongloa Kidul (119 jiwa), dan Bandung Kulon (114 jiwa). Sebaliknya, Kecamatan Gedebage memiliki jumlah terendah dengan 21 jiwa.

Berdasarkan distribusi pada Gambar 1, jumlah penyandang tunadaksa di Kota Bandung menunjukkan kebutuhan yang signifikan terhadap solusi pendukung aktivitas harian. Keterbatasan fungsi salah satu lengan atau kaki menyebabkan ketergantungan berlebih pada salah satu anggota badan dominan yang berpotensi menimbulkan kelelahan otot. Oleh karena itu, dilakukan analisis sebab-akibat untuk mengidentifikasi faktor-faktor utama yang memengaruhi kondisi tersebut.



GAMBAR 2

Fishbone Diagram

Identifikasi kelelahan otot pada individu tunadaksa dilakukan menggunakan *fishbone diagram* dan *Nordic Body Map (NBM)*. *Fishbone diagram* menunjukkan bahwa kelelahan otot dipengaruhi oleh keterbatasan fungsi fisik (*man*), ketidaksesuaian alat bantu prosthesis (*machine*), serta belum diterapkannya pendekatan ergonomi yang memadai dalam aktivitas harian (*method*), sehingga beban kerja terpusat pada satu sisi tubuh. Hasil *NBM* mengonfirmasi adanya keluhan *muskuloskeletal* dengan intensitas tertinggi pada lengan kiri bagian atas sebagai lengan dominan, akibat distribusi beban aktivitas yang tidak seimbang. Kondisi ini berkaitan erat dengan risiko *Musculoskeletal Disorders (MSDs)*, yang umumnya muncul akibat penggunaan anggota tubuh secara berulang dan dominan dalam jangka waktu lama serta postur kerja yang tidak ergonomis (Tarwaka et al., 2004).

Penelitian ini melibatkan satu narasumber, Ibu Yuli Andini (36 tahun), seorang ibu rumah tangga di Kota Bandung yang memiliki usaha warung dan mengalami kecacatan bawaan pada lengan kanan sehingga tidak dapat digunakan secara optimal. Kondisi tersebut menyebabkan lengan kiri digunakan secara dominan dalam hampir seluruh aktivitas, berakibat memicu keluhan berupa pegal, kebas, dan kelelahan akibat beban kerja yang tidak seimbang. Permasalahan utama terjadi karena terdapat ketimpangan distribusi beban kerja antar lengan yang berisiko menimbulkan gangguan *muskuloskeletal*, sehingga diperlukan perancangan alat bantu prosthesis berbasis prinsip ergonomi dengan metode *Quality Function Deployment (QFD)* untuk mengurangi beban lengan dominan dan meningkatkan keseimbangan gerak dalam aktivitas sehari-hari.

II. KAJIAN TEORI

A. Disabilitas

Disabilitas secara terminologis merujuk pada keterbatasan fungsi atau struktur tubuh yang berdampak pada aktivitas dan partisipasi sosial individu. World Health Organization (WHO) melalui *World Report on Disability* (2011) menjelaskan bahwa disabilitas tidak hanya disebabkan oleh kondisi medis, tetapi merupakan hasil interaksi antara individu dengan hambatan lingkungan fisik, sosial, dan sikap masyarakat. Perspektif ini ditegaskan dalam kerangka *International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)* yang mengadopsi pendekatan biopsikososial, memandang disabilitas sebagai interaksi dinamis antara kondisi kesehatan, faktor lingkungan, dan faktor personal (Chavan & Mehta, 2018).

Berdasarkan klasifikasi tersebut, disabilitas dikelompokkan menjadi fisik, sensorik, intelektual, dan mental, di mana tunadaksa termasuk dalam disabilitas fisik yang ditandai oleh keterbatasan fungsi anggota gerak sehingga memengaruhi pola aktivitas sehari-hari.

B. Musculoskeletal Disorder (MSDs)

Musculoskeletal Disorders (MSDs) merupakan gangguan pada sistem muskuloskeletal yang meliputi otot, tulang, sendi, tendon, ligamen, dan struktur pendukung lainnya, yang berperan dalam fungsi gerak tubuh. *MSDs* ditandai oleh keluhan seperti nyeri, pegal, kaku, kebas, hingga penurunan kemampuan gerak, yang dapat bersifat sementara maupun kronis tergantung pada durasi dan intensitas aktivitas. World Health Organization (WHO) menyatakan bahwa gangguan *muskuloskeletal* merupakan salah satu penyebab utama penurunan kapasitas fungsional dan kualitas hidup, terutama pada individu dengan keterbatasan fisik atau yang melakukan aktivitas berulang dalam jangka waktu lama.

Faktor risiko *MSDs* umumnya berkaitan dengan aspek ergonomi, seperti postur kerja yang tidak alami, penggunaan anggota tubuh secara dominan, beban kerja berlebih, dan gerakan repetitif. Pada individu tunadaksa, risiko *MSDs* cenderung lebih tinggi akibat ketidakseimbangan penggunaan anggota tubuh, di mana keterbatasan fungsi pada satu sisi tubuh menyebabkan penggunaan berlebihan pada sisi lainnya dan memicu *overuse syndrome* berupa kelelahan otot, nyeri sendi, serta penurunan efisiensi gerak (WHO, 2003; Ostlie et al., 2011).

C. Ergonomi

Ergonomi merupakan disiplin ilmu yang mempelajari interaksi antara manusia dan elemen lain dalam suatu sistem dengan tujuan menyesuaikan desain kerja, peralatan, dan lingkungan terhadap kemampuan serta keterbatasan manusia. Secara etimologis, ergonomi berasal dari kata *ergon* (kerja) dan *nomos* (aturan). Ergonomi juga diartikan sebagai cabang ilmu sekaligus praktik profesional yang menerapkan prinsip dan data ilmiah untuk mengoptimalkan kesejahteraan manusia serta kinerja sistem secara keseluruhan (IEA, 2023). Penerapan ergonomi bertujuan menciptakan kondisi kerja yang aman, nyaman, efisien, dan produktif melalui perancangan sistem yang berpusat pada manusia (Tarwaka et al., 2004).

D. Prosthesis

Prosthesis merupakan alat buatan yang dirancang untuk menggantikan bagian tubuh yang hilang, khususnya anggota gerak, guna memulihkan fungsi aktivitas dasar pengguna (Brack & Amalu, 2021). Dalam rehabilitasi medis, prosthesis diklasifikasikan berdasarkan bagian tubuh yang digantikan menjadi dua jenis utama, yaitu prosthesis ekstremitas atas (*upper limb prosthesis*) dan prosthesis ekstremitas bawah (*lower limb prosthesis*). Prosthesis ekstremitas atas digunakan untuk menggantikan tangan atau lengan dan berfungsi mendukung aktivitas manipulatif seperti menggenggam dan meraih, sedangkan prosthesis ekstremitas bawah digunakan untuk menggantikan bagian kaki dengan tujuan utama menunjang mobilitas, keseimbangan, dan kemampuan berjalan.

E. Quality Function Deployment (QFD)

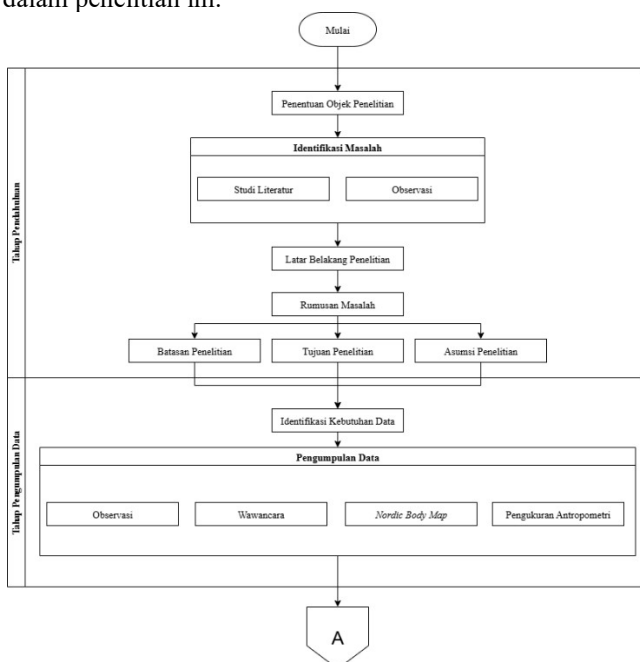
Quality Function Deployment (QFD) merupakan metode perencanaan dan pengembangan produk yang digunakan untuk menerjemahkan *voice of customer* ke dalam karakteristik teknis secara sistematis dan terstruktur, dengan tujuan memastikan kesesuaian desain terhadap kebutuhan pengguna (Akao, 2004; Cohen, 1998). Melalui *QFD*, kebutuhan pengguna ditempatkan sebagai dasar utama pengambilan keputusan desain sehingga dapat meminimalkan ketidaksesuaian antara produk yang dirancang dan ekspektasi pengguna (Akao, 2004). Alat utama dalam penerapan *QFD* adalah *House of Quality (HoQ)*, yaitu matriks yang menghubungkan kebutuhan pengguna dengan spesifikasi teknis produk meliputi *customer needs and benefits*, *planning matrix (market research and strategic planning)*, *technical response*, *relationships*, *technical correlations*, dan *technical matrix*.

F. Nordic Body Map

Nordic Body Map (NBM) merupakan metode penilaian subjektif yang digunakan untuk mengidentifikasi keluhan muskuloskeletal pada bagian tubuh tertentu akibat aktivitas fisik (Kuorinka et al., 1987). Metode ini disajikan dalam bentuk diagram tubuh manusia yang dibagi ke dalam area spesifik. Responden nantinya akan menandai lokasi dan tingkat ketidaknyamanan yang dirasakan. Hasil penilaian *NBM* memberikan gambaran distribusi keluhan berdasarkan intensitasnya sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi risiko gangguan *muskuloskeletal*. Dalam studi ergonomi, *NBM* sering dimanfaatkan sebagai dasar perancangan atau perbaikan alat dan sistem kerja guna mengurangi beban kerja berlebih dan mencegah cedera.

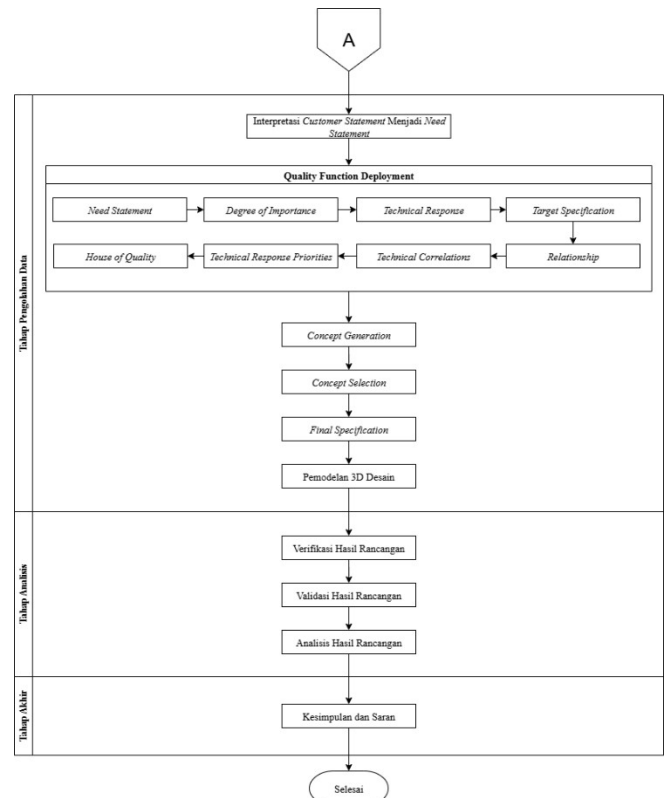
III. METODE

Rancangan penelitian dibuat untuk menjelaskan alur penyelesaian penelitian yang akan dilakukan. Berikut merupakan diagram sistematika rancangan yang digunakan dalam penelitian ini.



GAMBAR 3

Sistematika Penyelesaian Masalah



GAMBAR 4

Sistematika Penyelesaian Masalah (Lanjutan)

A. Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan merupakan tahapan pertama yang digunakan sebagai dasar penelitian. Tahap ini meliputi penentuan objek penelitian, identifikasi masalah, urgensi masalah atau latar belakang, dan rumusan masalah. Dari perumusan masalah, ditetapkanlah batasan penelitian, tujuan penelitian, dan asumsi penelitian untuk memperjelas pembahasan agar tetap terfokus pada permasalahan.

B. Tahap Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data bertujuan untuk memperoleh informasi yang relevan dan akurat sebagai dasar dalam proses perancangan. Data dikumpulkan melalui observasi aktivitas harian, wawancara dengan narasumber, pengisian kuesioner *Nordic Body Map (NBM)*, dan pengukuran antropometri untuk mengidentifikasi kebutuhan pengguna dan permasalahan ergonomi yang dialami. Data yang diperoleh digunakan sebagai input utama dalam analisis kebutuhan dan penyusunan spesifikasi teknis perancangan.

C. Tahap Pengolahan Data

Tahap pengolahan data dilakukan untuk menganalisis dan menginterpretasikan data yang telah dikumpulkan sehingga dapat digunakan secara sistematis dalam perancangan. Data hasil observasi, wawancara, *Nordic Body Map (NBM)*, dan pengukuran antropometri diolah untuk mengidentifikasi kebutuhan pengguna, tingkat kepentingan setiap kebutuhan, serta permasalahan ergonomi yang menjadi prioritas, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan *House of Quality (HoQ)* dan penentuan spesifikasi teknis desain.

D. Tahap Analisis

Tahap analisis bertujuan untuk mengevaluasi hasil rancangan lengan prostesis yang telah dikembangkan berdasarkan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian dan kebutuhan pengguna. Pada tahap ini dilakukan verifikasi dan

validasi hasil rancangan, serta analisis hasil rancangan untuk ditelaah secara menyeluruh terkait kelebihan, keterbatasan, dan potensi untuk dikembangkan lebih lanjut. Tahap ini juga digunakan untuk memastikan rancangan lengan protesis yang diusulkan sesuai dengan aspek ergonomi, fungsionalitas, dan keterbatasan pengguna.

E. Tahap Akhir

Tahap akhir penelitian berfokus pada perumusan kesimpulan dan rekomendasi berdasarkan seluruh rangkaian proses perancangan lengan protesis. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil verifikasi, validasi, dan analisis hasil rancangan. Pada tahap ini dijelaskan pula terkait keterbatasan penelitian yang nantinya dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian serupa.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai kondisi aktual, kebutuhan, serta permasalahan yang dialami oleh narasumber sebagai penyandang tunadaksa. Metode yang digunakan meliputi observasi aktivitas sehari-hari, wawancara semi-terstruktur untuk menggali keluhan dan harapan pengguna, pengisian kuesioner *Nordic Body Map (NBM)* guna mengidentifikasi keluhan *musculoskeletal*, serta pengukuran antropometri sebagai dasar penentuan dimensi rancangan lengan protesis. Pendekatan ini bertujuan memastikan bahwa data yang diperoleh merepresentasikan kebutuhan nyata pengguna secara spesifik.

Narasumber dalam penelitian ini merupakan individu tunadaksa berusia 36 tahun yang mengalami kehilangan lengan kanan hingga bagian siku. Dalam aktivitas sehari-hari, narasumber mengandalkan satu lengan yang masih berfungsi untuk melakukan berbagai kegiatan domestik dan produktif, seperti menyapu, membawa belanjaan, menyetrikan, dan mengelola usaha warung. Ketergantungan tersebut menyebabkan munculnya keluhan *musculoskeletal* berupa rasa pegal, kebas, dan kelelahan pada lengan kiri. Hasil pengisian *NBM* menunjukkan tingkat keluhan tertinggi pada lengan atas kiri, siku, dan lengan bawah kiri, dengan total skor sebesar 51 yang termasuk dalam kategori risiko sedang, sehingga diperlukan upaya perbaikan untuk mencegah peningkatan keluhan di masa mendatang.

Selain itu, dilakukan pengukuran antropometri untuk memperoleh data dimensi tubuh yang digunakan sebagai acuan perancangan protesis. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa panjang lengan kiri narasumber adalah 66 cm dengan panjang lengan atas 29 cm dan lengan bawah 40 cm, serta lingkaran lengan atas 16 cm dan lingkaran pergelangan tangan 8,25 cm. Sementara itu, pada lengan kanan diperoleh panjang lengan 35 cm dengan panjang lengan bawah 6 cm. Data antropometri ini digunakan untuk memastikan rancangan protesis bersifat proporsional, ergonomis, serta aman dan nyaman digunakan oleh narasumber.

B. Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan dilakukan untuk mengidentifikasi dan merumuskan kebutuhan pengguna berdasarkan hasil wawancara dengan narasumber. Pernyataan pengguna (*customer statement*) yang diperoleh dari wawancara kemudian diterjemahkan ke dalam *needs statement* agar dapat dinyatakan secara lebih terstruktur, terukur, dan relevan

sebagai dasar dalam proses perancangan lengan protesis sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

TABEL 1
Needs Statement

Atribut Kebutuhan	<i>Needs Statement</i>
V1	Lengan protesis memiliki bobot yang ringan saat digunakan.
V2	Lengan protesis memberikan kenyamanan saat digunakan.
V3	Lengan protesis mudah dilepas-pasang secara mandiri oleh pengguna.
V4	Lengan protesis terbuat dari material hipoalergenik dan halus saat bersentuhan dengan kulit pengguna.
V5	Lengan protesis memiliki desain dengan sirkulasi udara yang baik untuk menjaga kebersihan.
V6	Lengan protesis memiliki daya tahan tinggi untuk penggunaan jangka panjang.

C. Degree of Importance

Tahap *Degree of Importance* dilakukan untuk menentukan tingkat kepentingan masing-masing atribut kebutuhan pengguna berdasarkan hasil wawancara dengan narasumber. Penilaian ini bertujuan untuk mengetahui prioritas kebutuhan yang paling berpengaruh dalam perancangan lengan protesis, sehingga aspek yang dianggap paling penting oleh pengguna dapat lebih diutamakan pada tahap perancangan selanjutnya.

TABEL 2
Degree of Importance

Atribut Kebutuhan	<i>Needs Statement</i>	<i>Degree of Importance</i>
V1	Lengan protesis memiliki bobot yang ringan saat digunakan.	3
V2	Lengan protesis memberikan kenyamanan saat digunakan.	4
V3	Lengan protesis mudah dilepas-pasang secara mandiri oleh pengguna.	3
V4	Lengan protesis terbuat dari material hipoalergenik dan halus saat bersentuhan dengan kulit pengguna.	4
V5	Lengan protesis memiliki desain dengan sirkulasi udara yang baik untuk menjaga kebersihan.	5
V6	Lengan protesis memiliki daya tahan tinggi untuk penggunaan jangka panjang.	5

D. Technical Response

Setelah menetapkan *degree of importance*, setiap *needs statement* diterjemahkan ke dalam *technical response* sebagai parameter teknis yang menjadi acuan dalam perancangan lengan protesis. Tabel 3 menyajikan *technical response* yang digunakan dalam perancangan lengan protesis.

TABEL 3
Technical Response

Atribut kebutuhan	<i>Need Statement</i>	<i>Technical Response</i>
V1	Lengan protesis memiliki bobot yang ringan saat digunakan.	Jenis material
		Ketebalan material
		Jumlah part
V2	Lengan protesis memberikan kenyamanan saat digunakan.	Jenis material
V3	Lengan protesis mudah dilepas-pasang secara mandiri oleh pengguna.	Mekanisme pengunci
		Jumlah part
		Dimensi soket penghubung
V4		Jenis material

Atribut kebutuhan	Need Statement	Technical Response
	Lengan prosthesis terbuat dari material hipoaergenik dan halus saat bersentuhan dengan kulit pengguna.	Lapisan pelindung kulit
V5	Lengan prosthesis memiliki desain dengan sirkulasi udara yang baik untuk menjaga kebersihan.	Jumlah ventilasi
		Dimensi ventilasi
		Jenis material
V6	Lengan prosthesis memiliki daya tahan tinggi untuk penggunaan jangka panjang.	Ketebalan material
		Jenis material

E. Target Specification

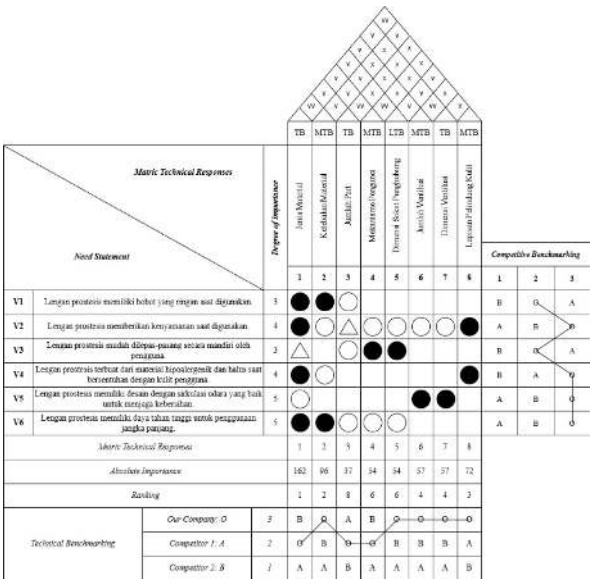
Target specification dilakukan untuk menetapkan nilai spesifikasi teknis dari setiap parameter perancangan yang telah ditentukan pada tahap *technical response*. Spesifikasi ini digunakan sebagai batasan dan acuan dalam pengembangan rancangan lengan prosthesis agar sesuai dengan kebutuhan pengguna serta mempertimbangkan aspek ergonomi, fungsi, dan keamanan penggunaan.

TABEL 4
Target Specification

No	Aspek Teknis	Nilai	Unit
1	Material kerangka utama	<i>Metal</i>	-
2	Ketebalan material	3-5	mm
3	Jumlah part	≤10	unit
4	Mekanisme Penggenggam	Non-elektrik	-
5	Dimensi soket penghubung	100-110	mm
6	Jumlah ventilasi	5-20	unit
7	Dimensi ventilasi	10-30	mm
8	Material kontak kulit	<i>Silicon</i>	-

F. House of Quality

Tahap selanjutnya adalah penyusunan *House of Quality (HoQ)* sebagai matriks utama dalam metode *Quality Function Deployment (QFD)*. *HoQ* digunakan untuk mengintegrasikan kebutuhan pengguna (*needs statement*) dengan respon teknis (*technical response*) serta menentukan prioritas teknis dalam perancangan lengan prosthesis berdasarkan tingkat kepentingan dan hubungan antar variabel. Berikut merupakan *HoQ* pada perancangan lengan prosthesis.



GAMBAR 5

House of Quality (HoQ)

G. Concept Generation

Tahap *concept generation* dilakukan untuk mengembangkan alternatif solusi desain berdasarkan hasil analisis kebutuhan dan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan sebelumnya. Proses ini diawali dengan pencarian ide secara internal dan eksternal, yang selanjutnya digunakan untuk merumuskan beberapa konsep rancangan lengan prosthesis sebagai bahan evaluasi dan pemilihan konsep terbaik. Berdasarkan hasil pencarian internal dan eksternal, diperoleh empat konsep rancangan yang digunakan sebagai alternatif dalam pengembangan desain lengan prosthesis.

TABEL 5
Konsep Rancangan

Fungsi	Konsep			
	A	B	C	D
Sistem Penggerak	 Kabel & Gerak Tubuh	 Myoelectric	 Pasif (Tanpa Penggerak)	 Kabel & Gerak Tubuh
Sistem Sambungan	 Mechanical Joints	 Quick Disconnect Joint	 Concave Connectors	 Quick Disconnect Joint
Mekanisme Penggenggam	 Hook	 Claws	 Claws	 Pneumatic
Material Kerangka Utama	 Aluminium	 Polymer Reinforced	 Polymer Reinforced	 Carbon Fiber
Desain Sirkulasi Udara	 Ventilasi Berlubang	 Slot Memanjang	 Tanpa Ventilasi	 Ventilasi Berlubang
Material Lapisan Kontak Kulit	 Silicone Liner	 Polyurethane	 Silicone Liner	 Elastomer Thermoplastic
Socket & Antarmuka Tubuh	 Belts and Straps	 Belts and Straps	 Socket Adjustable	 Socket Adjustable

Keempat konsep rancangan tersebut selanjutnya dijabarkan secara lebih rinci dalam bentuk sketsa desain dan penjelasan konsep untuk masing-masing alternatif rancangan lengan prosthesis. Berikut merupakan tabel penjelasan konsep masing-masing alternatif.

TABEL 6
Sketsa Desain Konsep

Konsep	Sketsa Desain	Penjelasan Konsep
A		Konsep A merupakan rancangan lengan prosthesis dengan mekanisme penggenggam tipe <i>hook</i> yang sederhana dan fungsional. Sistem penggerak memanfaatkan gerak tubuh pengguna melalui <i>mechanical joints</i> dan batang penghubung tanpa sistem elektronik. Kerangka utama menggunakan material aluminium untuk menjaga kekuatan dengan bobot yang ringan, sementara <i>silicone liner</i> digunakan sebagai material kontak kulit untuk meningkatkan kenyamanan. Desain dilengkapi ventilasi berlubang serta sistem <i>belts and straps</i> guna meningkatkan sirkulasi udara dan menjaga kestabilan selama penggunaan, sehingga sesuai bagi pengguna yang membutuhkan prosthesis praktis dan mudah dirawat.
B		Konsep B merupakan rancangan lengan prosthesis dengan sistem penggerak <i>myoelectric</i> yang memanfaatkan sinyal otot pengguna untuk menghasilkan gerakan yang presisi. Sistem sambungan menggunakan <i>quick disconnect joint</i> untuk memudahkan proses bongkar-

Konsep	Sketsa Desain	Penjelasan Konsep
		pasang, sedangkan mekanisme penggenggam tipe <i>claws</i> memberikan fleksibilitas dalam mencengkeram berbagai objek. Kerangka utama menggunakan material <i>polymer reinforced</i> yang ringan dan kuat, dilengkapi slot ventilasi memanjang serta material kontak kulit berupa <i>polyurethane</i> untuk meningkatkan kenyamanan. Sistem <i>belts and straps</i> digunakan untuk menjaga kestabilan dan kesesuaian protesis dengan lengan pengguna.
C		Konsep C merupakan rancangan lengan protesis dengan sistem penggerak pasif yang bergantung pada posisi dan orientasi lengan pengguna, sehingga memiliki struktur sederhana dan kebutuhan perawatan yang rendah. Sistem sambungan menggunakan <i>concave connectors</i> dengan mekanisme penggenggam tipe <i>claws</i> . Kerangka utama dibuat dari <i>polymer reinforced</i> untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan dan bobot ringan, sementara <i>silicone liner</i> digunakan sebagai material kontak kulit untuk meningkatkan kenyamanan. Desain ini tidak dilengkapi sistem ventilasi dan menerapkan <i>socket adjustable</i> agar protesis dapat disesuaikan dengan kondisi lengan pengguna secara stabil.
D		Konsep D merupakan rancangan lengan protesis dengan sistem penggerak berbasis kabel yang memanfaatkan gerak tubuh pengguna. Sistem sambungan menggunakan <i>quick disconnect joint</i> untuk memudahkan bongkar-pasang, sedangkan mekanisme penggenggam tipe <i>pneumatic</i> dirancang menghasilkan gaya genggam yang stabil. Kerangka utama menggunakan material <i>carbon fiber</i> untuk mencapai kekuatan tinggi dengan bobot ringan, dilengkapi ventilasi berlubang serta material kontak kulit berupa <i>elastomer thermoplastic</i> guna meningkatkan kenyamanan. Desain ini menerapkan <i>socket adjustable</i> agar protesis dapat disesuaikan secara presisi dan digunakan secara stabil.

H. Concept Selection

Tahap *concept selection* dilakukan untuk menentukan konsep rancangan lengan protesis yang paling sesuai berdasarkan kriteria pemilihan yang diturunkan dari kebutuhan pengguna (*needs statement*). Setiap atribut kebutuhan dievaluasi menggunakan kriteria seleksi yang relevan guna memastikan konsep terpilih memenuhi aspek fungsional dan kenyamanan pengguna.

TABEL 7
Kriteria Seleksi

Atribut kebutuhan	Needs Statement	Selection Criteria
V1	Lengan protesis memiliki bobot yang ringan saat digunakan.	Ergonomi
V2	Lengan protesis memberikan kenyamanan saat digunakan.	Kenyamanan
V4	Lengan protesis terbuat dari material hipoalergenik dan halus saat bersentuhan dengan kulit pengguna.	
V5	Lengan protesis memiliki desain dengan sirkulasi udara yang baik untuk menjaga kebersihan.	

Atribut kebutuhan	Needs Statement	Selection Criteria
V6	Lengan protesis memiliki daya tahan tinggi untuk penggunaan jangka panjang.	Daya tahan
V3	Lengan protesis mudah dilepas-pasang secara mandiri oleh pengguna.	Kemudahan penggunaan

Selanjutnya, matriks seleksi digunakan untuk membandingkan keempat konsep berdasarkan kriteria pemilihan yang telah ditetapkan.

TABEL 8
Concept Screening

Selection Criteria	Concepts				Reference
	A	B	C	D	
Kemudahan Penggunaan	0	-	+	0	0
Daya Tahan	+	0	0	+	0
Ergonomi	+	+	+	+	0
Kenyamanan Pengguna	+	+	-	0	0
Sum '+'	3	2	2	2	
Sum '0'	1	1	1	2	
Sum '-'	0	1	1	0	
Net Score	3	1	1	2	
Rank	1	3	4	2	
Continue?	Yes	Combine	Combine	Yes	

Berdasarkan hasil *concept screening* pada Tabel 8, dapat diketahui perbandingan kinerja masing-masing konsep terhadap lengan protesis referensi dengan menggunakan simbol penilaian positif (+), negatif (-), dan netral (0). Dari hasil perhitungan *net score*, konsep dengan nilai terbaik dipilih untuk dilanjutkan ke tahap evaluasi berikutnya. Konsep yang terpilih pada tahap ini adalah Konsep A, Konsep D, serta kombinasi Konsep B dan Konsep C. Tahap selanjutnya adalah perhitungan skor menggunakan metode *concept scoring* untuk menilai kinerja relatif dari setiap konsep terpilih secara lebih rinci.

TABEL 9
Relative Performance

Relative Performance	Rating
Much Worse than reference	1
Worse than reference	2
Same as reference	3
Better than reference	4
Much Better than reference	5

Tabel 9 merupakan *relative performance* yang menjelaskan hubungan antara tingkat performa konsep terhadap produk referensi dengan nilai rating yang diberikan. Berdasarkan skala tersebut, dilakukan penilaian *concept scoring* yang ditunjukkan pada tabel penilaian konsep. Pada Tabel 10, setiap rating dikalikan dengan bobot (*weight*) masing-masing kriteria untuk memperoleh *weighted score* dan *total score* sebagai dasar penentuan konsep terpilih.

TABEL 10
Penilaian Konsep

Selection Criteria	Weight	Konsep					
		A		B&C		D	
		Rating	Weighted Score	Rating	Weighted Score	Rating	Weighted Score
Kenyamanan	54%	5	2.7	4	2.16	3	1.62
Daya Tahan	20%	5	1	3	0.6	5	1
Ergonomi	13%	4	0.52	5	0.65	5	0.65
Kemudahan Penggunaan	13%	4	0.52	4	0.52	4	0.52
Total Score		4.74		3.93		3.79	
Rank		1		2		3	
Continue?		Yes		No		No	

Berdasarkan hasil pemilihan konsep pada Tabel 10, Konsep A memperoleh *total score* tertinggi sebesar 4,74 sehingga menunjukkan kinerja terbaik terhadap kriteria kenyamanan, daya tahan, ergonomi, dan kemudahan penggunaan. Oleh karena itu, Konsep A dipilih untuk

dikembangkan sebagai usulan perancangan lengan protesis, sementara konsep lainnya tidak dilanjutkan karena memiliki nilai evaluasi yang lebih rendah.

I. Hasil Rancangan

Berdasarkan hasil pemilihan konsep pada Tabel 10, Konsep A ditetapkan sebagai konsep terpilih yang selanjutnya dikembangkan menjadi rancangan akhir lengan protesis. Tabel 11 menunjukkan spesifikasi akhir (*final specification*) yang dihasilkan dari penerjemahan *technical response* ke dalam parameter desain yang terukur.

TABEL 11

Final Specification

No	Technical Response	Final Specification
1	Jenis material	Aluminium 6061
2	Ketebalan material	3 mm
3	Jumlah part	6 part
4	Mekanisme penggenggam	Hook
5	Dimensi soket penghubung	105 mm
6	Jumlah ventilasi	10 unit
7	Dimensi ventilasi	1 mm
8	Lapisan pelindung kulit	Silicone Liner

Spesifikasi akhir yang telah ditetapkan selanjutnya dijabarkan ke dalam komponen penyusun rancangan lengan protesis, meliputi nama *part*, material yang digunakan, serta fungsi masing-masing komponen.

TABEL 12

Part Hasil Rancangan

No	Nama Part	Material	Gambar	Penjelasan
1	Body Harness	Nylon		<i>Body harness</i> berfungsi sebagai penyangga utama yang mengikat protesis ke tubuh pengguna. Komponen ini membantu mendistribusikan beban protesis secara merata ke bagian tubuh sehingga meningkatkan stabilitas dan kenyamanan saat digunakan. Material <i>nylon</i> dipilih karena kuat, ringan, fleksibel, dan tahan terhadap gesekan serta keringat.
2	Shoulder Harness	Nylon		<i>Shoulder harness</i> ditempatkan pada area bahu untuk menopang protesis dan membantu transmisi gerakan tubuh. Bantalan <i>foam</i> digunakan untuk mengurangi tekanan pada bahu dan mencegah ketidaknyamanan saat pemakaian dalam waktu lama. Adapun material <i>nylon</i> digunakan untuk memastikan kekuatan dan daya tahan.

No	Nama Part	Material	Gambar	Penjelasan
3	Arm Harness	Nylon		<i>Arm harness</i> berfungsi sebagai pengikat tambahan pada lengan pengguna untuk menjaga posisi protesis tetap stabil selama aktivitas. Sifat material yang elastis membantu menyesuaikan dengan pergerakan lengan tanpa mengurangi kenyamanan dan memudahkan dalam pemasangan/pelepasan protesis.
4	Upper Arm	Aluminium 6061		<i>Upper arm</i> berfungsi sebagai penopang yang menghubungkan <i>harness</i> dengan bagian utama protesis. <i>Aluminium 6061</i> dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang baik, tahan korosi, dan cukup ringan, sehingga tidak membebani pengguna. Selain itu, material ini mudah dibentuk dan diberi ventilasi untuk meningkatkan kenyamanan saat digunakan dalam jangka waktu lama.
5	Main Body	Aluminium 6061		<i>Main body</i> merupakan bagian inti protesis yang menyalurkan gaya dari sistem penggerak menuju mekanisme penggenggam. Penggunaan <i>Aluminium 6061</i> memberikan kekuatan struktural yang memadai dengan bobot yang relatif ringan.
6	Hook	Aluminium 6061		<i>Hook</i> berfungsi sebagai mekanisme penggenggam utama untuk mengait dan memegang objek. <i>Aluminium 6061</i> dipilih karena cukup kuat untuk menahan beban fungsional, tidak mudah korosif, dan aman digunakan terhadap lingkungan sekitar.

Berdasarkan komponen dan spesifikasi yang telah ditetapkan, diperoleh rancangan akhir lengan protesis yang menggambarkan integrasi seluruh bagian secara fungsional dan ergonomis. Gambar 6 menunjukkan visualisasi keseluruhan hasil rancangan akhir lengan protesis.



GAMBAR 6
Hasil Rancangan

Prinsip kerja lengan protesis ini memanfaatkan gerakan tubuh pengguna pada area bahu dan lengan atas yang diteruskan ke mekanisme penggenggam tipe *hook*. Kerangka utama berbahan aluminium 6061 berfungsi menopang beban dan menjaga kestabilan struktur, sementara sistem pengikat memastikan protesis tetap stabil dan nyaman digunakan tanpa memerlukan sumber energi tambahan.

J. Analisis Tegangan Alat

Analisis tegangan pada rancangan lengan protesis dilakukan menggunakan simulasi *von Mises stress* dengan perangkat lunak *Autodesk Inventor*. Analisis ini digunakan untuk mengevaluasi besarnya tegangan gabungan yang terjadi akibat pembebanan dan menilai tingkat keamanan desain terhadap risiko deformasi permanen (Budynas & Nisbett, 2015). Tabel 13 menyajikan spesifikasi material aluminium 6061-AHC yang digunakan pada komponen utama lengan protesis, yaitu *main body*, *upper arm*, dan *hook*, sebagai dasar analisis tegangan.

TABEL 13
Spesifikasi Rancangan Alat (1)

Name	Aluminum 6061-AHC	
General	Mass Density	2,7 g/cm ³
	Yield Strength	275 MPa
	Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Stress	Young's Modulus	68,9 GPa
	Poisson's Ratio	
	Shear Modulus	25,9023 GPa
Part Name(s)	Main Body Upper Arm Hook	

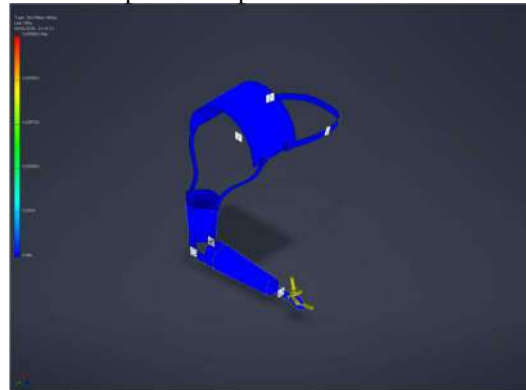
Selanjutnya, Tabel 14 menampilkan spesifikasi material *rubber* dan *silicone* yang digunakan pada komponen *shoulder*, *arm*, dan *body harness* sebagai bagian dari sistem pendukung dan kenyamanan pengguna.

TABEL 14
Spesifikasi Rancangan Alat (2)

Name	Rubber, Silicone	
General	Mass Density	1,25 g/cm ³
	Yield Strength	10,34 MPa
	Ultimate Tensile Strength	10,34 MPa
Stress	Young's Modulus	0,003 GPa
	Poisson's Ratio	0,49 ul
	Shear Modulus	0,00100671 GPa
Part Name(s)	Shoulder Harness Arm Harness Body Harness	

Berdasarkan spesifikasi material aluminium 6061-AHC yang digunakan pada komponen utama lengan protesis (*main body*, *upper arm*, dan *hook*) serta material *rubber* dan *silicone* pada komponen pendukung (*shoulder harness*, *arm harness*, dan *body harness*), selanjutnya dilakukan analisis tegangan

menggunakan simulasi *von Mises stress*. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada seluruh komponen akibat pembebanan selama penggunaan, serta mengevaluasi kemampuan material dalam menahan tegangan tanpa mengalami deformasi permanen. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 7.

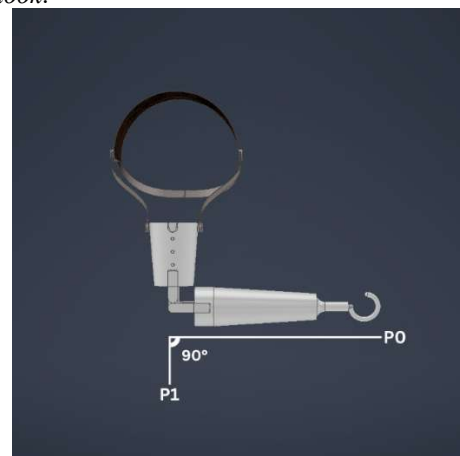


GAMBAR 7
Simulasi Analisis Beban

Berdasarkan Gambar 7, beban simulasi diasumsikan sebesar 10 kg atau setara dengan gaya 100 N yang merepresentasikan kondisi pembebanan maksimum yang realistis pada aktivitas angkat satu tangan. Hasil simulasi menunjukkan tegangan *von Mises* maksimum sebesar 0,0095 MPa, yang jauh lebih rendah dibandingkan batas luluh Aluminium 6061-AHC sebesar 275 MPa, sehingga rancangan lengan protesis dinyatakan aman secara struktural.

K. Analisis Sistem Gerak

Analisis sistem gerak dilakukan untuk mengetahui mekanisme pergerakan lengan protesis berdasarkan pemanfaatan gerakan tubuh pengguna. Pada rancangan ini, gerakan bahu dan lengan atas diteruskan melalui sistem sambungan mekanis sehingga menghasilkan pergerakan pada bagian *hook*.



GAMBAR 8
Analisis Sistem Gerak

Berdasarkan hasil simulasi gerak, mekanisme lengan protesis dirancang menggunakan satu titik putar utama yang memungkinkan perubahan orientasi alat dari posisi awal (P0) ke posisi akhir (P1). Pada posisi P0, sistem berada pada kondisi horizontal dan siap digunakan, sedangkan pada posisi P1 mekanisme berputar hingga membentuk sudut 90°. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perpindahan gerak berlangsung

dengan lancar tanpa adanya benturan antar komponen, hal ini menunjukkan bahwa penempatan engsel dan dimensi komponen tepat. Sudut rotasi 90° ini memberikan fleksibilitas dalam penyesuaian posisi alat, sehingga sistem mekanisme mampu memenuhi kebutuhan pergerakan secara stabil dan mendukung kenyamanan penggunaan.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa perancangan lengan protesis yang mempertimbangkan aspek ergonomi dan kebutuhan pengguna mampu membantu mengurangi beban kerja berlebih pada lengan dominan penyandang tunadaksa dalam aktivitas sehari-hari. Penerapan metode *Quality Function Deployment (QFD)* memungkinkan kebutuhan pengguna diterjemahkan secara sistematis ke dalam spesifikasi teknis, sehingga rancangan yang dihasilkan lebih tepat guna, nyaman, dan mudah digunakan.

Perancangan lengan protesis *non*-elektrik dengan mekanisme penggenggam tipe *hook* dan sistem *harness* terbukti mampu berfungsi sebagai alat bantu pendukung aktivitas sehari-hari. Konsep lengan protesis yang diusulkan menitikberatkan pada bobot ringan, mekanisme sederhana, kemudahan pemasangan, serta distribusi beban kerja yang lebih seimbang. Dengan karakteristik tersebut, rancangan ini berpotensi meningkatkan efisiensi aktivitas harian sekaligus menurunkan risiko kelelahan otot pada lengan dominan.

REFERENSI

- [1] A. Halim, "Persamaan Hak Bagi Penyandang Disabilitas untuk Mendapatkan Pekerjaan Ditinjau dari Undang-Undang Nomor 8 Tahun 2016 Tentang Penyandang Disabilitas," 2021.
- [2] Akao, *Quality Function Deployment*, 2004.
- [3] BPS, "Statistik Penyandang Disabilitas di Kota Bandung," 2024. [Online]. Available: <https://bandungkota.bps.go.id/id/statistics-table/2/Mjc1NyMy/statistikpenyandang-disabilitas-di-kota-bandung.html>
- [4] R. Brack and E. H. Amalu, "A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb prosthesis for improved user suitability," *Journal of Orthopaedics*, vol. 23, pp. 88–96, 2021, doi: 10.1016/J.JOR.2020.12.009.
- [5] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 10th ed. 2015.
- [6] B. Chavan and S. Mehta, "Classificatory systems and disability," *Indian Journal of Social Psychiatry*, vol. 34, no. 5, p. 86, 2018, doi: 10.4103/ijsp.ijsp_33_18.
- [7] L. Cohen, *Quality function deployment: how to make QFD work for you*. Addison-Wesley, 1998.
- [8] IEA, "What Is Ergonomics (HFE)?," 2023. [Online]. Available: <https://iea.cc/about/what-isergonomics/>.
- [9] I. Kuorinka et al., "Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms," *Applied Ergonomics*, vol. 18, no. 3, 1987, doi: 10.1016/0003-6870(87)90010-X.
- [10] K. Østlie, R. J. Franklin, O. H. Skjeldal, A. Skrandal, and P. Magnus, "Musculoskeletal pain and overuse syndromes in adult acquired major upperlimb amputees," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 92, no. 12, 2011, doi: 10.1016/j.apmr.2011.06.026.
- [11] R. U. Raut, S. S. Thakre, and S. B. Thakre, "The impact of physical disability on activities of daily living of physically disabled persons attending tertiary care centre of Nagpur using Barthel's scale: a cross-sectional study," *International Journal Of Community Medicine And Public Health*, vol. 7, no. 4, p. 1571, 2020, doi: 10.18203/2394-6040.ijcmph20201476.
- [12] Tarwaka, L. Sudiadjeng, and S. H. A. Bakri, *Ergonomi Untuk Keselamatan, Kesehatan Kerja dan Produktivitas*, vol. 323, 2004.
- [13] WHO, *The Burden Of Musculoskeletal Conditions At The Start Of The New Millenium*, 2003.
- [14] WHO, *World Report on Disability 2011*, World Health Organization, 2011.