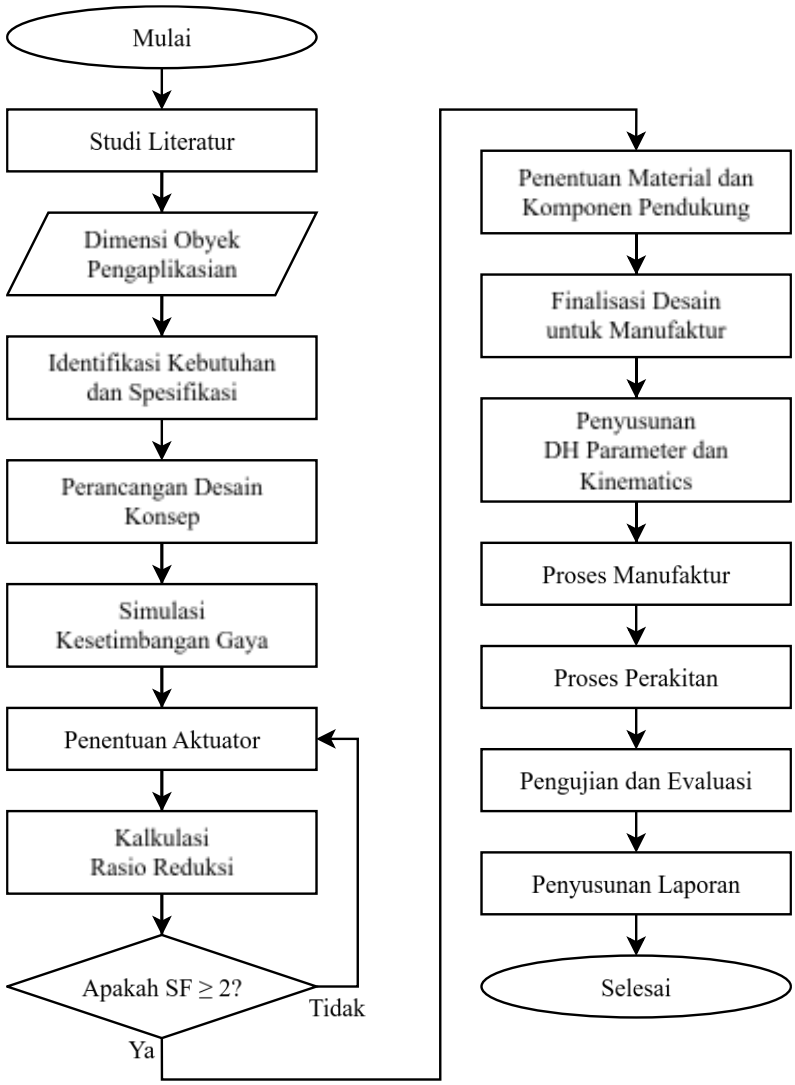
BAB III
METODOLOGI

3.1 Diagram Alir

Diagram alir pada Gambar 3.1 menunjukkan tahapan yang dilakukan dalam perancangan dan pembuatan robot arm.



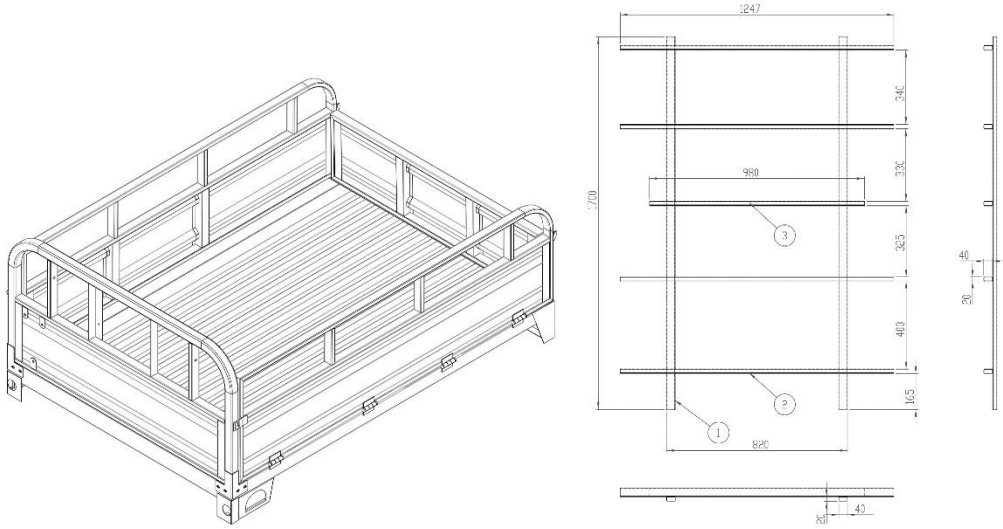
Gambar 3.1 Diagram alir

3.2 Perancangan Robot

Perancangan robot arm 6-DOF dilakukan secara sistematis agar desain yang dihasilkan memenuhi spesifikasi teknis dan dapat direalisasikan. Proses perancangan dimulai dari konsep awal hingga menghasilkan model 3D final yang siap untuk diproduksi.

3.2.1 Penentuan Spesifikasi Sementara Desain

Pada tahap awal, penentuan jangkauan dilakukan berdasarkan studi terhadap objek aplikasi awal, yaitu proses pengelasan bak motor tiga roda. Dimensi bak diukur secara langsung, kemudian dibuat model kasar robot arm untuk menguji apakah lengan mampu mencapai titik terjauh dari bak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jangkauan minimum yang diperlukan adalah sekitar 1,2 meter. Nilai ini ditetapkan sebagai acuan utama dalam perancangan struktur robot arm.



Gambar 3.2 Isometric dan dimensi bak kendaraan 3 roda
Sumber: PT Mekar Armada Jaya (2017)

Gambar 3.2 menunjukkan spesifikasi dimensi objek aplikasi yaitu bak motor tiga roda yang dikeluarkan oleh PT Mekar Armada Jaya yang mana merupakan vendor

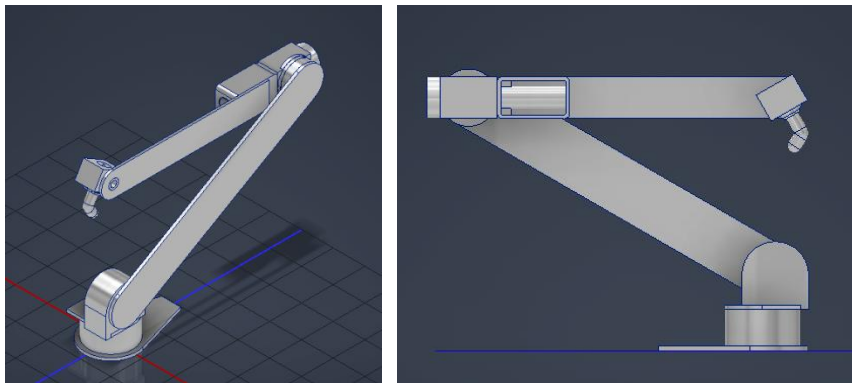
produksi bak tersebut. Berdasarkan jangkauan yang telah ditentukan, spesifikasi sementara desain robot arm meliputi:

1. Jumlah Derajat Kebebasan (DOF): 6, untuk memungkinkan pergerakan translasi dan rotasi penuh di ruang 3D.
2. Jangkauan kerja maksimum: 1,2 meter.
3. Beban angkut (payload): 2 kg yang mana disesuaikan untuk mendukung end-effector dan komponen tambahan.
4. Akurasi dan repeatability: mengacu pada toleransi manufaktur dan kemampuan aktuator.

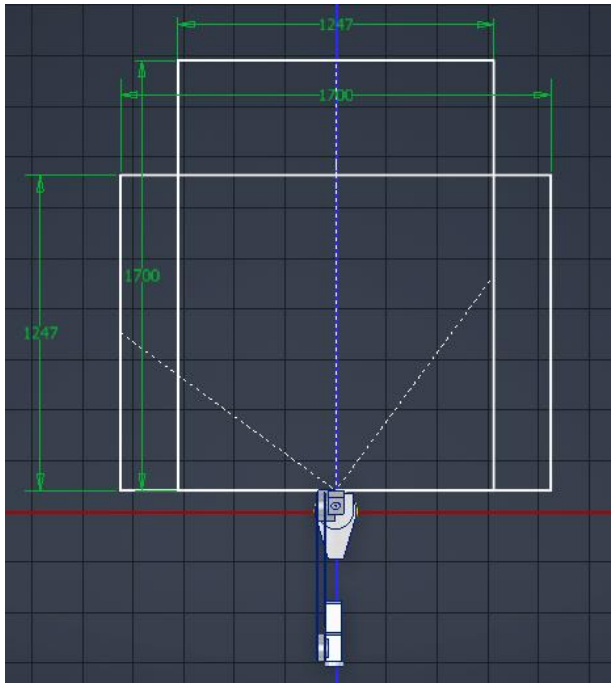
3.2.2 Desain Konseptual

Desain konseptual bertujuan untuk menentukan bentuk dan konfigurasi awal robot arm 6-DOF sebelum dilakukan analisis dan optimasi. Pada tahap ini, perancangan dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor.

Proses dimulai dengan menentukan dimensi awal setiap segmen lengan dan posisi joint, berdasarkan jangkauan kerja yang telah ditetapkan sebesar 1,2 meter. Geometri komponen dirancang agar sesuai dengan metode produksi yang tersedia, seperti CNC machining, FDM 3D *printing*, dan DLP 3D *printing*. Gambar 3.4 berikut merupakan desain konsep robot arm dari pandangan isometric. Sedangkan gambar 3.5 berikut merupakan desain konsep robot arm dari pandangan atas beserta dimensi panjang dan lebar objek aplikasi dalam posisi horizontal dan vertikal.



Gambar 3.4 Desain konsep isometric view dan right side view



Gambar 3.5 Top side view dengan dimensi bak

Hasil akhir dari tahap ini adalah model CAD 3D yang merepresentasikan struktur inti robot. Model ini menjadi acuan utama untuk tahap perhitungan momen dan pemilihan aktuator.

3.2.3 Simulasi Momen dan Kalkulasi Rasio Reduksi

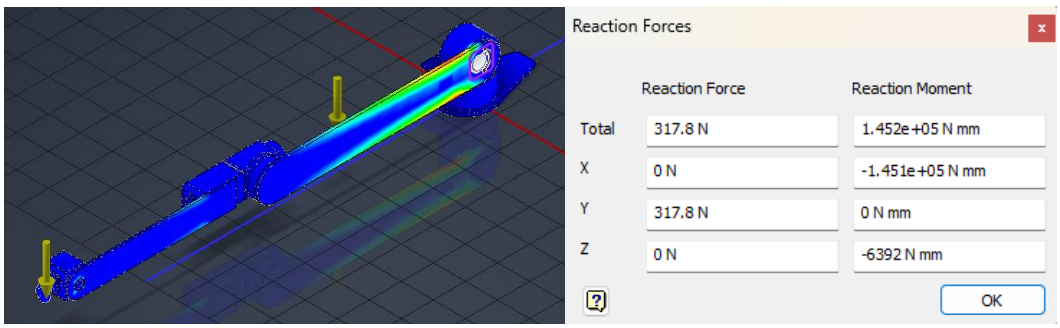
Tahap ini bertujuan untuk menentukan spesifikasi aktuator yang sesuai dengan kebutuhan torsi pada masing-masing *joint* robot arm. Penentuan dilakukan melalui dua

langkah utama, yaitu simulasi momen reaksi menggunakan perangkat lunak CAD dan perhitungan rasio reduksi transmisi.

Simulasi Momen Reaksi

Analisis statis dilakukan pada model 3D menggunakan Autodesk Inventor untuk memperoleh nilai momen reaksi pada setiap joint. Dalam simulasi ini, seluruh komponen robot diasumsikan menggunakan material stainless steel untuk mendapatkan estimasi beban terberat yang mungkin terjadi. Pendekatan ini dipilih sebagai bentuk *worst-case scenario* sehingga torsi yang dibutuhkan akan tetap aman ketika robot dibuat dengan material aktual, yaitu aluminium, yang memiliki massa jenis lebih rendah. Pada simulasi, beban yang diaplikasikan mencakup payload di end-effector dan bobot setiap segmen lengan robot itu sendiri. Hasil analisis memberikan nilai momen reaksi maksimum pada joint, yang kemudian menjadi dasar perhitungan kebutuhan torsi aktuator.

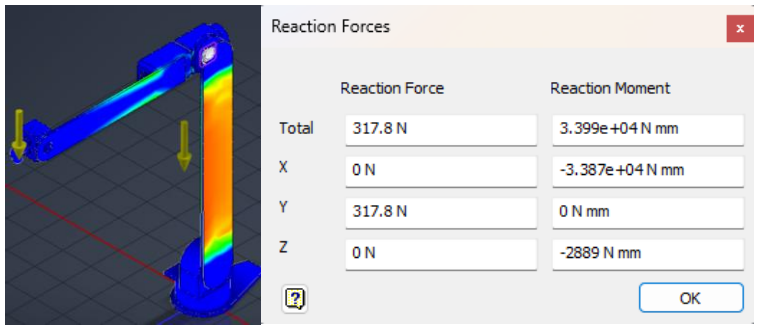
Analisis statis difokuskan pada joint 2 dan joint 3 karena kedua joint ini mewakili segmen lengan yang menanggung beban terbesar dari struktur robot. Sedangkan joint lainnya seperti joint 1 lebih dominan menerima torsi dari pergerakan rotasi basis, sedangkan joint 4, 5, dan 6 hanya menanggung beban relatif kecil dari wrist.



Gambar 3.6 Simulasi momen reaksi joint 2

Dari hasil simulasi yang dituunjukkan pada gambar 3.6, diperoleh nilai momen

reaksi pada joint 2 sebesar $1{,}451 \cdot 10^5\ Nmm$, sebagaimana ditunjukkan pada gambar. Nilai ini merepresentasikan beban torsi maksimum yang harus ditahan oleh aktuator dan sistem transmisi pada joint 2.



Gambar 3.7 Simulasi momen reaksi joint 3

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 3.7, diperoleh nilai momen reaksi pada joint 3 sebesar $3{,}387 \cdot 10^4\ Nmm$, sebagaimana ditunjukkan pada gambar. Nilai ini merepresentasikan beban torsi maksimum yang harus ditahan oleh aktuator dan sistem transmisi pada joint 3.

Pemilihan Aktuator

Berdasarkan hasil simulasi, diputuskan penggunaan stepper motor NEMA 23 pada seluruh joint, dengan spesifikasi torsi yang bervariasi sesuai kebutuhan masing-masing joint:

1. Joint 2 menggunakan stepper motor tipe 5718HB6401 dengan torsi nominal 3.6 Nm, rated voltage 24 V, dan 4 A. Motor ini digunakan karena menerima beban momen terbesar akibat posisi dan panjang lengan.
2. Joint 1 & 3 menggunakan stepper motor tipe 23HS8328 dengan torsi nominal 2.2 Nm, rated voltage 24 V, dan 3 A. Motor ini digunakan karena cukup untuk mengatasi momen sedang pada sumbu rotasi horizontal dan vertikal.

3. Joint 4, 5 & 6: Stepper motor tipe 23HS5628 dengan torsi nominal 1,26 Nm, rated voltage 24 V, dan 2.8 A. Motor ini digunakan pada bagian wrist yang memiliki beban lebih ringan namun tetap memerlukan kontrol posisi yang presisi.

Setelah menentukan spesifikasi aktuator, dilakukan perhitungan rasio gearbox atau pulley yang dibutuhkan untuk memastikan torsi keluaran pada setiap joint memenuhi nilai minimum yang ditentukan oleh hasil simulasi.

Kalkulasi Rasio Reduksi Joint 2

Berikut kalkulasi rasio reduksi Joint 2 berbasis hasil simulasi dan kaidah desain konservatif.

Diketahui:

Momen reaksi hasil simulasi	:	$T_{\text{load}} = 1.451 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm} = 145.1 \text{ N} \cdot \text{m}$
Torsi NEMA 23 5718HB6401	:	$T_{\text{motor}} = 3.6 \text{ N} \cdot \text{m}$
Efisiensi transmisi total	:	$\eta_{\text{konservatif}} = 0.90$
Safety factor	:	$SF = 2.0$

Agar motor mampu menahan/menjalankan beban dengan faktor keamanan, torsi keluaran setelah reduksi harus ≥ beban yang diprasyaratkan:

$$T_{\text{out}} = T_{\text{motor}}\, \eta\, R \geq T_{\text{load}} \times SF \tag{3.1}$$

Maka rasio reduksi minimum:

$$R_{min} = \frac{T_{\text{load}} \times SF}{T_{\text{motor}}\, \eta}$$

Perhitungan:

$$R_{min} = \frac{145.1 \times 2.0}{3.6 \times 0.90} = \frac{290.2}{3.24} \approx 89.6{:}\,1 \tag{3.2}$$

Dengan Momen reaksi 145.1 Nm dan Torsi motor 3.6 Nm, Joint 2 memerlukan rasio reduksi minimum ≈ 90:1.

Kalkulasi Rasio Reduksi Joint 3

Berikut kalkulasi rasio reduksi Joint 3 berbasis hasil simulasi dan kaidah desain konservatif.

Diketahui:

Momen reaksi hasil simulasi	:	$T_{\text{load}} = 3.387 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm} = 33.87 \text{ N} \cdot \text{m}$
Torsi NEMA 23 5718HB6401	:	$T_{\text{motor}} = 2.2 \text{ N} \cdot \text{m}$
Efisiensi transmisi total	:	$\eta_{\text{konservatif}} = 0.90$
Safety factor	:	$SF = 2.0$

Agar motor mampu menahan/menjalankan beban dengan faktor keamanan, torsi keluaran setelah reduksi harus ≥ beban yang diprasyaratkan:

$$T_{\text{out}} = T_{\text{motor}}\, \eta\, R \geq T_{\text{load}} \times SF$$

Maka rasio reduksi minimum:

$$R_{min} = \frac{T_{\text{load}} \times SF}{T_{\text{motor}}\, \eta}$$

Perhitungan:

$$R_{min} = \frac{33.87 \times 2.0}{2.2 \times 0.90} = \frac{67.74}{1.98} \approx 34.2{:}\,1 \qquad (3.3)$$

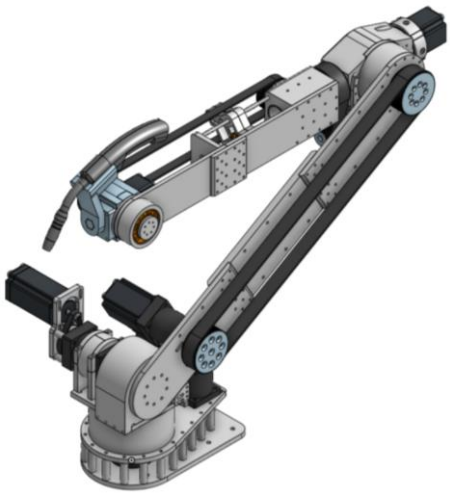
Dengan Momen reaksi 33.87 Nm dan Torsi motor 2.2 Nm, *Joint* 3 memerlukan rasio reduksi minimum ≈ 35:1.

3.2.4 Finalisasi Desain untuk Manufaktur (DFM)

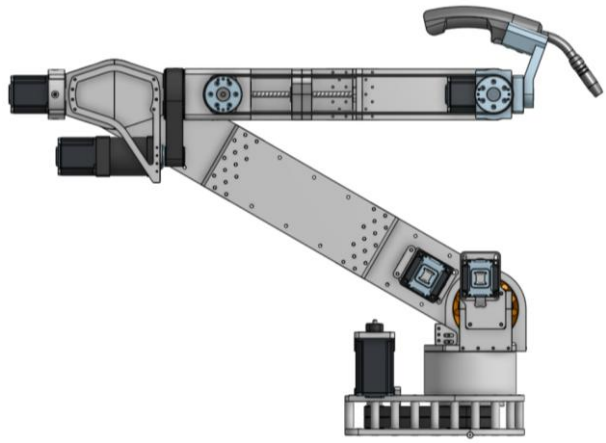
Tahap finalisasi desain dilakukan setelah seluruh parameter utama robot arm,

seperti dimensi, jangkauan, spesifikasi aktuator, dan sistem transmisi, telah ditentukan berdasarkan hasil simulasi dan analisis sebelumnya. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan model desain yang siap diproduksi dengan mempertimbangkan keterbatasan peralatan, metode manufaktur, serta ketersediaan material dan komponen di lingkungan kampus. Pada tahap finalisasi desain, proses pemodelan 3D dimigrasikan dari Autodesk Inventor ke OnShape. Migrasi ini dilakukan karena OnShape memiliki fleksibilitas tinggi sebagai perangkat lunak berbasis web, sehingga desain dapat diakses dan dikerjakan tanpa ketergantungan oleh satu perangkat.

Pada finalisasi desain seluruh komponen disusun menjadi model full assembly 3D yang merepresentasikan wujud fisik robot arm 6-DOF secara utuh. Pada tahap ini, dilakukan penyesuaian dimensi dan detail geometri. Berikut model full assembly 3D robot arm 6-DOF yang ditampilkan pada gambar 3.8 dan 3.9.



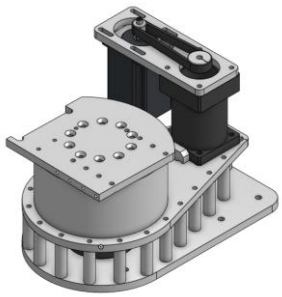
Gambar 3.8 Isometric view DFM



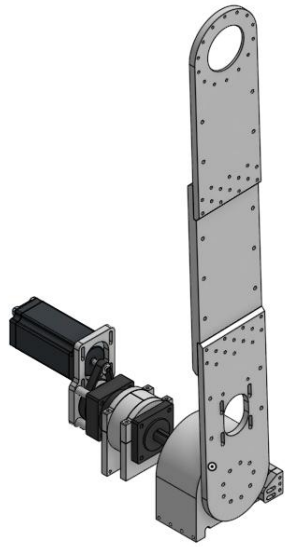
Gambar 3.9 Right side view DFM

Selain itu, setiap joint dibuat sebagai sub-assembly terpisah, sehingga memudahkan proses perancangan, pembuatan, dan perakitan di lapangan. Berikut ini gambar 3.10 sampai dengan 3.15 merupakan isometrik dari setiap assembly joint. Sedangkan exploded view yang menampilkan susunan komponennya ditampilkan

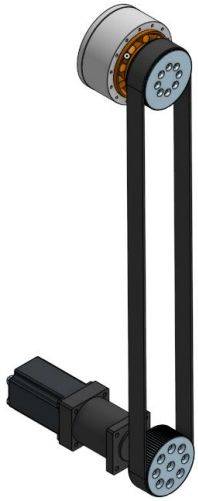
pada lampiran.



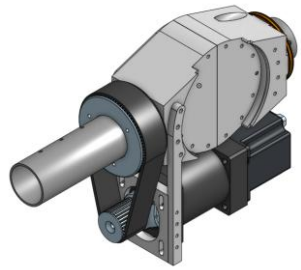
Gambar 3.10 Joint 1



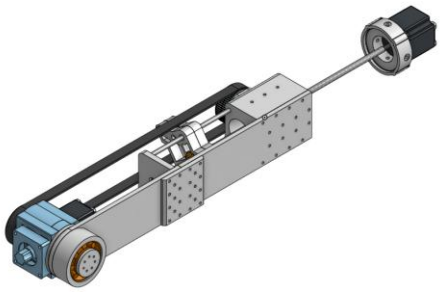
Gambar 3.11 Joint 2



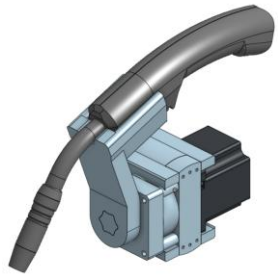
Gambar 3.12 Joint 3



Gambar 3.13 Joint 4



Gambar 3.14 Joint 5



Gambar 3.15 Joint 6

1. Joint 1

Joint ini memiliki konfigurasi dua Tapered Roller bearing dengan tipe 32016 sebagai bantalan utama joint. Sistem reduksi menggunakan pulley dan timing belt GT2 W10 rasio 36:20, menggunakan planetary gearbox dengan rasio 36:1, dan menggunakan double pulley dan timing belt HTD3M W15 rasio 75:30. Sehingga total rasionya yaitu 162:1.

2. Joint 2

Joint ini memiliki konfigurasi dua Tapered Roller bearing 32013 sebagai bantalan utama joint. Sistem reduksi menggunakan pulley dan timing belt GT2 W10 dengan rasio 80:20 dan gearbox planetary dengan rasio 50:1. Sehingga rasio totalnya yaitu 1:200.

3. Joint 3

Joint ini memiliki konfigurasi dua Tapered Roller bearing 30209 sebagai bantalan utama joint. Sistem reduksi menggunakan planetary gearbox dengan rasio 50:1 disalurkan dengan pulley dan timing belt HTD3M W25 80:80. Motor dan *gearbox* diletakkan pada posisi dekat dengan sumbu joint 2 agar menghasilkan beban momen yang lebih kecil untuk joint 2.

4. Joint 4

Joint 4 memiliki konfigurasi dua Needle Roller bearing HK4020 sebagai bantalan beban radial dan dua Needle Roller Thrust AK4565 sebagai bantalan beban aksial. Sistem reduksi menggunakan planetary gearbox rasio 36:1 dan pulley-belt HTD3M W15 dengan rasio 80:30, sehingga rasio totalnya yaitu 96:1.

5. Joint 5

Joint 5 memiliki konfigurasi kombinasi Tapered Roller bearing 30206 dan Needle Roller Thrust AK3552 sebagai bantalan beban radial dan aksial. Sistem reduksi menggunakan leadscrew dengan rasio 1 rotasi : 8 mm dan pulley-belt dengan rasio 180 mm : 1 rotasi, sehingga rasio totalnya yaitu 45:2.

6. Joint 6

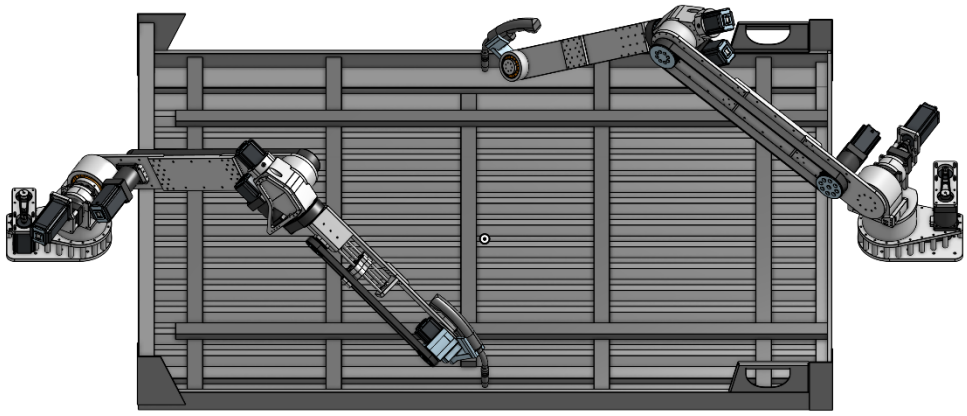
Joint terakhir menggunakan Deep Groove Ball bearing. Reduksi dilakukan dengan *gearbox* buatan dengan rasio 5:1.

3.2.5 Simulasi Workspace Robot

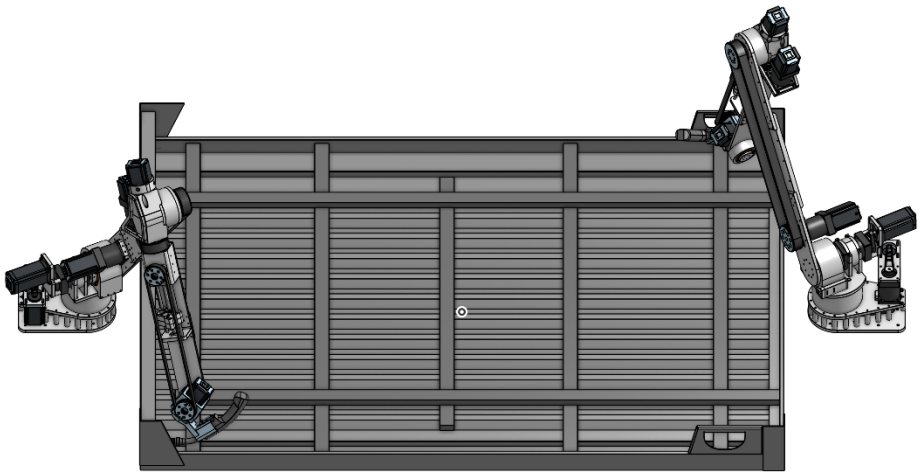
Analisis workspace dilakukan untuk memastikan bahwa robot arm 6-DOF yang dirancang mampu menjangkau titik pengelasan pada bak kendaraan roda tiga. Pada pengaplikasiannya dua unit robot arm 6-DOF menjangkau seluruh titik pengelasan pada bak kendaraan roda tiga. Setiap unit robot ditempatkan untuk menangani setengah bagian bak, sehingga area kerja dibagi secara simetris menjadi dua bagian.

Metode yang digunakan adalah dengan memanfaatkan model 3D hasil perancangan robot arm, kemudian menyimulasikan pergerakan joint hingga end-effector berada pada posisi target titik las. Jika end-effector dapat menyentuh atau mencapai titik tersebut tanpa melampaui batas gerak joint, maka titik tersebut dianggap tervalidasi berada dalam workspace robot. Analisis ini difokuskan pada titik-titik las kritis yang mewakili area tepi obyek, sehingga cakupan gerak robot dapat dievaluasi secara menyeluruh.

Gambar 3.16 dan 3.17 berikut memperlihatkan hasil simulasi workspace robot arm 6-DOF ketika ditempatkan pada sisi depan dan belakang bak kendaraan roda tiga, masing-masing berjarak 1050 mm dari titik tengah bak. Posisi ini dipilih agar kedua robot dapat saling melengkapi dalam menjangkau seluruh titik las pada sisi kanan maupun kiri bak.



Gambar 3.16 Simulasi workspace tengah bak



Gambar 3.17 Simulasi workspace tepi bak

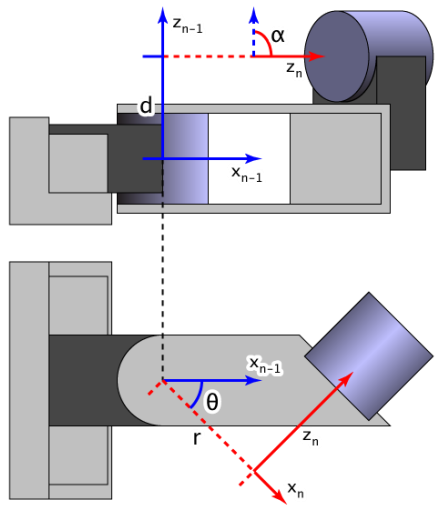
Dalam simulasi, end-effector yang merepresentasikan welding torch digerakkan hingga ujungnya mengarah paralel ke arah titik las. Empat titik las utama divalidasi, yaitu:

1. Titik tengah sisi kanan dan kiri bak dengan koordinat end-effector terhadap base frame (1050, -600, 50).
2. Titik tepi sisi kanan dan kiri bak dengan koordinat end-effector terhadap base frame (200, -600, 90).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa robot mampu mencapai keempat titik tersebut tanpa melampaui batas gerak joint. Hal ini membuktikan bahwa titik-titik las berada dalam jangkauan (*reachable workspace*) robot, sehingga operasi pengelasan dapat dilakukan tanpa kendala pergerakan. Selain itu, hasil analisis juga memperlihatkan bahwa orientasi end-effector dapat diatur sehingga welding torch tetap paralel terhadap titik las. Dengan demikian, simulasi ini tidak hanya memvalidasi jangkauan, tetapi juga mengonfirmasi kelayakan orientasi gerakan robot dalam proses pengelasan (*Dexterous Workspace*).

3.3 DH Parameter

Untuk memodelkan gerakan robot arm 6-DOF, digunakan metode Denavit-Hartenberg (DH) parameter. Metode ini merupakan pendekatan sistematis untuk merepresentasikan posisi dan orientasi setiap link robot terhadap link sebelumnya melalui transformasi matriks homogen.



Gambar 3.18 DH parameter

Sumber: wikipedia.org (2025)

Dalam representasi DH, setiap *link* robot didefinisikan oleh empat parameter utama yang diilustrasikan pada gambar 3.16.

1. a_i (*link length*) : jarak antara sumbu z_i dan z_{i+1} sepanjang sumbu x_i
2. α_i (*link twist*) : sudut antara sumbu z_i dan z_{i+1} sepanjang sumbu x_i
3. d_i (*link offset*) : jarak antara sumbu x_{i-1} dan x_i sepanjang sumbu z_i
4. θ_i (*joint angle*) : sudut antara sumbu x_{i-1} dan x_i sepanjang sumbu z_i

Transformasi dari *frame* ke-i ke *frame* ke-(i+1) dapat ditulis dalam bentuk matriks homogen pada persamaan 3.4 berikut.

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dengan mengalikan semua transformasi T_0^1, T_1^2, …, T_5^6, diperoleh matriks transformasi total T_0^6 yang merepresentasikan posisi dan orientasi end-effector terhadap base frame (2025). Pada proyek akhir ini, model DH parameter disusun berdasarkan dimensi dan konfigurasi dari hasil desain final robot arm 6-DOF dengan

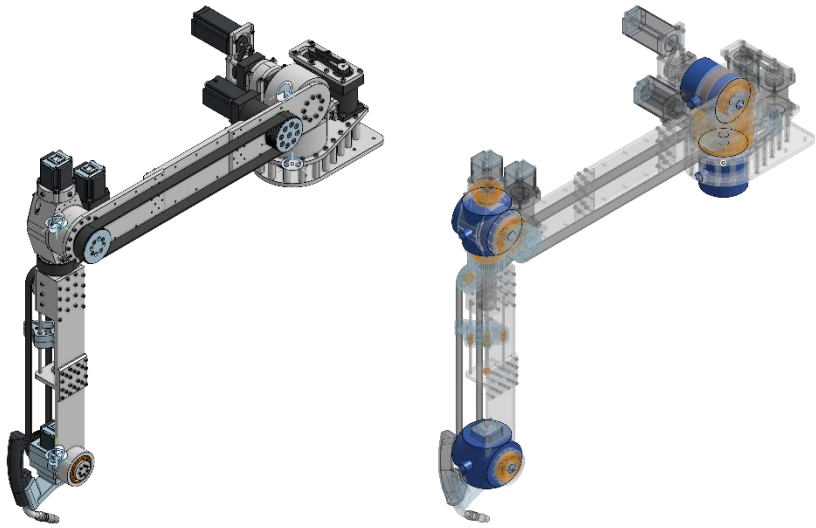
jangkauan 1,2 meter. Tabel DH parameter yang disusun nantinya akan menjadi dasar dalam perhitungan kinematika maju dan balik pada subbab selanjutnya.

3.3.1 Penentuan frame koordinat setiap joint

Langkah awal dalam penyusunan parameter Denavit-Hartenberg (DH) adalah menentukan sistem koordinat untuk setiap joint robot. Penetapan frame ini penting karena menjadi dasar untuk mendefinisikan arah sumbu, jarak antar sumbu, serta hubungan geometris antar link.

Prinsip umum penetapan frame koordinat adalah sebagai berikut. Sumbu z_i selalu sejajar dengan sumbu rotasi. Sumbu x_i: didefinisikan sepanjang garis normal yang tegak lurus terhadap sumbu z_i dan z_{i+1}, atau sepanjang arah jarak terpendek di antara keduanya. Sumbu y_i: ditentukan berdasarkan aturan tangan kanan, yaitu hasil perkalian silang antara z_i dan x_i. Origin frame: terletak pada titik perpotongan atau jarak terdekat antara sumbu z_i dan z_{i+1}

Dengan penetapan frame yang konsisten, parameter DH dapat disusun secara sistematis sehingga hubungan antar link dapat dinyatakan dalam bentuk matriks transformasi homogen. Pada robot arm 6-DOF yang dirancang, penentuan frame dilakukan sebagai berikut:



Gambar 3.19 Frame koordinat robot

1. Joint 1 (Base Joint)

   Sumbu z_1 ditetapkan tegak lurus ke atas (arah vertikal). Frame dasar ini merepresentasikan basis robot.

2. Joint 2 (Shoulder Joint)

   Sumbu z_2 diletakkan sejajar dengan sumbu rotasi shoulder. Frame ini menentukan pergerakan utama lengan terhadap base.

3. Joint 3 (Elbow Joint)

   Sumbu z_3 sejajar dengan sumbu rotasi siku (elbow). Penempatan frame ini penting karena mempengaruhi panjang efektif lengan.

4. Joint 4 (Wrist Pitch)

   Sumbu z_4 sejajar dengan rotasi pitch pergelangan. Frame ini menjadi titik transisi antara lengan utama dan pergelangan.

5. Joint 5 (Wrist Roll/Yaw)

   Sumbu z_5 diletakkan pada sumbu rotasi kedua pergelangan. *Frame* ini

memperluas kemampuan orientasi *end-effector*.

6. Joint 6 (End-effector Joint)

   Sumbu z_6 sejajar dengan sumbu rotasi terakhir sebelum *end effector*. *Frame* ini menentukan orientasi akhir dari *end-effector*.

7. End effector (Tool Frame)

   Frame tambahan ditempatkan pada *tool*, digunakan untuk mendefinisikan posisi dan orientasi keluaran robot.

3.3.2 Penyusunan Tabel Denavit-Hartenberg

Setelah penentuan frame koordinat pada setiap joint, tahap selanjutnya adalah menyusun parameter Denavit-Hartenberg (DH). Parameter ini digunakan untuk mendeskripsikan hubungan geometris antar link, sehingga memudahkan formulasi kinematika. Empat parameter utama yang digunakan pada notasi DH adalah θ_i (Joint Angle), d_i (Link Offset), a_i (Link Length), dan α_i (Twist Angle).

Dari hasil analisis geometri robot arm 6-DOF dengan jangkauan 1,2 meter, diperoleh penyusunan tabel DH sebagai berikut, nilai θ_i merupakan variabel sudut joint, sedangkan nilai parameter lainnya ditentukan berdasarkan dimensi hasil desain CAD.

Tabel 3.1 Tabel Denavit-Hartenberg robot arm 6-DOF 1.2m

Joint	θ_i Rotasi (°)	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i (°)
1	(-90 s.d. 90) θ_1	191	23,5	90
2	(0 s.d. 150) θ_2	0	650	0
3	(-60 s.d. 90) θ_3	0	0	90
4	(-90 s.d. 90) θ_4	574,95	0	-90

5	(-90 s.d. 90) θ_5	0	0	90
6	(-90 s.d. 90) θ_6	0	0	0

3.4 Forward kinematics

Forward kinematics digunakan untuk menentukan posisi dan orientasi end-effector robot berdasarkan parameter Denavit–Hartenberg. Dengan metode ini, setiap joint direpresentasikan dalam bentuk matriks transformasi homogen yang menghubungkan frame sebelumnya dengan frame berikutnya.

3.4.1 Matriks Transformasi Tiap Joint

Berdasarkan tabel Denavit–Hartenberg yang telah disusun, dan dengan menyubstitusikan parameter DH untuk masing-masing joint. Maka matriks transformasi untuk setiap joint ditunjukkan pada persamaan 3.5 sampai dengan 3.10.

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & \sin\theta_i & 23{,}5\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & 0 & -\cos\theta_i & 23{,}5\sin\theta_i \\ 0 & 1 & 0 & 191 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 650\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 650\sin\theta_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & \sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 & -\cos\theta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & -\sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 574{,}95 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & 0 & \sin\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 & -\cos\theta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$T_6^7 = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4.2 Transformasi Total

Transformasi dari base frame hingga end-effector diperoleh dengan perkalian berurutan seperti pada persamaan 3.11.

$$T_0^6 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5 \cdot T_5^6 \quad (3.11)$$

Hasil perkalian ini akan menghasilkan matriks homogen 4×4 yang terdiri dari tiga kolom vektor arah (orientasi) serta satu kolom posisi end-effector relatif terhadap base frame. Berikut persamaan 3.12 merupakan bentuk matriks dari transformasi total.

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Keterangan:

$[p_x, p_y, p_z]^T$: posisi end-effector relatif terhadap base frame

$[n_x, n_y, n_z]^T$: vektor arah sumbu-x end-effector

$[o_x, o_y, o_z]^T$: vektor arah sumbu-y end-effector

$[a_x, a_y, a_z]^T$: vektor arah sumbu-z end-effector

Matriks transformasi total inilah yang menjadi dasar analisis forward kinematics, karena seluruh informasi orientasi dan posisi end-effector sudah tercakup di dalamnya.

3.4.3 Implementasi Numerik

Untuk mendapatkan hasil numerik, nilai θ_1 hingga θ_6 dapat diberikan sesuai konfigurasi joint yang diinginkan. Dengan memasukkan nilai sudut ke dalam matriks transformasi, kemudian melakukan perkalian matriks secara berurutan, diperoleh posisi $[p_x, p_y, p_z]$ dan orientasi end-effector.

Proses perhitungan ini dapat diimplementasikan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB atau Python. Dengan demikian, forward kinematics tidak hanya dapat dianalisis secara simbolik tetapi juga dapat digunakan dalam simulasi maupun kontrol robot secara langsung.

3.5 Inverse kinematics

Inverse kinematics adalah proses menentukan nilai variabel joint $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$ berdasarkan posisi dan orientasi end-effector yang diinginkan. Berbeda dengan forward kinematics yang selalu memiliki solusi tunggal, inverse kinematics biasanya menghasilkan banyak solusi, bahkan dalam beberapa kondisi tidak ada solusi. Analisis ini penting untuk mengontrol robot agar dapat mencapai titik kerja tertentu di ruang kerja.

Masalah inverse kinematics dapat diformulasikan sebagai berikut dengan $[p_x,\ p_y,\ p_z]^T$ adalah posisi end-effector yang diinginkan, $[n,\ o,\ a]$ adalah orientasi end-effector, dan menentukan θ_1 hingga θ_6 yang memenuhi persamaan 3.13 berikut.

$$T_0^6(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Namun, inverse kinematics memiliki permasalahan khusus. Pertama, inverse

kinematics dapat menghasilkan banyak solusi (multiple solutions), karena fungsi trigonometri bersifat periodik sehingga satu posisi end-effector bisa dicapai oleh beberapa konfigurasi joint yang berbeda. Kedua, tidak selalu ada solusi yang valid, terutama ketika target berada di luar ruang kerja (workspace) robot sehingga tidak dapat dijangkau oleh lengan. Ketiga, inverse kinematics juga dapat menghadapi kondisi redundansi dan singularitas, di mana pada kasus tertentu robot memiliki solusi tak terhingga (redundant) atau justru kehilangan derajat kebebasan (singular).

3.5.1 Analisis Geometris

Metode analisis geometris merupakan pendekatan klasik yang banyak digunakan dalam penyelesaian inverse kinematics. Prinsip dasarnya adalah memanfaatkan hubungan geometris antara panjang link, sudut joint, serta posisi dan orientasi end-effector. Dengan menggunakan hukum trigonometri, permasalahan inverse kinematics dapat direduksi menjadi perhitungan sudut-sudut tertentu dari segitiga yang terbentuk oleh link robot.

Pada robot manipulator dengan enam derajat kebebasan (6-DOF), proses analisis biasanya dimulai dengan memisahkan posisi end-effector dari orientasinya. Posisi end-effector dapat digunakan untuk menentukan parameter translasi, khususnya dalam menghitung sudut pada joint di bagian lengan utama (shoulder dan elbow). Setelah posisi diketahui, orientasi end-effector digunakan untuk menghitung sudut joint pada pergelangan (wrist). Dengan demikian, perhitungan inverse kinematics dapat dibagi menjadi dua tahap utama, yaitu perhitungan posisi dan perhitungan orientasi.

Metode analisis geometris dalam inverse kinematics berfokus pada pendekatan trigonometri dan geometri ruang untuk menentukan sudut-sudut joint berdasarkan

posisi end-effector (p_x, p_y, p_z). Berikut merupakan contoh langkah analisis geometris.

1. Penentuan Sudut Basis (θ_1)

   Sudut pertama dihitung dari proyeksi posisi end-effector pada bidang XY.

   $$\theta_1 = \arctan 2\,(p_y, p_x) \tag{3.14}$$

2. Perhitungan Jarak Radial dan Vertikal

   Dari posisi target, dihitung:

   - Jarak radial mendatar:

   $$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} - a_1 \tag{3.15}$$

   - Jarak vertikal dari *base* ke target:

   $$z = p_z - d_1 \tag{3.16}$$

3. Penentuan Sudut Lengan $\left(\theta_2, \theta_3\right)$

   Dengan hukum cosinus pada segitiga yang dibentuk oleh *links* robot:

   $$\cos\theta_3 = \frac{r^2 + z^2 - a_2^2 - d_4^2}{2a_2 d_4} \tag{3.17}$$

   kemudian sudut θ_2 ditentukan dari kombinasi $\arctan 2\,(z, r)$ dan sudut hasil hukum cosinus.

4. Orientasi Akhir $(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$

   Sudut pada pergelangan (wrist) ditentukan dari orientasi end-effector yang diinginkan. Pada kasus translasi murni tanpa rotasi orientasi, sudut-sudut wrist bisa diambil nol agar menjadi solusi sederhana.

3.5.2 Solusi Numerik

Selain pendekatan geometris, inverse kinematics juga bisa diselesaikan dengan metode numerik. Metode ini tidak mencari solusi dengan rumus langsung, melainkan menggunakan proses perhitungan berulang (iterasi) hingga diperoleh posisi joint yang sesuai dengan target end-effector.

Inti dari metode numerik adalah mencoba-coba (*trial*) nilai sudut joint, kemudian menghitung posisi end-effector menggunakan forward kinematics. Jika posisi hasil perhitungan belum sesuai dengan target, maka nilai joint diperbaiki sedikit demi sedikit, sampai error posisi cukup kecil (mendekati target).

Dalam praktiknya, solusi numerik inverse kinematics banyak dibantu oleh software simulasi atau library. Software simulasi atau library yang umum digunakan yaitu seperti MATLAB Robotics Toolbox, ROS + MoveIt, atau Python dengan library ikpy. Pertama, robot dimodelkan berdasarkan parameter Denavit-Hartenberg untuk memperoleh persamaan forward kinematics. Selanjutnya, ditentukan target posisi dan orientasi end-effector yang menjadi input bagi algoritma IK (Inverse Kinematics). Proses perhitungan dilakukan secara iteratif dengan metode Jacobian Pseudo-Inverse, dimulai dari tebakan awal sudut joint, lalu menghitung posisi end-effector saat ini, menentukan error terhadap target, dan memperbaiki nilai sudut joint hingga error semakin kecil. Iterasi ini berlanjut sampai sistem konvergen, sehingga diperoleh solusi sudut tiap joint yang dapat digunakan langsung untuk menggerakkan robot.

3.6 Manufaktur

Tahap manufaktur merupakan proses realisasi desain dari model digital menjadi komponen fisik. Proses ini dilakukan di *teaching factory* (Tefa) kampus dengan

memanfaatkan mesin dan fasilitas yang tersedia. Pada penelitian ini, metode manufaktur yang digunakan meliputi proses CNC milling, CNC turning, FDM 3D *printing*, dan DLP 3D *printing*.

3.6.1 Proses CNC milling

CNC milling digunakan untuk membuat komponen berbahan aluminium dengan bentuk planar, seperti base plate, soulder, dan elbow. Proses ini dilakukan dengan mesin CNC tiga sumbu menggunakan material aluminium 6061 dan 5052. Dengan bantuan CAM (*Computer Aided Manufacturing*) menggunakan software Fusion 360 dan jalur pemotongan (*toolpath*) dihasilkan dari model CAD.

3.6.2 Proses CNC *turning*

CNC turning dipakai untuk memproduksi komponen berbentuk silinder atau simetris rotasi, seperti shaft, spacer, dan dudukan bearing. Material utama yang digunakan berupa aluminium 6061 dan 5052. Proses permesinan ini memungkinkan pembuatan diameter luar dan dalam dengan presisi serta penyelesaian permukaan yang halus. Dengan bantuan CAM (*Computer Aided Manufacturing*) menggunakan software Fusion 360 dan jalur pemotongan (*toolpath*) dihasilkan dari model CAD.

3.6.3 Proses FDM 3D *printing*

Fused Deposition Modeling (FDM) digunakan untuk memproduksi komponen non-struktural dan bagian dengan bentuk kompleks yang sulit dibuat menggunakan proses CNC. Material yang digunakan yaitu PLA karena sifatnya mudah dicetak. Proses ini dimulai dari slicing model CAD menjadi lapisan tipis (layer) menggunakan

software Ultimaker Cura, kemudian filament dilelehkan dan disusun lapis demi lapis hingga terbentuk benda utuh. FDM dipilih karena fleksibilitas, biaya rendah, dan tanpa operator.

3.6.4 Proses DLP 3D *printing*

Digital Light Processing (DLP) 3D *printing* digunakan untuk mencetak komponen dengan detail tinggi dan ukuran relatif kecil, misalnya permukaan gigi pulley atau gear torsi kecil.