BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

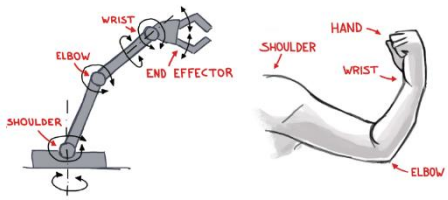
Proyek ini menggunakan robot arm dengan enam sumbu gerak untuk mobilitas tinggi di ruang tiga dimensi. Bab ini membahas landasan teori sebagai dasar perancangan sistem mekanik robot arm 6-DOF.

2.1 Konsep Dasar Robot Arm 6-DOF

Robot arm sering disebut sebagai *manipulator*, karena kemampuannya memanipulasi objek atau alat kerja melalui gerakan terprogram. Dalam dunia otomasi industri, robot arm merupakan salah satu elemen paling penting karena dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keselamatan kerja. Untuk memahami konsep robot arm 6-DOF secara menyeluruh, beberapa aspek utama dijelaskan sebagai berikut.

2.1.1 Struktur Umum Robot Arm

Struktur umum robot arm pada dasarnya menyerupai anatomi lengan manusia, yang terdiri atas bagian-bagian utama seperti bahu, siku, pergelangan, dan dihubungkan oleh sendi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Pada robot, bagian-bagian ini disebut sebagai *link* (lengan) dan *joint* (sambungan). *Link* berfungsi sebagai elemen kaku yang menghubungkan sambungan, sedangkan *joint* memungkinkan terjadinya gerakan antar-*link*.



Gambar 2.1 *Link* dan *joint*

Sumber: community.robotshop.com (2024)

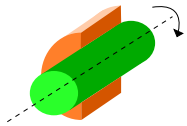
Robot arm biasanya terdiri dari rangkaian *link* dan *joint* yang disusun secara serial, artinya satu sambungan langsung terhubung ke sambungan berikutnya melalui *link*. Struktur robot juga harus mempertimbangkan penempatan aktuator. Desain yang baik akan memungkinkan sistem bekerja optimal tanpa interferensi antar-bagian.

Bagian utama dalam struktur robot arm antara lain. *Base* (Dasar) merupakan titik tumpu utama dari robot. Umumnya ditempatkan tetap pada lantai atau meja kerja, dan berisi *joint* pertama yang memutar seluruh sistem ke arah kiri atau kanan. *Shoulder* (Bahu) merupakan bagian pertama dari lengan yang terhubung ke *base* dan bertugas mengangkat atau menurunkan lengan utama. *Elbow* (Siku) merupakan bagian tengah dari lengan yang memungkinkan perpanjangan atau pelipatan, memperluas jangkauan gerak robot. *Wrist* (Pergelangan) merupakan bagian yang terletak di ujung lengan dan terdiri dari beberapa *joint* yang mengatur orientasi *end-effector*. *End-effector* merupakan komponen paling ujung dari robot yang berinteraksi langsung dengan objek. Contohnya adalah penjepit, alat las, atau obeng otomatis.

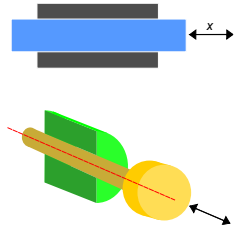
2.1.2 Derajat Kebebasan (*Degrees of Freedom*)

Degrees of Freedom (DOF) adalah jumlah sumbu gerak independen yang dimiliki oleh suatu sistem mekanik. Pada robot arm, satu DOF mengacu pada satu jenis gerakan, baik gerakan rotasi (berputar) atau translasi (bergerak lurus). Semakin banyak DOF, semakin kompleks dan fleksibel gerakan yang dapat dilakukan robot. Enam

DOF merupakan standar minimum untuk mencapai kebebasan gerak penuh dalam posisi dan orientasi tiga dimensi. Dalam robot arm, setiap sambungan (*joint*) umumnya menyumbangkan satu DOF. Sebagai contoh:



Gambar 2.2 *Revolute joint*
Sumber: wikipedia.org (2025)



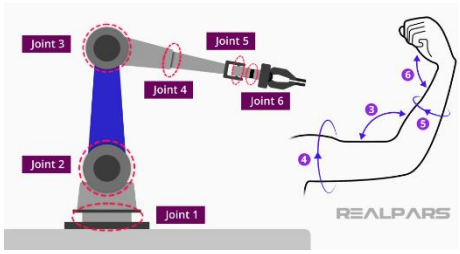
Gambar 2.3 *Prismatic joint*
Sumber: wikipedia.org (2023)

Revolute joint yang ditunjukkan pada gambar 2.2 memungkinkan gerakan rotasi terhadap satu sumbu yang akan terhitung satu DOF rotasi. Sedangkan *prismatic joint* yang ditunjukkan pada gambar 2.3 memungkinkan gerakan translasi sepanjang satu sumbu yang akan terhitung satu DOF translasi.

Jumlah total DOF suatu robot adalah hasil penjumlahan dari semua DOF sambungan yang dimilikinya. Sebagai contoh, robot dengan dua sambungan *revolute* dan dua sambungan *prismatic* akan memiliki 4 DOF. Fungsi eksternal robot seperti membuka atau menutup *gripper* (alat penjepit), tidak mengubah posisi maupun orientasi *end-effector* maka tidak dihitung sebagai DOF.

2.1.3 Konfigurasi 6-DOF dalam Robot Arm

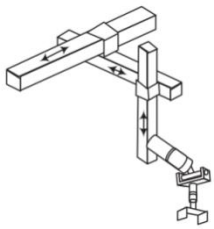
Konfigurasi 6-DOF dalam robot arm merujuk pada susunan sambungan dan lengan yang memberikan enam derajat kebebasan, yang secara umum terdiri dari tiga gerakan translasi (untuk menentukan posisi) dan tiga gerakan rotasi (untuk mengatur orientasi). Kombinasi ini memungkinkan robot arm menjangkau posisi mana pun di dalam ruang kerja serta mengarahkan *end-effector* ke orientasi yang diinginkan.



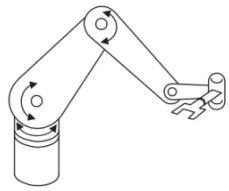
Gambar 2.4 Konfigurasi 6-DOF
Sumber: youtube.com/@realpars (2021)

Dalam praktiknya, konfigurasi 6-DOF umumnya menggunakan enam sambungan *revolute* (putar) yang tersusun secara serial (Yu & Li, 2016). Hal ini dikarenakan sambungan *revolute* memungkinkan pergerakan lebih fleksibel dalam ruang terbatas dibanding sambungan *prismatic*.

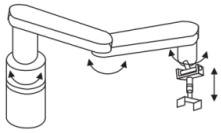
Konfigurasi 6-DOF dapat dibagi menjadi dua bagian utama. Dua bagian tersebut yaitu lengan (*arm*) yang terdiri dari tiga *joint* yang menentukan posisi *end-effector* dalam ruang dan pergelangan (*wrist*) yang terdiri dari tiga *joint* terakhir yang mengatur orientasi *end-effector*. Beberapa konfigurasi 6-DOF populer dalam industri ditunjukkan pada gambar 2.5 sampai dengan gambar 2.9 sebagai berikut.



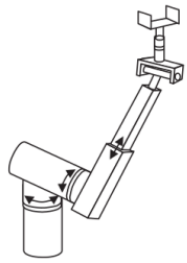
Gambar 2.5 Konfigurasi *cartesian*
Sumber: University of Missouri (2020)



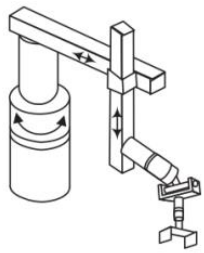
Gambar 2.6 Konfigurasi *articulated*
Sumber: University of Missouri (2020)



Gambar 2.7 Konfigurasi *SCARA*
Sumber: University of Missouri (2020)



Gambar 2.8 Konfigurasi *spherical*
Sumber: University of Missouri (2020)



Gambar 2.9 Konfigurasi *cylindrical*
Sumber: University of Missouri (2020)

Konfigurasi *Cartesian* (*cartesian coordinate configuration*) sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan gerakan linear presisi tinggi, seperti CNC, printer 3D, dan *pick-and-place*. Konfigurasi *Articulated* (*anthropomorphic configuration*) mirip lengan manusia, cocok untuk jangkauan luas dan fleksibilitas tinggi. Konfigurasi SCARA (*Selective Compliance Articulated Robot Arm*) memiliki 4 DOF tetapi dapat ditingkatkan, cocok untuk perakitan horizontal. Konfigurasi *Spherical* (*polar configuration*) *joint* pertama rotasi, kedua dan ketiga berbentuk engsel melengkung, cocok untuk ruang kerja berbentuk bola. Konfigurasi *Cylindrical* menggunakan kombinasi rotasi dan translasi pada sumbu vertikal dan horizontal, meskipun tidak semua mencapai 6 DOF.

Desain konfigurasi 6-DOF juga mempertimbangkan faktor redundansi dan singularitas. Redundansi terjadi jika jumlah DOF melebihi enam, memungkinkan robot memilih banyak jalur untuk mencapai posisi yang sama, berguna untuk menghindari rintangan. Singularitas adalah kondisi di mana robot kehilangan satu atau lebih derajat kebebasan secara efektif karena posisi tertentu, sehingga harus dihindari dalam perencanaan lintasan.

2.1.4 *End effector*

End-effector adalah komponen yang terpasang pada ujung robot arm dan

berfungsi sebagai alat utama untuk melakukan interaksi langsung dengan objek atau lingkungan kerja. Jenis dan bentuk *end-effector* sangat bervariasi tergantung pada aplikasi yang diinginkan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Contoh *end-effector*
Sumber: ATI Industrial Automation (2025)

Beberapa jenis *end-effector* yang umum digunakan antara lain *welding torch* (pengelasan), *gripper*, dan *tool changer*. *End-effector* merupakan salah satu *payload* yang dipertimbangkan dalam merancang dan mengoperasikan robot arm.

2.1.5 Ruang Kerja (*Workspace*)

Ruang kerja atau *workspace* adalah volume tiga dimensi yang dapat dijangkau oleh ujung robot arm (*end-effector*) selama bergerak dalam batas fisik dan mekanik yang dimilikinya. Ruang kerja merupakan parameter penting dalam desain dan evaluasi performa robot karena menentukan batas wilayah operasi robot tersebut. Secara umum, *workspace* ditentukan oleh beberapa faktor utama yaitu, jumlah dan jenis sambungan (*joint*), panjang masing-masing *link*, rentang gerak (*range of motion*) setiap *joint*, dan bentuk konfigurasi robot. Misalnya, robot dengan konfigurasi kartesian memiliki *workspace* berbentuk balok, sementara robot dengan konfigurasi antropomorfik memiliki *workspace* berbentuk bola atau torus.

Analisis *workspace* biasanya dilakukan secara grafis atau menggunakan simulasi perangkat lunak CAD. Proses ini membantu memverifikasi apakah desain robot mampu menjangkau titik-titik kerja yang diinginkan dalam aplikasi tertentu, misalnya

titik-titik pengelasan pada benda kerja. Jenis-jenis *workspace* antara lain:

Reachable Workspace

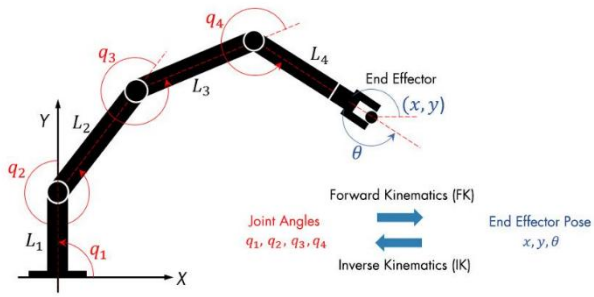
Merupakan keseluruhan area yang dapat dicapai oleh *end-effector*, tanpa mempertimbangkan orientasi tertentu. Ini adalah batas fisik terluar dari kemampuan jangkauan robot. Sedangkan *workspace linear* atau *reach* mengacu pada jarak maksimum secara garis lurus yang dapat dicapai *end-effector* dari titik basis robot.

Dexterous Workspace

Merupakan area di mana *end-effector* tidak hanya dapat mencapai suatu posisi, tetapi juga dapat mengatur orientasinya ke segala arah. Biasanya lebih kecil dari *reachable workspace* karena keterbatasan pergerakan pergelangan.

2.2 Kinematika

Kinematika adalah cabang mekanika yang mempelajari gerakan suatu sistem tanpa mempertimbangkan gaya atau massa yang menyebabkannya. Dalam konteks robotika, kinematika digunakan untuk memahami hubungan antara gerakan sambungan (*joint*) dan posisi serta orientasi ujung robot (*end-effector*) di ruang kerja.



Gambar 2.11 Kinematika

Sumber: mathworks.com (2025)

Dalam perancangan dan pengoperasian robot, terdapat dua jenis utama analisis

kinematika yang harus dipahami, yaitu kinematika maju (*forward kinematics*) dan kinematika terbalik (*inverse kinematics*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11.

2.2.1 Kinematika Maju (*Forward kinematics*)

Kinematika maju adalah proses menentukan posisi dan orientasi *end-effector* berdasarkan nilai sudut atau pergeseran masing-masing *joint*. Jika semua nilai *input* dari *joint* diketahui, maka dapat dihitung di mana posisi ujung lengan robot berada di ruang kerja.

Analisis ini dilakukan dengan menggunakan transformasi koordinat dari satu *joint* ke *joint* berikutnya, hingga ke *end-effector*. Pendekatan yang umum digunakan adalah metode Denavit-Hartenberg (D-H) Parameter, yang menyederhanakan transformasi koordinat dengan menggunakan empat parameter per *joint* yaitu: panjang *link* (a), sudut *twist* (α), jarak *offset* (d), sudut *joint* (θ).

Melalui model D-H, hubungan matematis antara *joint* dan posisi *end-effector* dapat dibentuk dalam bentuk matriks transformasi homogen, yang kemudian dikalikan secara berurutan dari *base* ke *end-effector*. Kinematika maju sangat penting untuk menentukan lokasi kerja robot saat menerima perintah posisi *joint* dan menyimulasikan pergerakan robot di perangkat lunak.

2.2.2 Kinematika Terbalik (*Inverse kinematics*)

Kebalikan dari kinematika maju, kinematika terbalik adalah proses menentukan nilai masing-masing *joint* yang dibutuhkan agar *end-effector* berada di posisi dan orientasi tertentu. Kinematika terbalik penting dalam sistem kendali karena sebagian besar aplikasi robotika berbasis pada titik-titik koordinat dalam ruang, bukan pada

sudut *joint*. Dengan kinematika terbalik, sistem kontrol dapat menerjemahkan posisi target ke nilai gerakan aktual. Dalam banyak kasus, perhitungan ini jauh lebih kompleks karena satu posisi bisa memiliki lebih dari satu solusi, tidak semua posisi dapat dicapai, dapat terjadi redundansi dan singularitas.(Asif & Webb, 2021)

Terdapat dua metode dalam proses kinematika terbalik, yaitu metode analitik dan numerik. Metode analitik menggunakan rumus tertutup dan trigonometri untuk menghitung nilai *joint*. Cocok untuk konfigurasi robot sederhana. Sedangkan metode numerik menggunakan pendekatan iterasi seperti metode Jacobian atau algoritma optimasi, cocok untuk sistem kompleks.(Anschober et al., 2023)

2.3 Material Mekanik

Material yang tepat dapat meningkatkan performa mekanik, efisiensi energi, dan daya tahan dari robot arm itu sendiri (Bugday & Karali, 2019). Dalam konteks proyek ini, pemilihan material didasarkan pada kriteria-kriteria berikut:

Kekuatan dan Kekakuan (*Strength and Stiffness*)

Material harus memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban statis maupun dinamis yang dihasilkan oleh berat sendiri, gaya dari aktuator, serta beban kerja. Selain itu, kekakuan juga penting agar struktur tidak mengalami deformasi yang signifikan saat bergerak, sehingga presisi tetap terjaga.

Berat Jenis Rendah (*Lightweight*)

Karena robot arm akan digerakkan oleh aktuator tertentu dengan daya terbatas, material dengan densitas rendah menjadi pilihan utama. Penggunaan material ringan membantu mengurangi inersia sistem, mempercepat respons gerakan, serta

menurunkan kebutuhan torsi aktuator.

Kemudahan Pengerjaan (*Manufacturability*)

Material yang mudah dipotong, dibor, dibentuk, atau disambung akan mempercepat proses produksi dan menurunkan tingkat kesalahan saat perakitan. Untuk proyek skala pendidikan atau laboratorium seperti ini, kemudahan dalam proses permesinan dan perakitan menjadi pertimbangan penting.

Ketersediaan dan Biaya (*Availability and Cost*)

Material yang dipilih harus mudah diperoleh di pasaran lokal, serta memiliki harga yang sesuai dengan anggaran proyek. Keterbatasan dana dan akses logistik di lingkungan kampus menjadi faktor pembatas yang harus diperhatikan.

Tahan Korosi dan Stabilitas Dimensi

Dalam beberapa kondisi, struktur robot dapat terpapar kelembaban atau variasi suhu lingkungan. Oleh karena itu, material yang tahan korosi dan tidak mengalami perubahan bentuk karena suhu atau kelembaban lebih diutamakan agar struktur tetap stabil dalam jangka panjang.

Dalam proyek ini, terdapat tiga jenis material yang masuk dalam kriteria-kriteria yang telah disebutkan, masing-masing dipilih berdasarkan fungsi, keunggulan teknis, dan kemudahan proses produksi. Ketiga material tersebut adalah:

2.3.1 Aluminium

Aluminium dipilih sebagai material utama struktur karena memiliki kombinasi kekuatan dan bobot ringan yang sangat ideal untuk aplikasi robotika. Aluminium

memiliki densitas rendah (~2.7 g/cm³) yang mana cocok untuk mengurangi beban kerja aktuator. Tahan korosi secara alami karena membentuk lapisan oksida. Mudah dikerjakan menggunakan alat konvensional (bor, CNC, las TIG tertentu). Banyak tersedia dalam berbagai ukuran pelat dan as. Spesifikasi teknis material aluminium 6061 ditunjukkan pada tabel 2.1 dan aluminium 5052 ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.1 Spesifikasi aluminium (Alloy 6061 atau setara)

Sifat Material	Nilai (*typical* 6061)	Satuan
Jenis Material	Aluminium 6061	
Densitas	2.70	g/cm³
Yield Strength	276	MPa
Ultimate Tensile Strength	310	MPa
Modulus Elastisitas	69	GPa
Kekerasan (Brinell)	95	HB
Suhu Luluh (*Melting Point*)	582–652	°C
Konduktivitas Termal	167	W/m·K
Koefisien Muai Panjang	23.6	µm/m·°C

Sumber: A Text Book of Machine Design (2005)

Tabel 2.2 Spesifikasi aluminium (5052 atau setara)

Sifat Material	Nilai (*typical* 5052)	Satuan
Jenis Material	Aluminium 5052	
Densitas	2.68	g/cm³
Yield Strength	193	MPa
Ultimate Tensile Strength	228	MPa
Modulus Elastisitas	70	GPa
Kekerasan (Brinell)	60	HB
Suhu Luluh (*Melting Point*)	607–650	°C
Konduktivitas Termal	138	W/m·K
Koefisien Muai Panjang	25	µm/m·°C

Sumber: A Text Book of Machine Design (2005)

2.3.2 PLA (*Polylactic Acid*)

PLA digunakan untuk mencetak komponen yang tidak menerima beban berat, seperti cover, Bracket sensor, atau jig penyangga ringan. PLA memiliki keunggulan antara lain proses pencetakan otomasi sepenuhnya, cepat, biaya rendah, dan cocok untuk bentuk kompleks yang sulit dikerjakan secara konvensional. Spesifikasi teknis material PLA ditunjukkan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi polylactic acid - FDM 3D *print*

Sifat Material	Nilai (Polylactic acid)	Satuan
Jenis Material	Polylactic acid	
Densitas	1.24	g/cm³
Yield Strength	45-60	MPa
Ultimate Tensile Strength	53	MPa
Modulus Elastisitas	3.5	GPa
Kekerasan (Shore D)	83	D
Suhu Transisi Gelas (Tg)	60–65	°C
Suhu Luluh (*Melting Point*)	180–220	°C
Konduktivitas Termal	167	W/m·K
Koefisien Muai Panjang	68	µm/m·°C

Sumber: A Text Book of Machine Design (2005)

2.3.3 Resin (*Photopolymer Resin*)

Resin DLP digunakan untuk komponen presisi tinggi yang kecil, seperti *enclosure* elektronik, *sensor mounting*, gearbox ringan, atau prototipe konektor. Resin memiliki keunggulan antara lain presisi tinggi, permukaan sangat halus, cocok untuk detail kecil, dan toleransi ketat. Spesifikasi teknis material Photopolymer Resin ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Spesifikasi standard photopolymer resin - DLP 3D *print*

Sifat Material	Nilai (Photopolymer resin)	Satuan
Jenis Material	Standard photopolymer resin	
Densitas	1.10–1.20	g/cm³
Yield Strength	40–60	MPa
Ultimate Tensile Strength	60	MPa
Modulus Elastisitas	2.5–3.0	GPa
Kekerasan (Shore D)	80–85	D
Suhu Transisi Gelas (Tg)	50–55	°C
Kekerasan Impact (Izod)	25–35	J/m

Sumber: A Text Book of Machine Design (2005)

2.4 Komponen Mekanik

Komponen mekanik merupakan elemen-elemen yang menyusun sistem pergerakan dan struktur pendukung dari sebuah robot arm. Pemilihan komponen yang tepat sangat berpengaruh terhadap performa, presisi, dan daya tahan sistem secara keseluruhan. Pada robot arm 6-DOF, beberapa komponen mekanik yang krusial meliputi *bearing*, *pulley*, *timing belt*, *gearbox*, poros, serta sistem transmisi lainnya.

2.4.1 *Bearing*

Bearing digunakan untuk meminimalkan gesekan antara dua bagian yang bergerak, serta mendukung beban radial dan aksial. Pemilihan *bearing* mempertimbangkan beban maksimum dan ukuran. Jenis *bearing* yang umum digunakan robot arm ditunjukkan pada gambar 2.12 sampai dengan gambar 2.15 (General Catalogue, 2008).



Gambar 2.12 *Tapered roller bearing*
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.13 *Needle roller thrust*
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.14 *Needle roller bearing*
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.15 *Deep Groove Ball Bearing*
Sumber: mcmaster.com (2025)

Tapered Roller

Bearing ini mampu menahan beban kombinasi antara radial dan aksial secara efisien (Rolling Bearings, 2018). Cocok digunakan pada sambungan yang menerima beban berat dan momen puntir, seperti sambungan utama lengan.

Needle Roller Thrust

Digunakan pada aplikasi yang memerlukan penahanan beban aksial tinggi namun dengan profil tipis. Umumnya digunakan pada bagian yang mengalami tekanan searah sepanjang sumbu rotasi.

Needle Roller

Memiliki diameter rol yang kecil tetapi panjang, bearing ini digunakan untuk sambungan dengan ruang terbatas namun tetap memerlukan daya dukung tinggi terhadap beban radial.

Deep Groove Ball

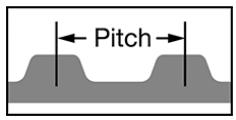
Jenis *bearing* serbaguna yang digunakan untuk putaran tinggi dan beban ringan

hingga sedang. *Bearing* ini ditempatkan pada titik rotasi yang memerlukan kestabilan rotasi dan efisiensi tinggi.

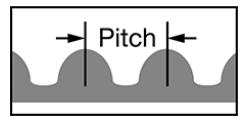
2.4.2 *Pulley* dan *Timing Belt*

Sistem transmisi berbasis *pulley* dan *timing belt* umum digunakan karena efisiensi tinggi, operasi senyap, perawatan rendah, dan biaya produksi yang lebih murah dibanding *gearbox*. *Timing belt* adalah sabuk berbahan karet atau poliuretan yang memiliki gigi-gigi pada bagian dalamnya. Sabuk ini berjalan pada *pulley* yang memiliki alur gigi yang sesuai, sehingga transmisi putaran terjadi tanpa slip (*non-slip transmission*). Berbeda dari *belt* biasa, sistem *timing belt* mampu menjaga sinkronisasi rotasi secara presisi.

Dalam sistem transmisi daya berbasis sabuk gigi, terdapat dua jenis utama profil gigi pada *timing belt*, yaitu *Trapezoidal* dan *Synchronous* (*Curvilinear*). Pemilihan jenis profil ini berpengaruh langsung terhadap daya dukung beban, tingkat keausan, dan akurasi transmisi.



Gambar 2.16 *Trapezoidal profile*
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.17 *Curvilinear profile*
Sumber: mcmaster.com (2025)

Trapezoidal Timing Belt

Trapezoidal timing belt merupakan jenis sabuk gigi dengan profil gigi berbentuk trapesium seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16. Profil ini banyak digunakan pada aplikasi ringan hingga menengah. Gaya kontak terjadi pada sisi gigi *belt*, bukan pada puncak gigi. Kelemahan dari jenis ini yaitu terdapat *backlash* (celah) antara gigi

belt dan *pulley*, sehingga tidak cocok untuk aplikasi presisi tinggi. Jenis ini umumnya digunakan pada seri MXL, XL, L, H, XH, dan XXH.

Synchronous Timing Belt

Synchronous timing belt, juga dikenal sebagai *Curvilinear tooth profile*, memiliki bentuk gigi melengkung yang dirancang untuk mengurangi keausan dan meningkatkan kapasitas torsi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17. Jenis ini merupakan pengembangan dari *Trapezoidal profile* dan lebih umum digunakan dalam aplikasi industri, presisi tinggi, dan robotik profesional. Kontak gigi lebih merata sehingga torsi dapat didistribusikan lebih baik dan reduksi *backlash* lebih signifikan. Contoh sistem *Curvilinear* yang populer antara lain:

1. HTD (*High Torque Drive*)

   Profil HTD memiliki gigi setengah lingkaran yang lebih dalam dari profil *trapezoidal*, dirancang untuk meningkatkan kapasitas torsi dan mengurangi slip pada aplikasi berkecepatan tinggi dan berbeban berat. Seri yang tersedia antara lain HTD 3M, 5M, 8M, dan 14M, dengan angka menunjukkan *pitch* gigi dalam mm.

2. GT (*Gates Tooth*)

   Profil GT dikembangkan Gates sebagai penyempurnaan HTD dengan gigi lebih presisi dan minim *backlash*. GT2 (*pitch* 2 mm) populer untuk 3D printing dan robot presisi kecil, sedangkan GT3 (*pitch* 3 mm) lebih kuat untuk beban dan kecepatan tinggi.

3. RPP (*Round Profile Pitch*)

   RPP adalah profil gigi melengkung buatan produsen Eropa sebagai alternatif

HTD. Desainnya mengurangi stres pada dasar gigi dan meningkatkan efisiensi. Tersedia dalam *pitch* RPP 3, RPP 5, RPP 8, dan seterusnya.

2.4.3 Fastener dan Aksesori

Dalam sistem mekanik seperti robot arm, pemilihan Fastener dan aksesori penting untuk kekokohan, modularitas, serta kemudahan dalam perakitan dan pemeliharaan. Fastener berfungsi sebagai pengikat semi permanen antar komponen, sementara aksesori berperan sebagai pelengkap untuk menunjang fungsi.

Jenis-Jenis Fastener

Beberapa Fastener utama yang dipertimbangkan dalam proyek ini antara lain:

1. Baut dan Mur (*Bolt and Nut*)

   Digunakan untuk sambungan struktural yang membutuhkan kekuatan tarik dan torsi tinggi. Umumnya menggunakan standar metrik seperti M3, M4, hingga M8.

2. Rivet dan Rivet Nut (Blind Rivet)

   Digunakan pada bagian yang tidak memungkinkan pemasangan mur. *Rivet Nut* juga memungkinkan pembentukan ulir di bahan tipis.

3. *Washer* dan *Spacer*

   Berfungsi untuk meratakan beban, mencegah kerusakan permukaan, dan mengatur jarak antar komponen.

Bahan Fastener

Fastener pada proyek ini perlu mempertimbangkan jenis bahan yang digunakan.

1. Stainless Steel

   Memiliki ketahanan korosi yang tinggi dan kekuatan yang baik, cocok untuk aplikasi presisi.

2. Carbon Steel

   Umumnya digunakan karena harga lebih ekonomis dan cukup kuat namun rawan berkarat

3. Carbon Steel dengan Lapisan Zinc

   Umumnya digunakan karena harga lebih ekonomis dan cukup kuat untuk beban sedang.

4. Aluminium Fastener

   Untuk bagian yang membutuhkan bobot ringan, walau dengan kekuatan tarik lebih rendah.

Aksesori Mekanik

Aksesori mekanik dalam proyek ini digunakan untuk menunjang fleksibilitas dan kekokohan sambungan. Jenis-jenis aksesori yang digunakan meliputi.

1. Aluminium Profile T-Slot

   Digunakan sebagai dasaran utama sistem, memberikan fleksibilitas tinggi dalam tata letak komponen serta kemudahan perakitan dan modifikasi.

2. T-Slot Nut

   Berfungsi sebagai ulir tanam di dalam alur profil aluminium. Memungkinkan pemasangan baut pada berbagai posisi tanpa perlu membuat lubang tambahan.

3. Bracket

   Digunakan untuk menyambung dua atau lebih batang profil aluminium pada sudut tertentu (misalnya 90 derajat), menjaga kekakuan struktur sekaligus memastikan keselarasan.

4. *Washer*

   Dipasang bersama baut/mur untuk mendistribusikan tekanan secara merata, melindungi permukaan komponen, serta membantu menjaga kestabilan sambungan.

2.5 Aktuator Robot Arm

Aktuator merupakan elemen penggerak utama dalam sistem robotik yang berfungsi mengubah energi (listrik, pneumatik, atau hidraulik) menjadi gerakan mekanis. Aktuator berperan langsung dalam menentukan respons sistem, kecepatan gerak, kekuatan torsi, akurasi posisi, dan stabilitas robot selama operasi.

2.5.1 Jenis Aktuator

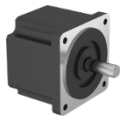
Dalam robotika, beberapa jenis aktuator umum digunakan, di antaranya ditunjukkan pada gambar 2.18 sampai dengan gambar 2.21.



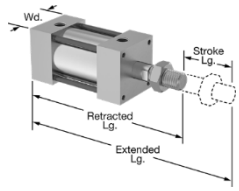
Gambar 2.18 DC motor
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.19 Servo motor
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.20 Stepper motor
Sumber: mcmaster.com (2025)



Gambar 2.21 Linear actuator
Sumber: mcmaster.com (2025)

Motor DC (*Direct Current Motor*)

Cocok untuk aplikasi sederhana atau yang tidak membutuhkan kontrol posisi presisi tinggi. Motor DC mudah dikendalikan, ekonomis, dan gerakan kontinu.

Servo Motor

Digunakan untuk sambungan yang membutuhkan posisi presisi. Servo motor memiliki sistem *feedback* internal berupa potensiometer atau sensor posisi yang memungkinkan pengaturan posisi secara tertutup (*closed-loop*).

Stepper Motor

Bergerak dalam langkah diskrit, cocok untuk posisi yang ditentukan tanpa sensor umpan balik. Stepper motor banyak digunakan pada sistem *low-cost* dan presisi menengah. Namun, kehilangan langkah dapat terjadi saat beban melebihi kapasitas. Maka dari itu umumnya ditambahkan dengan sensor posisi.

Aktuator Linear (*Linear Actuator*)

Mengubah gerakan putar menjadi linear. Cocok untuk aplikasi pengangkatan vertikal atau translasi langsung, namun tidak umum pada robot arm 6-DOF karena lebih fleksibel menggunakan sambungan rotasi.

2.5.2 Kriteria Pemilihan Aktuator

Pemilihan aktuator dilakukan berdasarkan beberapa kriteria berikut.

1. Torsi Keluaran

   Aktuator harus menghasilkan torsi minimum yang cukup untuk menggerakkan setiap sambungan, termasuk mempertimbangkan momen beban, panjang lengan, dan gaya gravitasi.

2. Kecepatan Rotasi (RPM)

   Ditentukan berdasarkan kebutuhan kecepatan gerak sambungan. Jika torsi tinggi dibutuhkan, sering kali digunakan *gearbox* atau reduksi eksternal.

3. Tipe Kontrol

   Pemilihan antara *open-loop* (misalnya stepper) atau *closed-loop* (servo, BLDC) bergantung pada kebutuhan akurasi dan perangkat kontrol yang akan digunakan.

4. Daya dan Tegangan Operasi

   Menyesuaikan dengan sumber daya yang tersedia dan konsumsi daya sistem secara keseluruhan.

5. Ukuran dan Berat

   Aktuator harus memiliki dimensi dan massa yang sesuai agar tidak menambah beban berlebih pada struktur, terutama jika aktuator dipasang langsung pada sambungan.

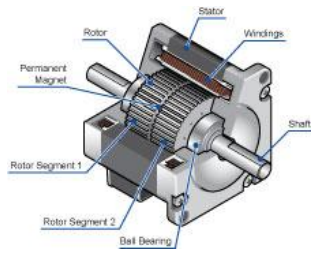
2.5.3 Prinsip Kerja Stepper Motor

Stepper motor adalah jenis aktuator elektromagnetik yang mengubah sinyal

pulsa digital menjadi gerakan mekanis diskrit dalam bentuk langkah (*step*). Setiap pulsa yang dikirim ke motor akan menghasilkan rotasi sudut tertentu, sehingga posisi poros motor dapat dikendalikan secara akurat.

Struktur Stepper Motor

Secara umum, stepper motor terdiri dari dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Ilustrasi struktur stepper motor ditunjukkan pada gambar 2.22 berikut.



Gambar 2.22 Struktur stepper motor
Sumber: orientalmotor.com (2025)

Stator merupakan bagian tetap motor yang terdiri dari beberapa lilitan kumparan yang diatur dalam beberapa fase (umumnya dua atau empat fase). Masing-masing lilitan menghasilkan medan magnet ketika dialiri arus. Rotor adalah bagian berputar motor, terbuat dari magnet permanen atau material feromagnetik.

Cara Kerja Stepper Motor

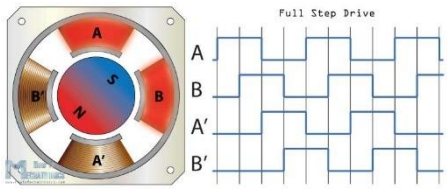
Stepper motor bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, di mana pulsa listrik dikirim secara berurutan ke kumparan stator untuk menciptakan medan magnet yang memutar rotor secara bertahap. Pulsa tidak langsung diberikan dari kontroler ke motor, melainkan melalui komponen perantara yang disebut *driver*.

Driver adalah rangkaian elektronik yang menerima sinyal kontrol dari mikrokontroler lalu mengubahnya menjadi urutan aktivasi arus pada kumparan motor. *Driver* mengatur urutan kumparan yang diaktifkan agar arah gerak sesuai. *Driver*

mengatur jumlah langkah dan kecepatan berdasarkan pulsa dari mikrokontrol.

Mikrokontroler akan mengirim sinyal digital dalam bentuk pulsa untuk dikirim ke pin STEP dan DIR *driver*. Setiap pulsa logika dari LOW ke HIGH yang diterima pada pin STEP (PUL/CLK) akan membuat motor bergerak satu langkah. Pin DIR (*Direction*) menentukan arah rotasi motor CW atau CCW, dengan mengubah logika HIGH/LOW untuk mengatur arah putaran.

Setiap pulsa listrik yang diberikan ke *driver* akan mengaktifkan satu atau lebih lilitan stator secara berurutan, sehingga rotor berputar secara diskrit sesuai arah medan magnet. Jumlah langkah yang dibutuhkan untuk satu putaran penuh tergantung pada konstruksi motor, misalnya 200 langkah per putaran (1.8° per langkah).



Gambar 2.23 *Stepper motor pulse*
Sumber: howtomechatronics.com (2015)

Gambar 2.23 menunjukkan ilustrasi pola pulsa yang diberikan *driver* ke motor. Dalam implementasinya, kombinasi antara pola aktivasi kumparan dan frekuensi pulsa akan menentukan arah, kecepatan, dan resolusi gerak dari motor.

2.6 Analisis Beban dan Kekuatan Struktur

Analisis beban dan kekuatan struktur bertujuan untuk memastikan bahwa desain mekanik robot arm mampu menahan gaya-gaya yang terjadi selama beroperasi, baik dari berat sendiri, beban kerja, maupun gaya dinamis akibat gerakan. Dengan analisis ini, perancang dapat mengetahui distribusi gaya dan momen yang bekerja pada setiap bagian. Selain itu, analisis ini juga berguna untuk memverifikasi apakah material dan

dimensi struktur yang digunakan sesuai dengan batas kekuatan materialnya, serta untuk menentukan aktuator atau rasio *gearbox* yang paling optimal berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi.

Dalam sistem robot arm, berbagai jenis beban bekerja secara bersamaan pada struktur mekanik. Beban yang bekerja pada robot arm dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

2.6.1 Beban Statis

Beban statis adalah beban tetap yang berasal dari berat komponen robot itu sendiri, seperti struktur lengan, aktuator, *gearbox*, dan struktur penopang lainnya. Beban ini bekerja secara konstan akibat gaya gravitasi dan tidak berubah selama posisi robot tetap.

Gaya berat

Gaya berat merupakan gaya vertikal ke bawah akibat berat setiap bagian struktur robot. Gaya berat dapat ditentukan dengan persamaan 2.1 berikut.

$$F = m \cdot g \tag{2.1}$$

Di mana F: Gaya berat (N), m: Massa komponen (kg), g: Percepatan gravitasi

Momen Lentur

Momen lentur digunakan untuk mengetahui efek "tekukan" pada sambungan akibat beban yang menjulur keluar dari titik rotasi. Momen lentur dapat ditentukan dengan persamaan 2.2 berikut.

$$M = F \cdot L \tag{2.2}$$

Di mana M: Momen lentur (Nm), F: Gaya berat (N), L: Jarak (m)

Tegangan Lentur

Tegangan ini digunakan untuk mengevaluasi apakah material cukup kuat menahan momen tanpa melampaui batas elastisnya (*Yield Strength*). Tegangan lentur dapat ditentukan dengan persamaan 2.3 berikut.

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} \tag{2.3}$$

Di mana σ: Tegangan (Pa), M: Momen lentur (Nm), y: Jarak dari sumbu netral ke permukaan luar penampang (m), I: Momen inersia penampang (m^4)

2.6.2 Beban Kerja (*Payload*)

Beban kerja merupakan beban tambahan yang dibawa oleh robot saat beroperasi. Beban ini berasal dari *end-effector* seperti alat las, sensor, atau *gripper*, dan dihitung sebagai massa tambahan pada ujung lengan. Beban kerja perlu dimasukkan dalam simulasi untuk memastikan sambungan tidak mengalami kelebihan tegangan.

Beban ini ditambahkan ke beban statis pada sambungan terakhir dan akan dikalikan dengan panjang lengan untuk menghitung momen tambahan yang bekerja ke sambungan di bawahnya.

Momen Akibat Beban Ujung

Semakin jauh posisi *payload* dari sambungan, semakin besar momen yang ditimbulkan. Momen *payload* dapat ditentukan dengan persamaan 2.4 berikut.

$$M_{\text{payload}} = m_{\text{payload}} \cdot g \cdot L \quad (2.4)$$

Di mana $mpayload$: Massa beban kerja (kg), L: Jarak dari *joint* ke *end-effector* (m)

2.6.3 Beban Dinamis dan Inersia (*Dynamic and Inertial Load*)

Saat robot bergerak, terutama saat akselerasi dan deselerasi, komponen akan mengalami beban tambahan akibat gaya inersia. Gaya ini timbul karena perubahan kecepatan rotasi atau translasi dan bergantung pada massa serta percepatan komponen.

Gaya Inersia Linier

Digunakan untuk memperkirakan gaya tambahan yang harus ditanggung sambungan akibat gerakan mendadak. Gaya inersia linear dapat ditentukan dengan persamaan 2.5 berikut.

$$F_{\text{inertia}} = m \cdot a \quad (2.5)$$

Di mana $Finertia$: Gaya akibat percepatan (N), a: Percepatan linier (m/s²)

Momen Inersia Rotasi

Digunakan untuk memperkirakan torsi tambahan yang harus ditanggung aktuator akibat gerakan mendadak. Momen inersia rotasi dapat ditentukan dengan persamaan 2.6 berikut.

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (2.6)$$

Di mana τ: Torsi akibat percepatan sudut (Nm), I: Momen inersia benda terhadap rotasi (kg·m²), α: Percepatan sudut (rad/s²)

Momen Inersia Batang

Untuk beban lengan robot homogen yang berputar dari satu titik ujung. Momen inersia lengan dapat ditentukan dengan persamaan 2.7 berikut.

$$I = \frac{1}{3} \cdot m \cdot L^2 \tag{2.7}$$

Di mana I: Momen inersia dari batang terhadap ujungnya, L: Panjang batang (m)

2.6.4 Beban Reaksi dari Aktuator (*Reaction Torque*)

Setiap aktuator, terutama motor dan *gearbox*, menghasilkan gaya reaksi saat beroperasi. Gaya ini dapat berupa momen puntir atau dorongan balik terhadap sambungan, tergantung pada tipe aktuator dan arah gerak.

Gaya Reaksi dari Aktuator

Gaya ini akan didistribusikan ke sambungan, bantalan (*bearing*), dan *bracket* yang menopang motor. Gaya reaksi dari aktuator dapat ditentukan dengan persamaan 2.8 berikut.

$$F_{\text{reaksi}} = \frac{T}{r} \tag{2.8}$$

Di mana $Freaksi$: Gaya reaksi radial (N), T: Torsi dari motor (Nm), r: Jari-jari tumpuan (misalnya, radius *pulley* atau jarak ke titik baut) (m)

2.6.5 *Finite Element Analysis* (FEA)

Selain perhitungan manual, analisis dilakukan secara numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) (Hou & Zhang, 2025). Simulasi FEA dilakukan

untuk melengkapi perhitungan manual dan memberikan gambaran distribusi tegangan dan deformasi secara visual. Simulasi FEA menggunakan *software* seperti Autodesk Fusion 360, Autodesk Inventor, SolidWorks, atau ANSYS.

Terdapat parameter penting dalam FEA yaitu *boundary condition* (penopang tetap, sambungan bebas, dll.), tipe beban (titik beban, distribusi merata, momen torsi), dan sifat material (modulus elastisitas, *Yield Strength*). Langkah-langkah umum dalam FEA adalah sebagai berikut:

- *Modeling*: *Import* model CAD robot ke *software* FEA (misalnya Fusion 360).
- *Material Setup*: Tentukan jenis material dan sifat mekaniknya (modulus elastisitas, *Yield Strength*).
- *Boundary Conditions*: Tetapkan bagian yang *fixed* (tidak bergerak) dan bagian yang diberi beban.
- *Load Application*: Terapkan gaya, momen, atau tekanan sesuai hasil perhitungan manual.
- *Mesh Generation*: Bagi model menjadi elemen-elemen kecil untuk dianalisis.
- *Simulation Run*: Jalankan simulasi untuk memperoleh hasil tegangan maksimum dan defleksi.

2.6.6 *Safety factor* (Faktor Keamanan)

Safety Factor atau Faktor Keamanan adalah rasio antara kemampuan maksimal material untuk menahan beban (misalnya tegangan leleh) terhadap beban atau

tegangan maksimum yang terjadi selama penggunaan aktual. *Safety factor* dapat ditentukan dengan persamaan 2.9 berikut.

$$SF = \frac{\sigma_{\text{Yield}}}{\sigma_{\text{maksimum}}} \tag{2.9}$$

Di mana $\sigma yield$: Tegangan leleh material (Pa), $\sigma maksimum$: Tegangan maksimum hasil simulasi (Pa)

Nilai faktor keamanan umum untuk sistem robotik adalah 1.5-2.5, tergantung pada ketelitian dan pentingnya sambungan tersebut. Jika nilai SF < 1.5, maka desain dianggap rawan gagal dan perlu direvisi.

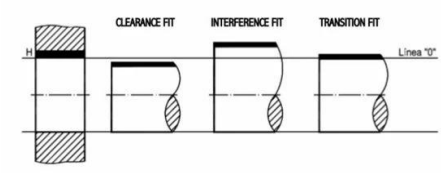
Dalam perhitungan safety factor, torsi keluaran aktual perlu memperhitungkan efisiensi setiap tahap transmisi. Setiap elemen transmisi seperti timing belt dan planetary gearbox memiliki kerugian daya akibat gesekan dan deformasi internal. Efisiensi tipikal timing belt berkisar 95-98%, sedangkan planetary gearbox berkisar 90-95% per stage (Budynas & Keith Nisbett, n.d.). Pada perancangan ini, digunakan nilai efisiensi konservatif sebesar 0,9 per tahap transmisi untuk mengantisipasi kondisi terburuk.

2.7 Manufaktur

Proses manufaktur pada proyek robot arm 6-DOF mencakup berbagai teknik pemrosesan material yang disesuaikan dengan fungsi, bentuk, dan toleransi tiap komponen. Pemilihan metode didasarkan pada efisiensi proses, kemampuan peralatan yang tersedia di lingkungan kampus, serta keakuratan hasil akhir.

2.7.1 *Fitting*

Fitting dalam konteks manufaktur mekanik adalah penyesuaian toleransi antara dua komponen yang saling bersambungan, seperti antara poros dan lubang, atau antara *bearing* dan *housing*. Secara umum, terdapat tiga jenis *fitting*.



Gambar 2.24 *Fitting*
Sumber: waykenrm.com (2023)

Clearance Fit

Merupakan sambungan dengan kelonggaran (*clearance*) antara dua permukaan, sehingga bagian dapat bergerak bebas. Digunakan untuk sambungan yang tidak memerlukan kekakuan tinggi, misalnya pada *spacer* atau *housing* non-struktural.

***Interference Fit* (*Press Fit*)**

Memiliki ukuran poros yang sedikit lebih besar dari lubangnya, sehingga terjadi gaya tekan saat pemasangan. Digunakan untuk sambungan yang membutuhkan kekakuan tinggi dan tidak boleh bergeser, seperti pemasangan *bearing* ke dalam *housing*, atau *pulley* ke poros. *Interference fit* memastikan tidak ada celah yang bisa menimbulkan getaran atau *backlash*.

Transition Fit

Terletak di antara *clearance* dan *interference*. Cocok untuk sambungan yang perlu sedikit kekakuan namun masih bisa dirakit manual tanpa alat bantu khusus.

2.7.2 CNC Milling

CNC milling digunakan untuk memproses komponen berbahan logam yang memerlukan permukaan datar presisi. Dengan menggunakan mesin CNC, akurasi dimensi dapat dipertahankan dalam toleransi ketat (±0.05 mm). Program CNC dibuat menggunakan CAM *software* berdasarkan file CAD 3D. Operasi pemotongan dilakukan secara bertahap dari *roughing* hingga *finishing*, dengan kecepatan *spindle* dan *feedrate* yang disesuaikan terhadap material.

2.7.3 CNC Turning

CNC turning digunakan untuk membentuk komponen berbentuk silinder atau aksial simetris. Bahan baku umumnya berupa as aluminium atau baja yang diputar pada sumbu utama (*spindle*), kemudian dibentuk menggunakan pahat (*tool*) secara otomatis sesuai program G-code. Hasil turning memiliki permukaan halus, cocok untuk komponen yang berputar seperti poros pada *joint* robot arm.

2.7.4 FDM 3D *Printing*

Fused Deposition Modeling (FDM) digunakan untuk mencetak komponen non-struktural dengan bentuk kompleks yang sulit atau tidak efisien dibuat secara konvensional. Material yang digunakan adalah PLA. FDM bekerja dengan mencairkan filamen termoplastik melalui *nozzle* yang bergerak dalam lintasan lapisan demi lapisan. Parameter seperti *layer height*, *infill*, dan *support structure* diatur agar hasil cetakan memiliki kekuatan dan presisi sesuai kebutuhan.

2.7.5 DLP 3D *Printing*

Digital Light Processing (DLP) digunakan untuk mencetak komponen kecil yang membutuhkan presisi tinggi dan detail halus. DLP menggunakan resin cair yang dikeras oleh sinar UV secara lapisan demi lapisan. DLP menghasilkan permukaan yang sangat halus dan toleransi tinggi (hingga ±0.02 mm). Setelah pencetakan, komponen DLP memerlukan proses pencucian alkohol dan *curing* tambahan untuk mengeraskan bagian yang belum sepenuhnya kering.