BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan bab ini meliputi evaluasi hasil perancangan melalui validasi desain dan kalkulasi torsi keluaran setiap joint, analisis kekuatan komponen mekanik pada baut dan poros joint utama, simulasi kinematika dan dinamika menggunakan Gazebo, serta dokumentasi proses manufaktur dan hasil akhir perakitan robot arm.

4.1 Evaluasi Hasil Perancangan

Evaluasi terhadap hasil perancangan bertujuan untuk memastikan bahwa rancangan memenuhi kebutuhan spesifikasi teknis serta mampu berfungsi dengan tujuan perancangan. Evaluasi dilakukan melalui validasi desain, analisis kekuatan komponen, dan simulasi dinamis.

4.1.1 Validasi Desain

Validasi desain dilakukan untuk memastikan bahwa hasil rancangan robot arm 6-DOF yang telah dibuat memenuhi kebutuhan dan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Validasi ini mencakup konfigurasi derajat kebebasan, jangkauan gerak, dan payload. Pada tahap ini, desain robot arm dibandingkan dengan spesifikasi awal yang telah dirumuskan pada Bab III.

Jumlah Derajat Kebebasan (DOF)



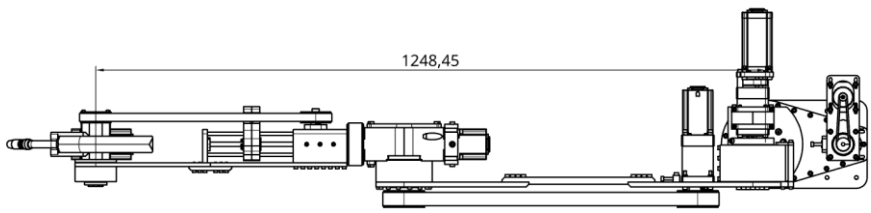
Gambar 4.1 Joints Translasi



Gambar 4.2 Joints Rotasi

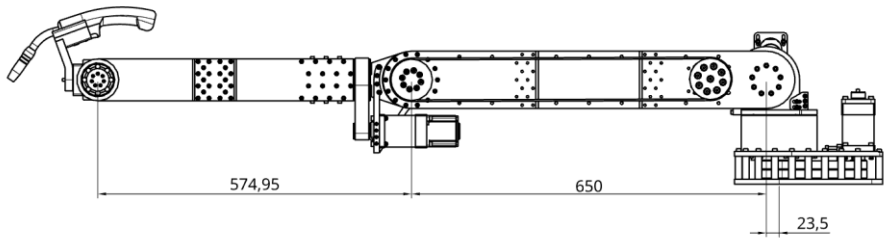
Pada desain akhir, robot arm ini menggunakan konfigurasi Articulated (*Anthropomorphic Configuration*). Konfigurasi ini dipilih karena memiliki fleksibilitas gerak yang tinggi serta mampu menjangkau area kerja yang luas sesuai kebutuhan aplikasi. Sistem ini memiliki enam derajat kebebasan (6-DOF) yang terdiri dari tiga joint yang menentukan posisi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1, dan tiga joint yang menentukan orientasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2. Kombinasi keenam derajat kebebasan tersebut memungkinkan end-effector untuk mencapai hampir seluruh titik di dalam ruang kerja sekaligus mempertahankan orientasi sesuai dengan kebutuhan operasi. Pemilihan konfigurasi ini telah sesuai dengan spesifikasi teknis dan tujuan perancangan yang telah dirumuskan pada Bab III.

Jangkauan Kerja Maksimum



Gambar 4.3 Jangkauan Maksimum

Jangkauan kerja maksimum atau *workspace linear* (*reach*) merupakan jarak lurus terjauh yang dapat dicapai oleh end-effector dari titik basis robot. Pada desain akhir, robot arm ini memiliki reach sepanjang 1248,45 mm (1,2485 m) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.4 Konfigurasi Geometris

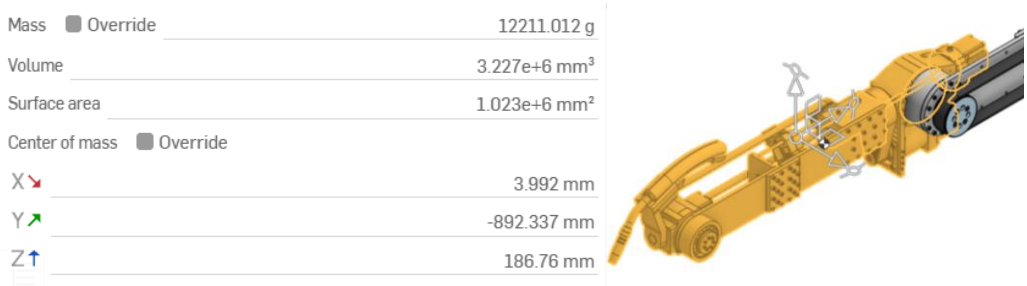
Nilai reach tersebut diperoleh berdasarkan konfigurasi geometris yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, yaitu panjang lengan bawah sebesar 650 mm, panjang lengan atas sebesar 574,95 mm, serta link offset antara Joint 1 dan Joint 2 sebesar 23,5 mm. Jika dibandingkan dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan pada Bab III, yaitu target jangkauan minimum 1,2 m, maka hasil desain ini telah memenuhi kebutuhan yang direncanakan.

Payload

Kemampuan payload divalidasi melalui perhitungan torsi dengan memastikan bahwa torsi keluaran motor setelah reduksi gearbox mampu melampaui nilai torsi reaksi akibat beban payload dan massa struktur robot itu sendiri. Validasi ini difokuskan pada Joint 1, Joint 2, dan Joint 3 karena joints tersebut merupakan bagian utama yang menanggung beban terbesar dari keseluruhan struktur lengan. Hasil perbandingan antara torsi aktual dan torsi kebutuhan menjadi dasar untuk menentukan apakah konfigurasi aktuator, gearbox, dan rancangan mekanik telah memadai untuk mendukung payload sesuai spesifikasi.

Untuk memvalidasi bahwa torsi keluaran pada Joint mampu melampaui nilai torsi reaksi akibat beban payload dan massa struktur robot, diperlukan informasi massa total struktur yang ditanggung oleh joint tersebut. Massa struktur diperoleh dengan mendefinisikan material pada setiap komponen dalam model desain, sehingga perangkat lunak CAD dapat menghitung massa total gabungan beserta posisi pusat massanya (*center of mass*).

4.1.2 Kalkulasi Torsi Keluaran Joint 3



Gambar 4.5 Massa Gabungan Joint 3

Berdasarkan hasil perhitungan perangkat lunak, nilai massa gabungan struktur yang ditanggung oleh Joint 3, termasuk payload sebesar 2 kg pada welding torch, ditunjukkan pada Gambar 4.5 dengan total massa sebesar 12211,0 g.

Posisi center of mass dari massa gabungan tersebut berada pada jarak 892,2 mm dari titik basis robot. Sumbu rotasi Joint 3 terletak pada panjang lengan bawah ditambah link offset antara Joint 1 dan Joint 2. Maka jarak antara center of mass dan sumbu rotasi Joint 3 adalah 218,7 mm.

Dengan menggunakan percepatan gravitasi sebesar 9,8 m/s², torsi reaksi yang bekerja pada Joint 3 dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.1 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 3 = $m_{J3} = 12\,211{,}0\text{ g} = 12{,}211\text{ kg}$

Jarak CoG ke sumbu Joint 3 = $r_{J3} = 218{,}7 \text{ mm} = 0{,}2187 \text{ m}$

$$\tau_{J3} = m_{J3} \cdot g \cdot r_{J3} \quad (4.1)$$
$$\tau_{J3} = 12{,}211 \times 9{,}8 \times 0{,}2187$$
$$\tau_{J3} = 26{,}18 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Nilai torsi reaksi sebesar 26,18 Nm ini kemudian menjadi kebutuhan torsi minimum Joint 3.

Perhitungan torsi keluaran total pada Joint 3 merupakan hasil dari kombinasi aktuator dan sistem transmisi yang digunakan. Pada konfigurasi ini, Joint 3 menggunakan stepper motor tipe 23HS8328 dengan torsi nominal sebesar 2,2 Nm. Torsi tersebut kemudian diperkuat melalui sistem reduksi, yaitu planetary gearbox dengan rasio 50:1 dan timing belt HTD3M W25 dengan rasio 1:1. Setiap transmisi diasumsikan memiliki efisiensi konservatif sebesar 0,9. Maka besarnya torsi keluaran akhir Joint 3 dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.2 berikut.

Diketahui:

Torsi nominal motor J3 = $T_{m3} = 2{,}2 \text{ N} \cdot \text{m}$

Rasio planetary gearbox = $i_{J3-g} = 50$

Rasio timing belt = $i_{J3-b} = 1$

Efisiensi planetary gearbox (konservatif) = $\eta_{J3-g} = 0{,}9$

Efisiensi timing belt (konservatif) = $\eta_{J3-b} = 0{,}9$

$$T_{J3} = T_{m3} \cdot i_{J3-g} \cdot i_{J3-b} \cdot \eta_{J3-g} \cdot \eta_{J3-b} \quad (4.2)$$
$$T_{J3} = 2{,}2 \times 50 \times 1 \times 0{,}9 \times 0{,}9$$
$$T_{J3} = 89{,}1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Nilai torsi keluaran Joint 3 ini kemudian menjadi acuan untuk menentukan apakah torsi keluaran Joint 3 mampu melampaui torsi reaksi Joint 3. Maka, persyaratan

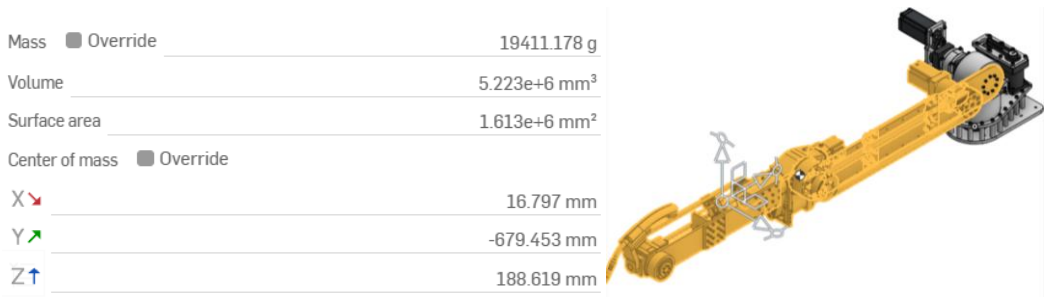
validasi dinyatakan terpenuhi apabila.

$$T_{J3} \geq \tau_{J3} \tag{4.3}$$

$$SF = \frac{T_{J3}}{\tau_{J3}} = \frac{89,1}{26,1} = 3,40$$

Berdasarkan Persamaan 4.3, dapat disimpulkan bahwa torsi keluaran Joint 3 pada desain akhir robot arm mampu melampaui kebutuhan torsi minimum untuk mengangkat payload sebesar 2 kg dengan safety factor sebesar 3,4. Maka kemampuan daya angkat Joint 3 telah memenuhi spesifikasi desain yang dirumuskan pada Bab III.

4.1.3 Kalkulasi Torsi Keluaran Joint 2



Gambar 4.6 Massa Gabungan Joint 2

Berdasarkan hasil perhitungan perangkat lunak, nilai massa gabungan struktur yang ditanggung oleh Joint 2, termasuk payload sebesar 2 kg pada welding torch, ditunjukkan pada Gambar 4.6 dengan total massa sebesar 19411,2 g.

Posisi center of mass dari massa gabungan tersebut berada pada jarak 679,5 mm dari titik basis robot. Sumbu rotasi Joint 2 terletak pada panjang link offset antara Joint 1 dan Joint 2. Maka jarak antara center of mass dan sumbu Joint 2 adalah 652,0 mm.

Dengan menggunakan percepatan gravitasi sebesar 9,8 m/s², torsi reaksi yang bekerja pada Joint 2 dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.4 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 2 = $m_{J2} = 19411{,}2\ \text{g} = 19{,}4112\ \text{kg}$

Jarak CoG ke sumbu Joint 2 = $r_{J2} = 652\ \text{mm} = 0{,}652\ \text{m}$

$$\tau_{\text{J2}} = m_{J2} \cdot g \cdot r_{J2} \tag{4.4}$$

$$\tau_{\text{J2}} = 19{,}4112 \times 9{,}8 \times 0{,}652$$

$$\tau_{\text{J2}} = 124{,}03\ \text{N} \cdot \text{m}$$

Nilai torsi reaksi sebesar 124,03 Nm ini kemudian menjadi kebutuhan torsi minimum Joint 2.

Joint 2 menggunakan stepper motor tipe 5718HB6401 dengan torsi nominal sebesar 3,6 Nm. Torsi tersebut kemudian diperkuat melalui sistem reduksi, yaitu timing belt GT2 W10 dengan rasio 4:1 dan planetary gearbox dengan rasio 50:1. Setiap transmisi diasumsikan memiliki efisiensi konservatif sebesar 0,9. Maka besarnya torsi keluaran akhir Joint 2 dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.5 berikut.

Diketahui:

Torsi nominal motor J2 = $T_{m2} = 3{,}6\ \text{N} \cdot \text{m}$

Rasio timing belt = $i_{J2-b} = 4$

Rasio planetary gearbox = $i_{J2-g} = 50$

Efisiensi timing belt (konservatif) = $\eta_{J2-b} = 0{,}9$

Efisiensi planetary gearbox (konservatif) = $\eta_{J2-g} = 0{,}9$

$$T_{\text{J2}} = T_{m2} \cdot i_{J2-b} \cdot i_{J2-g} \cdot \eta_{J2-b} \cdot \eta_{J2-g} \tag{4.5}$$

$$T_{\text{J2}} = 3{,}6 \times 4 \times 50 \times 0{,}9 \times 0{,}9$$

$$T_{\text{J2}} = 583{,}2\ \text{N} \cdot \text{m}$$

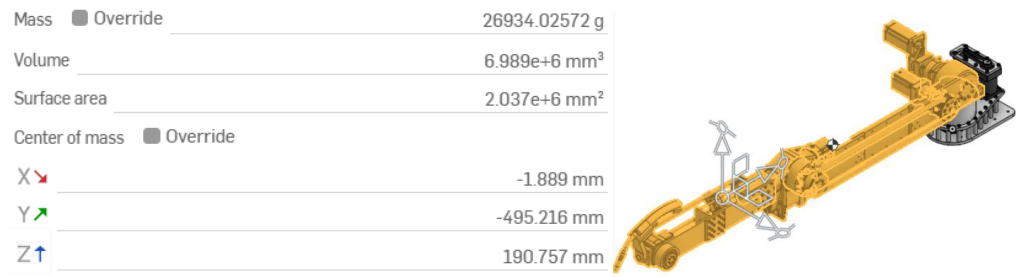
Nilai torsi keluaran Joint 2 ini menjadi acuan untuk menentukan apakah torsi keluaran Joint 2 mampu melampaui torsi reaksi Joint 2. Dengan kata lain, persyaratan validasi dinyatakan terpenuhi apabila.

$$T_{J2} \geq \tau_{J2} \tag{4.6}$$

$$SF = \frac{T_{J2}}{\tau_{J2}} = \frac{583,2}{124,03} = 4,70$$

Berdasarkan Persamaan 4.6, dapat disimpulkan bahwa torsi keluaran Joint 2 pada desain akhir robot arm mampu melampaui kebutuhan torsi minimum untuk mengangkat payload sebesar 2 kg dengan safety factor sebesar 4,7. Dengan demikian, kemampuan daya angkat Joint 2 telah memenuhi spesifikasi desain yang dirumuskan pada Bab III.

4.1.4 Kalkulasi Torsi Keluaran Joint 1



Gambar 4.7 Massa Gabungan Joint 1

Berdasarkan hasil perhitungan perangkat lunak, nilai massa gabungan struktur yang ditanggung oleh Joint 1, termasuk payload sebesar 2 kg pada welding torch, ditunjukkan pada Gambar 4.7 dengan total massa sebesar 26934,0 g.

Posisi center of mass dari massa gabungan tersebut berada pada jarak 495,2 mm dari titik basis robot. Sumbu rotasi Joint 1 terletak pada titik nol basis robot. Maka jarak antara center of mass dan sumbu rotasi Joint 1 adalah 495,2 mm. Sumbu Joint 1 mengarah vertikal sehingga pada kondisi statis tidak menghasilkan torsi reaksi akibat massa gabungan, maka torsi reaksinya nol.

Joint 1 tetap harus mampu mengatasi torsi inersia yang timbul saat mengakselerasi seluruh massa struktur di atasnya. Momen inersia massa gabungan

terhadap sumbu rotasi Joint 1 dihitung menggunakan Persamaan 4.7 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 1 = $m_{J1} = 26934{,}0 \text{ g} = 26{,}934 \text{ kg}$

Jarak CoG ke sumbu Joint 1 = $r_{J1} = 495{,}2 \text{ mm} = 0{,}4952 \text{ m}$

$$I = m \times r^2 \tag{4.7}$$
$$I = 26{,}934 \times 0{,}4952^2$$
$$I = 26{,}934 \times 0{,}2452$$
$$I = 6{,}604 \; kg \cdot m^2$$

Dengan mengambil nilai acuan percepatan sudut tipikal robot arm industri sebesar 5-10 rad/s² (Craig et al., 2005), torsi inersia yang dibutuhkan Joint 1 dihitung menggunakan Persamaan 4.8 berikut. Nilai torsi inersia sebesar 66,04 Nm ini kemudian menjadi kebutuhan torsi minimum Joint 1.

Diketahui:

Momen inersia Joint 1 = $I_{J1} = 6{,}604 \; kg \cdot m^2$

Percepatan sudut Joint 1 = $\alpha_{J1} = 10 \text{ rad/s}^2$

$$\tau_{\text{inersia}} = I \times \alpha \tag{4.8}$$
$$\tau_{\text{inersia}} = 6{,}604 \times 10$$
$$\tau_{\text{inersia}} = 66{,}04 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Joint 1 menggunakan stepper motor tipe 23HS8328 dengan torsi nominal sebesar 2,2 Nm. Torsi tersebut kemudian diperkuat melalui sistem reduksi, yaitu timing belt GT2 W10 dengan rasio 9:5, planetary gearbox dengan rasio 50:1, dan timing belt double paralel HTD3M W15 dengan rasio 5:2. Setiap transmisi diasumsikan memiliki efisiensi konservatif sebesar 0,9. Maka besarnya torsi keluaran akhir Joint 1 dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.7 berikut.

Diketahui:

Torsi nominal motor J1	=	$T_{m1} = 2{,}2\ \text{N} \cdot \text{m}$
Rasio timing belt 1	=	$i_{J1-b1} = 1{,}8$
Rasio planetary gearbox	=	$i_{J1-g} = 50$
Rasio timing belt 2	=	$i_{J1-b2} = 2{,}5$
Efisiensi timing belt 1 (konservatif)	=	$\eta_{J1-b1} = 0{,}9$
Efisiensi planetary gearbox (konservatif)	=	$\eta_{J1-g} = 0{,}9$
Efisiensi timing belt 2 (konservatif)	=	$\eta_{J1-b2} = 0{,}9$

$$T_{\text{J1}} = T_{m1} \cdot i_{J1-b1} \cdot i_{J1-g} \cdot i_{J1-b2} \cdot \eta_{J1-b1} \cdot \eta_{J1-g} \cdot \eta_{J1-b2} \tag{4.9}$$
$$T_{\text{J1}} = 2{,}2 \times 1{,}8 \times 50 \times 2{,}5 \times 0{,}9 \times 0{,}9 \times 0{,}9$$
$$T_{\text{J1}} = 360{,}86\ \text{N} \cdot \text{m}$$

Nilai torsi keluaran Joint 1 ini kemudian menjadi acuan untuk menentukan apakah torsi keluaran Joint 1 mampu melampaui torsi inersia Joint 1. Dengan kata lain, persyaratan validasi dinyatakan terpenuhi apabila.

$$SF = \frac{\tau_{output}}{\tau_{inersia}} \tag{4.10}$$
$$SF = \frac{360{,}86}{66{,}04}$$
$$SF = 5{,}46$$

Berdasarkan Persamaan 4.10, dapat disimpulkan bahwa torsi keluaran Joint 1 mampu melampaui kebutuhan torsi inersia untuk mengakselerasi seluruh massa di atasnya dengan safety factor sebesar 5,46. Maka kemampuan daya gerak Joint 1 telah memenuhi spesifikasi desain yang dirumuskan pada Bab III.

4.1.5 Kalkulasi Konsumsi Power Motor

Konsumsi power motor dihitung untuk mengetahui total kebutuhan daya listrik dari seluruh aktuator saat beroperasi. Informasi ini diperlukan sebagai acuan dalam

perancangan sistem power supply pada bagian elektronik robot. Robot ini menggunakan mode *microstepping*, namun perhitungan konsumsi power dilakukan dengan asumsi *full-step two phase on* sebagai pendekatan konservatif, yaitu kedua fase motor aktif pada arus penuh secara bersamaan. Konsumsi power maksimum per motor dihitung menggunakan Persamaan 4.11 berikut.

Motor 5718HB6401 (Joint 2)

Diketahui:

Rated voltage = $V = 24$ V

Rated current per fase = $I = 4\ A$

Jumlah fase aktif = $n_{fase} = 2$

Jumlah motor = $1\ unit$

$$P_{J2} = 24 \times 4 \times 2 = 192 \text{ W} \tag{4.11}$$

Motor 23HS8328 (Joint 1 dan Joint 3)

Diketahui:

Rated voltage = $V = 24$ V

Rated current per fase = $I = 3\ A$

Jumlah fase aktif = $n_{fase} = 2$

Jumlah motor = $2\ unit$

$$P_{J1,J3} = 24 \times 3 \times 2 = 144 \text{ W/motor} \tag{4.12}$$

$$P_{J1,J3\ \text{total}} = 144 \times 2 = 288 \text{ W}$$

Motor 23HS5628 (Joint 4, Joint 5, dan Joint 6)

Diketahui:

Rated voltage = $V = 24$ V

Rated current per fase = $I = 2.8\ A$

Jumlah fase aktif = $n_{fase} = 2$

Jumlah motor = $3\ unit$

$$P_{J4,J5,J6} = 24 \times 2.8 \times 2 = 134.4 \text{ W/motor} \quad (4.13)$$

$$P_{J4,J5,J6\ \text{total}} = 134.4 \times 3 = 403.2 \text{ W}$$

Total Konsumsi Power

Total konsumsi power maksimum dari seluruh motor dihitung menggunakan Persamaan 4.14 berikut.

$$P_{total} = P_{J2} + P_{J1,J3\ \text{total}} + P_{J4,J5,J6\ \text{total}} \quad (4.14)$$

$$P_{total} = 192 + 288 + 403{,}2$$

$$P_{total} = 883{,}2\ W$$

Berdasarkan Persamaan 4.14, total konsumsi power maksimum seluruh motor sebesar 883,2 W. Nilai ini merupakan kondisi seluruh motor beroperasi pada arus penuh, sehingga dapat digunakan sebagai acuan minimum kapasitas power supply dalam perancangan sistem elektronik robot.

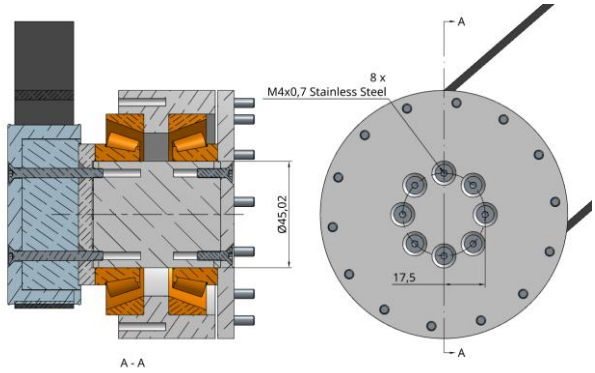
4.2 Kalkulasi Kekuatan Komponen Mekanik

Pada bagian ini difokuskan untuk menganalisis pada elemen-elemen kritis yang berhubungan langsung dengan joints, khususnya baut pengunci platform, poros atau spindle joint, dan bearing. Lalu dilanjutkan dengan simulasi FEA untuk memverifikasi distribusi tegangan dan deformasi. Tujuan utamanya adalah memastikan bahwa tiap elemen mampu menahan beban statis. Analisis ini difokuskan pada Joint 1, Joint 2, dan Joint 3, karena joints tersebut merupakan struktur utama yang menanggung beban terbesar dari robot arm. Sementara itu, Joint 4, Joint 5, dan Joint 6 tidak termasuk dalam analisis kekuatan utama karena ketiganya berfungsi sebagai wrist joints yang

hanya mengatur orientasi end-effector, sehingga risiko kegagalan strukturalnya jauh lebih rendah.

4.2.1 Kalkulasi Baut Joint 3

Kalkulasi baut difokuskan pada baut yang berfungsi mengunci platform dengan poros pada masing-masing joint. Baut dianalisis terhadap dua faktor kegagalan utama, yaitu antara tegangan tarik atau tegangan geser.



Gambar 4.8 Detail Joint 3

Telah diketahui pada perhitungan sebelumnya, nilai torsi keluaran total Joint 3 sebesar 89,1 Nm. Pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa Joint 3 terdapat 8 baut M4×0,7 stainless steel yang tersusun melingkar mengelilingi sumbu joint, dengan jarak masing-masing baut terhadap titik pusat sumbu sebesar 17,5 mm. Selanjutnya, nilai tegangan geser pada masing-masing baut dihitung menggunakan Persamaan 4.15 berikut.

Diketahui:

Torsi keluaran total Joint 3	=	$T_{J3} = 89{,}1\ \text{N} \cdot \text{m}$
Jumlah baut	=	$n_{Bolt-J3} = 8\ baut$
Jarak baut ke sumbu joint	=	$r_{Bolt-J3} = 17{,}5\ \text{mm} = 0{,}0175\ \text{m}$
Diameter nominal baut	=	$d_{M4} = 4\ mm$
Standard yield strength	=	$\sigma_{Yield-SS} \approx 450\ \text{MPa}$

baut stainless steel

Luas penampang geser baut diasumsikan menggunakan luas batang baut (*shank*):

$$A_{M4} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(4)^2}{4} = 12{,}57 \text{ mm}^2 = 12{,}57 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Tegangan geser izin baut umumnya diambil secara konservatif sebesar:

$$\tau_{\text{Bolt-SS}} = 0{,}6\sigma_{Yield-SS}$$
$$\tau_{\text{Bolt-SS}} = 0{,}6 \times 450 = 270 \text{ MPa}$$

Tegangan geser pada masing-masing baut akibat torsi:

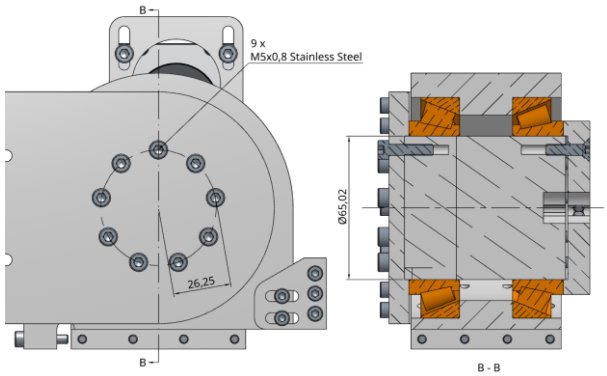
$$\tau_{Bolt-J3} = \frac{T}{n \cdot r \cdot A} \quad (4.15)$$
$$\tau_{Bolt-J3} = \frac{89{,}1}{8 \times 0{,}0175 \times 12{,}57 \times 10^{-6}}$$
$$\tau_{Bolt-J3} = 50{,}7 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Nilai tegangan geser ini menjadi acuan untuk menentukan apakah tegangan geser material baut mampu menahan beban. Maka persyaratan validasi dinyatakan terpenuhi apabila.

$$\tau_{\text{Bolt-SS}} \geq \tau_{Bolt-J3} \quad (4.16)$$
$$\text{SF} = \frac{\tau_{\text{Safe-M4}}}{\tau_{\text{Bolt-J3}}}$$
$$\text{SF} = \frac{270}{50{,}7} = 5{,}33$$

Berdasarkan Persamaan 4.16, nilai tegangan geser yang terjadi pada baut masih berada di bawah batas tegangan izin material, dengan safety factor sebesar 5,33. Sehingga baut Joint 3 dikategorikan aman terhadap kegagalan struktur.

4.2.2 Kalkulasi Baut Joint 2



Gambar 4.9 Detail Joint 2

Telah diketahui pada perhitungan sebelumnya, nilai torsi keluaran total Joint 2 sebesar 583,2 Nm. Pada Gambar 4.9 menunjukkan bahwa Joint 2 terdapat 9 baut M5×0,8 stainless steel yang tersusun melingkar mengelilingi sumbu joint, dengan jarak masing-masing baut terhadap titik pusat sumbu sebesar 26,25 mm. Selanjutnya, nilai tegangan geser pada masing-masing baut dihitung menggunakan Persamaan 4.17 berikut.

Diketahui:

Torsi keluaran total Joint 2	=	$T_{J2} = 583{,}2\ \text{N} \cdot \text{m}$
Jumlah baut	=	$n_{Bolt-J2} = 9\ baut$
Jarak baut ke sumbu joint	=	$r_{Bolt-J2} = 26{,}25\ \text{mm} = 0.02625\ \text{m}$
Diameter nominal baut	=	$d_{M5} = 5\ mm$
Tegangan geser izin baut stainless steel	=	$\tau_{Bolt\text{-SS}} = 270\ \text{MPa}$

Luas penampang geser baut diasumsikan menggunakan luas batang baut (shank):

$$A_{M5} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(5)^2}{4} = 19.63\ \text{mm}^2 = 19.63 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

Tegangan geser pada masing-masing baut akibat torsi:

$$\tau_{Bolt-J2} = \frac{T}{n \cdot r \cdot A} \tag{4.17}$$

$$\tau_{Bolt-J2} = \frac{583.2}{9 \times 0.02625 \times 19.63 \times 10^{-6}}$$

$$\tau_{Bolt-J2} = 125.7 \times 10^{6} \text{ Pa}$$

Nilai tegangan geser ini menjadi acuan untuk menentukan apakah tegangan geser material baut mampu menahan beban. Maka persyaratan validasi dinyatakan terpenuhi apabila.

$$\tau_{\text{Bolt-SS}} \geq \tau_{Bolt-J2} \tag{4.18}$$

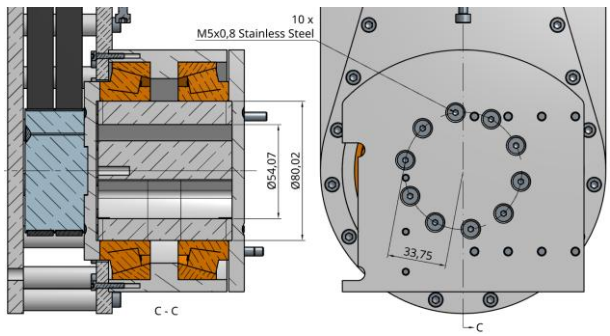
$$\text{SF} = \frac{\tau_{\text{Bolt-SS}}}{\tau_{\text{Bolt-J2}}}$$

$$\text{SF} = \frac{270}{125{,}7} = 2{,}15$$

Berdasarkan Persamaan 4.18, nilai tegangan geser yang terjadi pada baut masih berada di bawah batas tegangan izin material, dengan safety factor sebesar 2,15. Sehingga baut Joint 2 dikategorikan aman terhadap kegagalan struktur.

4.2.3 Kalkulasi Baut Joint 1

Telah diketahui pada perhitungan sebelumnya, massa gabungan yang ditanggung oleh Joint 1 adalah sebesar 26934,0 g. Jarak antara center of mass dan sumbu rotasi Joint 1 adalah sebesar 495,2 mm. Nilai torsi keluaran total Joint 1 sebesar 360,86 Nm.



Gambar 4.10 Detail Joint 1

Pada Joint 1 terdapat 10 baut M5×0,8 stainless steel yang tersusun melingkar mengelilingi sumbu joint, dengan jarak masing-masing baut terhadap titik pusat sumbu sebesar 33,75 mm. Selanjutnya, nilai tegangan tarik pada masing-masing baut dihitung menggunakan Persamaan 4.19 dan Persamaan 4.20 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 1	=	$m_{J1} = 26934{,}0 \text{ g} = 26{,}934 \text{ kg}$
Jarak CoG ke sumbu Joint 1	=	$r_{J1} = 495{,}2 \text{ mm} = 0{,}4952 \text{ m}$
Torsi keluaran total Joint 1	=	$T_{J1} = 360{,}86 \text{ N} \cdot \text{m}$
Jumlah baut	=	$n_{Bolt-J1} = 10\ baut$
Jarak baut ke sumbu joint	=	$r_{Bolt-J1} = 33{,}75 \text{ mm} = 0.03375 \text{ m}$
Diameter nominal baut	=	$d_{M5} = 5\ mm$
Luas penampang baut	=	$A_{M5} = 19.63 \text{ mm}^2 = 19.63 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
Tegangan tarik izin baut stainless steel	=	$\sigma_{Bolt\text{-SS}} = 270 \text{ MPa}$

Keseimbangan momen antara beban dengan baut:

$$M_{Load} = M_{\text{Bolt}} \tag{4.19}$$
$$M_{Load} = \sum\left(F_{Bolt-J2,i} \cdot r_{Bolt-J1,i}\right)$$

Karena $F_{Bolt-J2,i}$ sebanding dengan $r_{Bolt-J1,i}$, maka secara umum dapat ditulis $F_{Bolt-J2,i} = k \cdot r_{Bolt-J1,i}$. k merupakan konstanta distribusi.

$$M_{Load} = \sum\left(k \cdot r_{Bolt-J1,i} \cdot r_{Bolt-J1,i}\right)$$
$$M_{Load} = k \sum r_{Bolt-J1,i}^2$$
$$k = \frac{M_{Load}}{\sum r_{Bolt-J1,i}^2}$$

Untuk sambungan baut melingkar yang menerima momen lentur, gaya tarik maksimum pada baut terluar dapat dihitung dengan:

$$r_{Bolt-J1} = r_{\text{max}}$$

$$F_{Bolt-J1,\max} = k \cdot r_{Bolt-J1}$$

$$F_{Bolt-J1,\max} = \frac{M_{Load} \cdot r_{Bolt-J1}}{\sum r_{Bolt-J1,i}^2}$$

Karena semua baut berada pada radius yang sama, maka:

$$r_{Bolt-J1,1} = r_{Bolt-J1,2} = \cdots = r_{Bolt-J1,n} = r_{Bolt-J1}$$

$$\sum r_{Bolt-J1,i}^2 = r_{Bolt-J1}^2 + r_{Bolt-J1}^2 + \cdots + r_{Bolt-J1}^2 = n_{Bolt-J1} \cdot r_{Bolt-J1}^2$$

Sehingga:

$$F_{Bolt-J1,\max} = \frac{M_{Load} \cdot r_{Bolt-J1}}{n_{Bolt-J1} \cdot r_{Bolt-J1}^2}$$

$$F_{Bolt-J1,\max} = \frac{M_{Load}}{n_{Bolt-J1} \cdot r_{Bolt-J1}}$$

$$F_{Bolt-J1,\max} = \frac{m_{J1} \cdot g \cdot r_{J1}}{n_{Bolt-J1} \cdot r_{Bolt-J1}}$$

$$F_{Bolt-J1,\max} = \frac{26{,}934 \times 9{,}8 \times 0{,}4952}{10 \times 0.03375} = 387.3 \text{ N}$$

Maka, tegangan tarik pada masing-masing baut:

$$\sigma_{Bolt-J1} = \frac{F_{Bolt-J1,\max}}{A_{M5}} \quad (4.20)$$

$$\sigma_{Bolt-J1} = \frac{387.3}{19.63 \times 10^{-6}}$$

$$\sigma_{Bolt-J1} = 19.7 \text{ MPa}$$

Nilai tegangan tarik ini menjadi acuan untuk menentukan apakah tegangan tarik material baut mampu menahan beban. Maka persyaratan validasi dinyatakan terpenuhi apabila:

$$\sigma_{\text{Bolt-SS}} \geq \sigma_{Bolt-J1} \quad (4.21)$$

$$SF = \frac{\sigma_{\text{Bolt-SS}}}{\sigma_{Bolt-J1}}$$

$$SF = \frac{270}{19.7} = 13.7$$

Berdasarkan Persamaan 4.21, nilai tegangan tarik yang terjadi pada baut masih

berada di bawah batas tegangan izin material, dengan safety factor sebesar 13,7. Sehingga baut Joint 1 dikategorikan aman terhadap kegagalan struktur.

4.2.4 Kalkulasi Poros Joint 3

Komponen poros atau spindle pada joint dianalisis terhadap tegangan puntir yang timbul akibat torsi operasional pada setiap joint. Torsi yang bekerja didasarkan pada nilai torsi keluaran total yang telah ditentukan dari analisis sebelumnya. Tegangan puntir maksimum dihitung dan dibandingkan dengan kekuatan geser material poros untuk memastikan bahwa nilai tegangan berada dalam batas aman.

Telah diketahui pada perhitungan sebelumnya, torsi keluaran total dari Joint 3 sebesar 89,1 Nm. Poros pada Joint 3 berbentuk silinder pejal dengan diameter 45,02 mm dan berbahan material Aluminium 6061. Selanjutnya, nilai tegangan puntir pada poros dihitung menggunakan Persamaan 4.22 berikut.

Diketahui:

Torsi keluaran total Joint 3	=	$T_{J3} = 89{,}1 \text{ N} \cdot \text{m}$
Diameter poros Joint 3	=	$d_{Poros-J3} = 45{,}02\ mm = 0{,}04502\ m$
Standard yield strength aluminium 6061	=	$\sigma_{Yield-Aluminium} \approx 276$ MPa

Dalam analisis puntir, tegangan geser izin umumnya diambil secara konservatif:

$\tau_{\text{Izin-Al}} = 0{,}58\ \sigma_{Yield-SS}$

$\tau_{\text{Izin-Al}} = 0{,}58 \times 276 = 160{,}1$ MPa

Momen inersia polar silinder pejal:

$$J_{J3} = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$J_{J3} = \frac{\pi(0.04502)^4}{32} = 4.02 \times 10^{-7}\ \text{m}^4$$

Tegangan geser maksimum akibat puntir:

$$\tau_{\text{Poros-J3}} = \frac{T_{J3} \cdot r_{Poros-J3}}{J_{J3}} \quad (4.22)$$

$$\tau_{\text{Poros-J3}} = \frac{89.1 \times 0.02251}{4.02 \times 10^{-7}}$$

$$\tau_{\text{Poros-J3}} = 4.99 \times 10^{6}\ \text{Pa}$$

$$\tau_{\text{Poros-J3}} = 4.99 MPa$$

Berdasarkan Persamaan 4.22, tegangan puntir yang terjadi pada poros Joint 3 berada di bawah batas tegangan izin material Aluminium 6061, sehingga poros Joint 3 dinyatakan aman terhadap kegagalan struktur.

4.2.5 Kalkulasi Poros Joint 2

Telah diketahui pada perhitungan sebelumnya, torsi keluaran total dari Joint 2 sebesar 583,2 Nm. Poros pada Joint 2 berbentuk silinder pejal dengan diameter 65,02 mm dan berbahan material Aluminium 6061. Selanjutnya, nilai tegangan puntir pada poros dihitung menggunakan Persamaan 4.23 berikut.

Diketahui:

Torsi keluaran total Joint 2	=	$T_{J2} = 583{,}2\ \text{N} \cdot \text{m}$
Diameter poros Joint 2	=	$d_{Poros-J2} = 65{,}02\ mm = 0{,}06502\ m$
Tegangan puntir izin aluminium 6061	=	$\tau_{\text{Izin-Al}} = 160{,}1\ \text{MPa}$

Momen inersia polar silinder pejal:

$$J_{J2} = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$J_{J2} = \frac{\pi(0.06502)^4}{32} = 1.76 \times 10^{-6}\ \text{m}^4$$

Tegangan geser maksimum akibat puntir:

$$\tau_{\text{Poros-J2}} = \frac{T_{\text{J2}} \cdot r_{\text{Poros-J2}}}{J_{J2}} \quad (4.23)$$

$$\tau_{\text{Poros-J2}} = \frac{583.2 \times 0.03251}{1.76 \times 10^{-6}}$$

$$\tau_{\text{Poros-J2}} = 10.78 \times 10^{6} \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{Poros-J2}} = 10.78 MPa$$

Berdasarkan Persamaan 4.23, tegangan puntir yang terjadi pada poros Joint 2 berada di bawah batas tegangan ijin material Aluminium 6061, sehingga poros Joint 2 dinyatakan aman terhadap kegagalan struktur.

4.2.6 Kalkulasi Poros Joint 1

Telah diketahui pada perhitungan sebelumnya, torsi keluaran total dari Joint 1 sebesar 360,86 Nm. Poros pada Joint 1 berbentuk silinder hollow dengan diameter luar 80,02 mm, diameter dalam 54,07 mm, dan berbahan material Aluminium 6061. Selanjutnya, nilai tegangan puntir pada poros dihitung menggunakan Persamaan 4.24 berikut.

Diketahui:

Torsi keluaran total Joint 1	=	$T_{J1} = 360{,}86 \text{ N} \cdot \text{m}$
Diameter luar poros Joint 1	=	$d_{oPoros-J1} = 80{,}02\ mm = 0{,}08002\ m$
Diameter dalam poros Joint 1		$d_{iPoros-J1} = 54{,}07\ mm = 0{,}05407\ m$
Tegangan puntir izin aluminium 6061	=	$\tau_{\text{Izin-Al}} = 160{,}1 \text{ MPa}$

Momen inersia polar silinder pejal:

$$J_{J1} = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32}$$

$$J_{J1} = \frac{\pi}{32}(0{,}080024^4 - 0{,}054074^4) = 3{,}19 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Tegangan geser maksimum akibat puntir:

$$\tau_{\text{Poros-J1}} = \frac{T_{J1} \cdot r_{o\text{Poros}-J2}}{J_{J1}} \quad (4.24)$$

$$\tau_{\text{Poros-J1}} = \frac{360.86 \times 0.04001}{3.19 \times 10^{-6}}$$

$$\tau_{\text{Poros-J1}} = 4.53 \times 10^{6} \text{ Pa}$$

$$\tau_{\text{Poros-J1}} = 4.53 MPa$$

Berdasarkan Persamaan 4.24, tegangan puntir yang terjadi pada poros Joint 1 berada di bawah batas tegangan ijin material Aluminium 6061, sehingga poros Joint 1 dinyatakan aman terhadap kegagalan struktur.

4.2.7 Kalkulasi Bearing Joint 4

Joint 4 menggunakan empat bearing, yaitu dua *Drawn Cup Needle Roller Bearing* HK4020 sebagai bantalan beban radial dan dua *Needle Roller and Cage Thrust Assembly* AXK4565 sebagai bantalan beban aksial. Orientasi sumbu rotasi Joint 4 berubah-ubah terhadap arah gravitasi bergantung pada posisi Joint 2 dan Joint 3 saat beroperasi. Maka analisis dilakukan dengan pendekatan *worst-case*, yaitu seluruh beban gravitasi diasumsikan bekerja sepenuhnya sebagai beban radial untuk bearing HK4020 dan sepenuhnya sebagai beban aksial untuk bearing AXK4565. Telah diketahui massa gabungan yang ditanggung Joint 4 adalah 5.969,1 g. Maka beban total dihitung menggunakan Persamaan 4.25 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 4 = $m_{J4} = 7\,764{,}9 \text{ g} = 7{,}7649 \text{ kg}$

Beban terhadap Joint 4 = $Radial \,\&\, Aksial$

$$F_{r\&a} = m \times g \quad (4.25)$$

$$F_{r\&a} = 7{,}7649 \times 9{,}8$$

$F_{r\&a} = 76{,}10\ N = 0{,}076\ kN$

Kalkulasi Bearing Joint 4 Beban Radial

Berdasarkan katalog SKF pada halaman 622, diperoleh nilai C_0 = 53 kN. Untuk drawn cup needle roller bearing, beban statis ekuivalen dihitung menggunakan rumus pada halaman 606 katalog SKF Rolling Bearings, yaitu Persamaan 4.26 berikut.

Diketahui:

Beban radial per bearing = $F_{r/bearing} = \frac{0{,}076}{2} = 0{,}038$ kN

Static load rating HK4020 = $C_0 = 53$ kN

$$P_0 = F_r \tag{4.26}$$

$P_0 = 0{,}038$ kN

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \tag{4.27}$$

$s_0 = \frac{53}{0{,}038} = 1395$

Berdasarkan perhitungan, nilai static safety factor bearing HK4020 sebesar 1395. Dengan demikian, bearing HK4020 dinyatakan aman terhadap beban radial statis operasional.

Kalkulasi Bearing Joint 4 Beban Aksial

Berdasarkan katalog SKF pada halaman 906, diperoleh nilai C_0 = 127 kN. Untuk *needle roller and cage thrust assembly*, beban statis ekuivalen dihitung menggunakan rumus pada halaman 902 katalog SKF Rolling Bearings, yaitu Persamaan 4.28 berikut.

Diketahui:

Beban radial per bearing = $F_{a/bearing} = \frac{0{,}076}{2} = 0{,}038$ kN

Static load rating HK4020 = $C_0 = 127$ kN

$$P_0 = F_a \quad (4.28)$$
$$P_0 = 0{,}038 \text{ kN}$$

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (4.29)$$
$$s_0 = \frac{127}{0{,}038} = 3342$$

Berdasarkan perhitungan, nilai static safety factor bearing AXK4565 sebesar 3342. Dengan demikian, bearing AXK4565 dinyatakan aman terhadap beban aksial statis operasional. Nilai s_0 yang tinggi pada kedua bearing disebabkan pemilihan bearing yang didasarkan pada kesesuaian dimensi bore dengan diameter poros joint.

4.2.8 Kalkulasi Bearing Joint 3

Bearing pada Joint 3 dianalisis terhadap beban statis untuk memastikan bahwa bearing yang dipilih mampu menahan beban operasional. Analisis dilakukan berdasarkan metode static safety factor (s_0) sesuai katalog SKF Rolling Bearings (Rolling Bearings, 2018).

Joint 3 menggunakan dua buah Tapered Roller Bearing 30209. Sumbu rotasi Joint 3 berorientasi horizontal, sehingga beban gravitasi dari massa gabungan struktur di atasnya bekerja sebagai beban radial pada bearing. Telah diketahui dari perhitungan sebelumnya, massa gabungan yang ditanggung Joint 3 adalah 12.211,0 g. Beban aksial pada Joint 3 diasumsikan nol. Beban radial didistribusikan pada dua bearing, sehingga beban per bearing dihitung menggunakan Persamaan 4.30 dan 4.31 berikut.

Diketahui:
Massa yang ditanggung Joint 3 = $m_{J3} = 12\,211{,}0 \text{ g} = 12{,}211 \text{ kg}$
Beban terhadap Joint 3 = $Radial$

$$F_r = m \times g \tag{4.30}$$
$$F_r = 12{,}211 \times 9{,}8$$
$$F_r = 119{,}67\ N = 0{,}120\ kN$$

$$F_{r/bearing} = \frac{0.120}{2} = 0.060\ kN \tag{4.31}$$

Berdasarkan katalog SKF pada halaman 696-699 untuk bearing 30209, diperoleh nilai C_0 = 76,5 kN dan Y_0 = 0,8. Untuk single row tapered roller bearing, beban statis ekuivalen dihitung menggunakan rumus pada halaman 680 katalog SKF Rolling Bearings, yaitu Persamaan 4.32 berikut.

Diketahui:

Beban radial per bearing	=	$F_{r/bearing} = 0{,}060$ kN
Beban aksial	=	$F_a = 0$ kN
Static load rating 30209	=	$C_0 = 76{,}5$ kN
Axial load factor 30209	=	$Y_0 = 0{,}8$

$$P_0 = 0{,}5F_r + Y_0F_a \tag{4.32}$$
$$P_0 = 0{,}5 \times 0{,}060 + 0{,}8 \times 0$$
$$P_0 = 0{,}030 \text{ kN}$$

Karena $P_0 < F_r$, maka sesuai ketentuan katalog SKF berlaku $P_0 = F_r$ = 0,060 kN. Selanjutnya, static safety factor dihitung menggunakan Persamaan 4.29 berikut.

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \tag{4.33}$$
$$s_0 = \frac{76.5}{0.060} = 1275$$

Berdasarkan Persamaan 4.33, nilai static safety factor bearing Joint 3 sebesar 1275. Dengan demikian, bearing 30209 pada Joint 3 dinyatakan aman terhadap beban statis operasional. Nilai s_0 yang tinggi disebabkan pemilihan bearing yang didasarkan

pada kesesuaian dimensi bore dengan diameter poros joint.

4.2.9 Kalkulasi Bearing Joint 2

Joint 2 menggunakan dua buah Tapered Roller Bearing 32013. Sumbu rotasi Joint 2 berorientasi horizontal, sehingga beban gravitasi bekerja sebagai beban radial pada bearing. Telah diketahui dari perhitungan sebelumnya, massa gabungan yang ditanggung Joint 2 adalah 19.411,2 g. Beban aksial diasumsikan nol. Beban radial dan beban per bearing dihitung menggunakan Persamaan 4.34 dan 4.35 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 2 = $m_{J2} = 19\,411{,}2 \text{ g} = 19{,}4112 \text{ kg}$

Beban terhadap Joint 2 = $Radial$

$$F_r = m \times g \tag{4.34}$$

$$F_r = 19{,}4112 \times 9{,}8$$

$$F_r = 190{,}23\ N = 0{,}190\ kN$$

$$F_{r/bearing} = \frac{0.190}{2} = 0{,}095\ kN \tag{4.35}$$

Berdasarkan katalog SKF pada halaman 702-703 untuk bearing 32013, diperoleh nilai C_0 = 127 kN dan Y_0 = 0,7. Beban statis ekuivalen dihitung menggunakan Persamaan 4.36 berikut.

Diketahui:

Beban radial per bearing = $F_{r/bearing} = 0{,}095$ kN

Beban aksial = $F_a = 0$ kN

Static load rating 32013 = $C_0 = 127$ kN

Axial load factor 32013 = $Y_0 = 0.7$

$$P_0 = 0{,}5F_r + Y_0F_a \tag{4.36}$$

$$P_0 = 0{,}5 \times 0{,}095 + 0{,}7 \times 0$$

$P_0 = 0{,}048$ kN

Karena $P_0 < F_r$, maka sesuai ketentuan katalog SKF berlaku $P_0 = F_r = 0{,}095$ kN. Selanjutnya, static safety factor dihitung menggunakan Persamaan 4.37 berikut.

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \tag{4.37}$$

$$s_0 = \frac{127}{0.095} = 1337$$

Berdasarkan Persamaan 4.37, nilai static safety factor bearing Joint 2 sebesar 1337. Dengan demikian, bearing 32013 pada Joint 2 dinyatakan aman terhadap beban statis operasional. Nilai s_0 yang tinggi disebabkan pemilihan bearing yang didasarkan pada kesesuaian dimensi bore dengan diameter poros joint.

4.2.10 Kalkulasi Bearing Joint 1

Joint 1 menggunakan dua buah Tapered Roller Bearing 32016. Sumbu rotasi Joint 1 berorientasi vertikal, sehingga beban gravitasi dari massa gabungan struktur di atasnya bekerja sebagai beban aksial pada bearing. Telah diketahui dari perhitungan sebelumnya, massa gabungan yang ditanggung Joint 1 adalah 26.934,0 g. Beban radial pada Joint 1 nol. Beban aksial didistribusikan pada dua bearing, sehingga beban per bearing dihitung menggunakan Persamaan 4.38 dan 4.39 berikut.

Diketahui:

Massa yang ditanggung Joint 1 = $m_{J1} = 26\,934{,}0$ g $= 26{,}934$ kg

Beban terhadap Joint 1 = $Aksial$

$$F_a = m \times g \tag{4.38}$$

$$F_a = 26{,}934 \times 9{,}8$$

$$F_a = 263{,}95\ N = 0{,}264\ kN$$

$$F_{a/bearing} = \frac{0.264}{2} = 0{,}132\ kN \quad (4.39)$$

Berdasarkan katalog SKF pada halaman 706-707 untuk bearing 32016, diperoleh nilai C_0 = 216 kN dan Y_0 = 0,8. Beban statis ekuivalen dihitung menggunakan Persamaan 4.40 berikut.

Diketahui:

Beban radial = $F_r = 0$ kN

Beban aksial per bearing = $F_{a/aksial} = 0{,}132$ kN

Static load rating 32013 = $C_0 = 216$ kN

Axial load factor 32013 = $Y_0 = 0.8$

$$P_0 = 0{,}5F_r + Y_0F_a \quad (4.40)$$

$$P_0 = 0{,}5 \times 0 + 0{,}8 \times 0{,}132$$

$$P_0 = 0{,}106 \text{ kN}$$

Karena $P_0 > F_r$, maka berlaku P_0 = 0,106 kN. Selanjutnya, static safety factor dihitung menggunakan Persamaan 4.41 berikut.

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (4.41)$$

$$s_0 = \frac{216}{0{,}106} = 2038$$

Berdasarkan Persamaan 4.41, nilai static safety factor bearing Joint 1 sebesar 2038. Dengan demikian, bearing 32016 pada Joint 1 dinyatakan aman terhadap beban statis operasional. Nilai s_0 yang tinggi disebabkan pemilihan bearing yang didasarkan pada kesesuaian dimensi bore dengan diameter poros joint.

4.3 Simulasi Kinematika dan Dinamika

Simulasi kinematika dan dinamika dilakukan untuk memverifikasi bahwa desain mekanik robot arm 6-DOF yang telah dirancang dapat beroperasi sesuai dengan

perhitungan teoritis. Tujuan utama simulasi ini adalah membuktikan bahwa torque total yang telah dihitung pada setiap joint mampu menggerakkan seluruh bagian robot sekaligus menahan beban yang bekerja. Simulasi dilakukan menggunakan Gazebo, sebuah simulator robotika yang menyertakan physics engine sehingga faktor-faktor fisik seperti gravitasi, massa, momen inersia, dan interaksi antar-link dapat dimodelkan secara realistis.

Dalam simulasi ini, setiap joint dikendalikan oleh kontroler PID yang menerima input berupa sudut target hasil perhitungan inverse kinematics dan menghasilkan output berupa torque untuk menggerakkan joint menuju posisi yang diinginkan. Inverse kinematics yang digunakan mengadopsi metode analitik geometris. Melalui simulasi ini, perilaku aktual robot dalam lingkungan yang mendekati kondisi nyata dapat dievaluasi sebelum tahap manufaktur.

4.3.1 Konfigurasi Model Robot

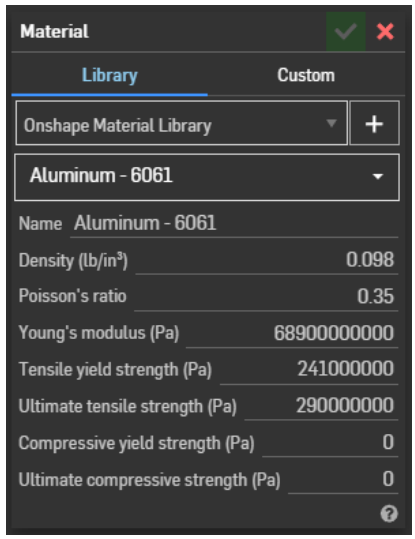
Model robot untuk simulasi diperoleh dengan cara mengekspor desain CAD dari Onshape ke dalam format SDF secara otomatis menggunakan tool open-source onshape-to-robot yang dikembangkan oleh Rhoban (https://github.com/Rhoban/onshape-to-robot). Terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebelum menjalankan proses export.

Tahap pertama adalah mempersiapkan desain robot pada Onshape. Setiap mate pada assembly didefinisikan dengan penamaan yang sesuai dengan aturan tool onshape-to-robot agar dapat dikenali sebagai joint, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11. Selain itu, material setiap komponen juga didefinisikan sesuai dengan kondisi nyata sebagaimana dicontohkan pada Gambar 4.12, sehingga massa dan momen

inersia setiap link dapat dihitung dan di-export secara otomatis oleh tool tanpa perlu pendefinisian manual.

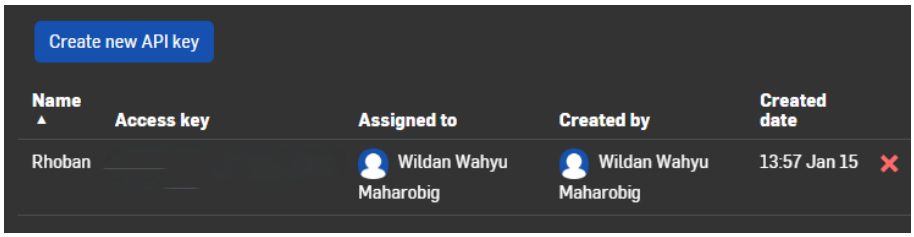


Gambar 4.11 Penamaan Mate Joints



Gambar 4.12 Pendefinisian Materials

Tahap kedua adalah pengaturan API key pada akun Onshape. API key diperlukan agar tool onshape-to-robot dapat mengakses dokumen desain pada Onshape melalui API. API key diperoleh melalui menu Developer pada halaman My Account di Onshape Developer Portal, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13. API key yang diperoleh berupa Access Key dan Secret Key yang kemudian disimpan dalam file ".env" pada direktori proyek dan didefinisikan sebagai environment variable.



Gambar 4.13 Pengaturan API Key

Tahap ketiga adalah penyusunan file konfigurasi "config.json" pada direktori proyek. File ini memuat seluruh pengaturan yang diperlukan oleh tool onshape-to-robot untuk menjalankan proses export, meliputi:

1. URL dokumen assembly Onshape yang akan di-export.
2. Format output yang digunakan, yaitu SDF
3. Pengaturan mesh, meliputi kualitas mesh yang diatur pada tingkat coarse serta penyederhanaan geometri collision dengan faktor 0,1 untuk meringankan beban komputasi simulasi.
4. Parameter joint untuk setiap joint (J1-J6), yang meliputi batas torque maksimum (max_effort), kecepatan angular maksimum (max_velocity), friction, dan damping. Tabel 4.1 menunjukkan parameter joint yang didefinisikan dalam konfigurasi.
5. Pengaturan ignore yang mendefinisikan komponen-komponen mana saja yang disertakan geometri collision-nya. Hanya komponen-komponen struktural utama yang didefinisikan collision-nya untuk mengoptimalkan performa simulasi.

Tabel 4.1 Parameter Joint Konfigurasi Model

Joint	Max Effort (N·m)	Max Velocity (rad/s)	Friction	Damping
J1	360,86	0,785	0,1	0,5
J2	583,20	0,785	0,1	0,5
J3	89,10	0,785	0,1	0,5
J4	97,98	3,14159	0,1	0,5
J5	25,52	3,14159	0,1	0,5
J6	5,67	3,14159	0,1	0,5

Nilai max effort pada setiap joint merupakan torque total yang telah dihitung pada Subbab 4.1, yang mencakup torque motor, rasio transmisi, dan efisiensi konservatif setiap transmisi. Nilai ini menjadi batas maksimum torque yang dapat di-apply pada setiap joint dalam simulasi, sehingga merepresentasikan kapasitas torque

aktual.

Setelah konfigurasi model selesai, proses export dijalankan dengan menjalankan perintah “onshape-to-robot” pada terminal. Tool ini kemudian mengakses dokumen Onshape melalui API, mengunduh geometri seluruh komponen dalam format mesh STL, menghitung properti inertial berdasarkan material yang telah didefinisikan, serta menyusun seluruh informasi tersebut ke dalam file “robot.sdf” beserta folder “assets” yang berisi file-file mesh.

4.3.2 Konfigurasi Parameter Simulasi

Hasil export dari tool onshape-to-robot menghasilkan file “robot.sdf” yang berisi definisi lengkap model robot, meliputi properti inertial setiap link (massa, pose center of mass, dan tensor inersia), geometri visual berupa mesh STL, geometri collision yang telah disederhanakan, serta definisi seluruh joint beserta parameternya. Tabel 4.2 menunjukkan massa dan momen inersia utama setiap link yang dihasilkan dari proses export.

Tabel 4.2 Massa dan Momen Inersia Utama Setiap Link

Link	Deskripsi	Massa (kg)	Ixx (kg·m²)	Iyy (kg·m²)	Izz (kg·m²)
j1_a	Base + Ground	75,8577	43,2072	13,5557	50,7501
j1_b	Turret J1	7,2946	0,0272	0,0785	0,0626
j2_b	Bottom Arm	7,0115	0,0203	0,3896	0,3771
j3_b	Elbow	4,7386	0,0163	0,0120	0,0207
j4_b	Forearm	3,8387	0,1948	0,1938	0,0043
j5_b	Wrist	1,0906	0,0010	0,0015	0,0011
j6_b	End-effector	0,3262	0,0016	0,0011	0,0005

Selain enam joint utama (J1 - J6) yang bersifat revolute, file “robot.sdf” juga

memuat beberapa joint tambahan yang merepresentasikan kinematic loop pada mekanisme transmisi, seperti joint J1_R1, J1_R2, J1_R3 pada Joint 1, joint J2_R1 dan J2_R2 pada Joint 2, serta joint J3_R1 pada Joint 3. Joint-joint tambahan ini dihasilkan secara otomatis oleh tool onshape-to-robot untuk memodelkan mekanisme linkage pada sistem transmisi setiap joint.

Pada file "robot.sdf", ditambahkan dua jenis plugin Gazebo secara manual untuk keperluan kontrol dan monitoring:

1. "JointStatePublisher": berfungsi mem-*publish* posisi sudut aktual seluruh joint secara real-time. Data posisi sudut ini digunakan sebagai feedback untuk kontroler PID.
2. "ApplyJointForce": didaftarkan pada setiap joint utama (J1-J6), memungkinkan pengiriman perintah torque ke masing-masing joint dari program kontrol eksternal melalui topic Gazebo Transport.

```
<plugin
  filename="gz-sim-joint-state-publisher-system"
  name="gz::sim::systems::JointStatePublisher"/>
```

Gambar 4.14 Plugin JointStatePublisher

```
<plugin
  filename="gz-sim-apply-joint-force-system"
  name="gz::sim::systems::ApplyJointForce">
  <joint_name>J6</joint_name>
</plugin>

<plugin
  filename="gz-sim-apply-joint-force-system"
  name="gz::sim::systems::ApplyJointForce">
  <joint_name>J5</joint_name>
</plugin>
```

Gambar 4.15 Plugin ApplyJointForce

Simulasi dijalankan melalui file "arm_robot.sdf" yang mendefinisikan world atau lingkungan simulasi. File ini mengimpor model robot dari folder "arm_robot_assets" menggunakan tag "<include>", sehingga seluruh definisi model pada "robot.sdf" beserta file mesh di folder "assets" dimuat ke dalam world simulasi.

Selain model robot, world juga dilengkapi dengan model ground plane sebagai bidang lantai dan pencahayaan directional yang mensimulasikan cahaya matahari. Parameter simulasi yang dikonfigurasi pada world adalah sebagai berikut:

1. Step size: 0,001 detik (1 ms), menentukan resolusi waktu setiap langkah perhitungan physics engine.
2. Real-time factor: 1,0, berarti simulasi berjalan pada kecepatan waktu nyata.
3. Gravitasi: -9,81 m/s² pada sumbu Z (nilai default Gazebo).
4. System plugin: "Physics" untuk menjalankan physics engine, "UserCommands" untuk interaksi pengguna dengan simulasi, dan "SceneBroadcaster" untuk mengirimkan data visual ke GUI Gazebo.

```
<include>
    <name>Model</name>
    <pose>0 0 0 0 0 0</pose>
    <uri>model://arm_robot_assets</uri>
</include>
```

Gambar 4.16 Import Model Robot

```
<physics name="1ms" type="ignored">
  <max_step_size>0.001</max_step_size>
  <real_time_factor>1.0</real_time_factor>
</physics>
```

Gambar 4.17 Parameter Physics

```
<plugin
  filename="gz-sim-physics-system"
  name="gz::sim::systems::Physics">
</plugin>
```

Gambar 4.18 Plugin Physics

```
<plugin
  filename="gz-sim-user-commands-system"
  name="gz::sim::systems::UserCommands">
</plugin>
```

Gambar 4.19 Plugin UserCommand

```
<plugin
  filename="gz-sim-scene-broadcaster-system"
  name="gz::sim::systems::SceneBroadcaster">
</plugin>
```

Gambar 4.20 Plugin SceneBroadcaster

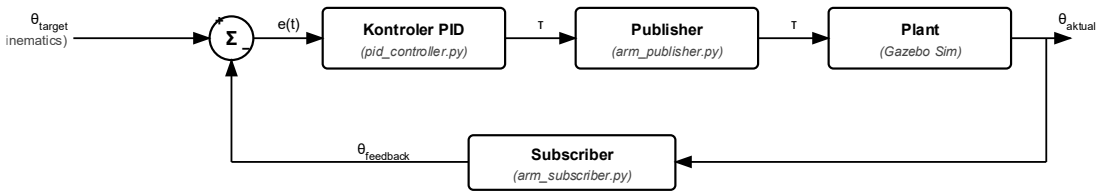
4.3.3 Implementasi Sistem Kontrol Joint Berbasis PID

Setiap joint pada robot arm dikendalikan oleh kontroler PID (Proportional-

Integral-Derivative) yang berfungsi menggerakkan joint menuju sudut target dengan cara mengatur torque yang diberikan. Sistem kontrol ini diimplementasikan dalam bahasa Python dan berkomunikasi dengan Gazebo melalui Gazebo Transport API. Keseluruhan kode program saya tersedia pada Repositori GitHub (https://github.com/wildanwm/Arm_Robot_Simulation). Arsitektur sistem kontrol terdiri dari tiga modul utama sebagai berikut:

1. "arm_subscriber.py": modul subscriber yang berfungsi membaca posisi sudut aktual seluruh joint secara real-time dari topic "/world/arm_robot_world/model/Model/joint_state" yang di-publish oleh plugin "JointStatePublisher". Data diterima dalam format JSON dan di-parse untuk memperoleh posisi sudut setiap joint dalam satuan derajat.
2. "arm_publisher.py": modul publisher yang berfungsi mengirimkan perintah torque ke setiap joint melalui topic "/model/Model/joint/{nama_joint}/cmd_force" menggunakan library "gz.transport" secara native.
3. "pid_controller.py": modul kontroler PID yang menghitung torque berdasarkan error antara sudut target (setpoint) dan sudut aktual (feedback). Modul ini memuat class "PIDController" untuk kontroler PID individual serta class "JointPIDController" yang mengelola kontroler PID untuk seluruh joint.

Gambar 4.21 menunjukkan diagram blok sistem kontrol PID yang diterapkan pada setiap joint. Dan persamaan kontroler PID yang diimplementasikan ditunjukkan pada Persamaan 4.42.



Gambar 4.21 Diagram Kontrol PID

$$\tau = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)\ dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{4.42}$$

Di mana τ: output torque (N·m), e(t): error (°), Kp: gain proportional, Ki: gain integral, dan Kd: gain derivative.

Untuk menghindari overshoot akibat akumulasi error dari setpoint sebelumnya, nilai integral direset setiap kali setpoint berubah. Output torque dari kontroler dibatasi sesuai dengan batas torque maksimum (max effort) masing-masing joint, sehingga torque yang dikirimkan ke simulasi tidak melebihi kapasitas aktual aktuator.

Tabel 4.3 Parameter PID Setiap Joint

Joint	Kp	Ki	Kd	Output Limits (N·m)
J1	36,086	0,00	15,0	±360,86
J2	58,320	0,01	40,0	±583,20
J3	8,910	0,01	20,0	±89,10
J4	9,798	0,00	1,0	±97,98
J5	2,552	0,00	0,5	±25,52
J6	1,134	0,00	0,1	±5,67

Nilai parameter PID pada setiap joint diperoleh melalui proses tuning secara trial and error. Proses tuning dimulai dengan menentukan nilai Kp dengan mempertimbangkan skala torque maksimum joint tersebut, kemudian menambahkan Kd untuk meredam overshoot dan osilasi, dan terakhir menambahkan Ki pada joint yang memerlukan eliminasi steady-state error.

Control loop utama berjalan pada frekuensi 100 Hz (interval 10 ms). Pada setiap iterasi, subscriber membaca posisi sudut aktual seluruh joint, kontroler PID menghitung torque yang diperlukan berdasarkan error terhadap setpoint, kemudian publisher mengirimkan torque tersebut ke masing-masing joint di Gazebo.

4.3.4 Implementasi Inverse Kinematics Analitik Geometris

Metode yang digunakan adalah analitik geometris, yaitu solusi closed-form yang diturunkan langsung dari geometri robot tanpa memerlukan proses iterasi numerik. Perhitungan inverse kinematics diimplementasikan dalam bahasa Python pada file inverse_kinematics.py yang saya simpan pada Repositori GitHub (https://github.com/wildanwm/Arm_Robot_Simulation). Pendekatan ini memanfaatkan prinsip kinematic decoupling, yaitu memisahkan perhitungan menjadi dua bagian: posisi wrist center (J1-J3) dan orientasi end-effector (J4-J6).

Parameter Link

Perhitungan inverse kinematics menggunakan empat parameter link utama yang diperoleh dari DH parameter robot sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.4.

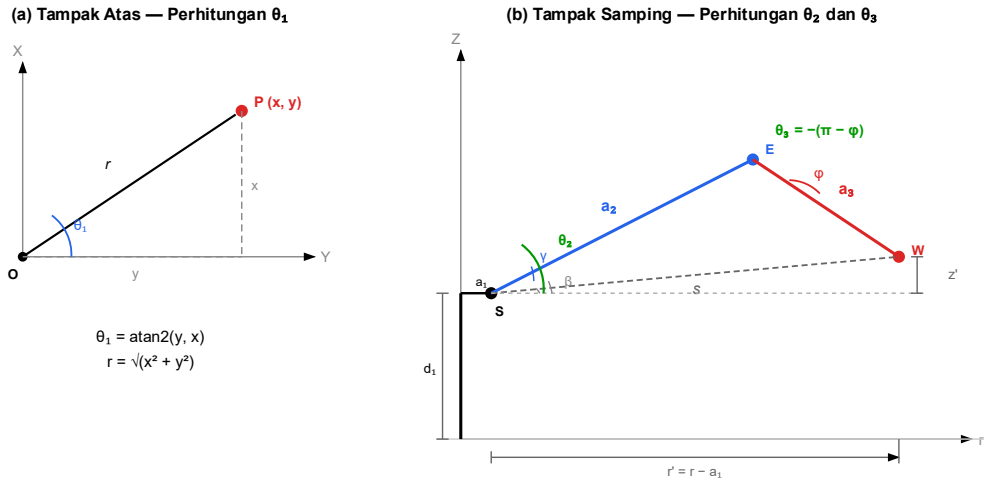
Tabel 4.4 Parameter Link Inverse Kinematics

Parameter	Nilai (mm)	Keterangan
d_1	191,00	Offset vertikal dari base ke shoulder (Joint 2)
a_1	23,50	Offset horizontal dari base ke shoulder
a_2	650,00	Panjang link pertama, shoulder ke elbow (Joint 3)
a_3	574,95	Panjang link kedua, elbow ke wrist center (Joint 5)

Nilai a_3 = 574,95 mm merupakan jarak dari elbow ke wrist center yang bersesuaian dengan parameter d_4 pada tabel DH parameter.

Perhitungan Posisi (Joint 1, 2, dan 3)

Perhitungan sudut J1-J3 dilakukan secara geometris berdasarkan posisi target wrist center (x, y, z). Gambar 4.22 menunjukkan ilustrasi geometri yang digunakan dalam penurunan rumus.



Gambar 4.22 Ilustrasi Geometri Inverse Kinematics

Joint 1 (θ_1) dihitung dari proyeksi posisi target pada bidang XY (tampak atas). Sudut θ_1 merupakan sudut rotasi base terhadap sumbu Z:

$$\theta^1 = atan2(y, x) \tag{4.43}$$

Joint 2 (θ_2) dan Joint 3 (θ_3) dihitung dari tampak samping pada bidang yang dibentuk oleh jarak radial r dan sumbu Z. Terlebih dahulu dihitung parameter-parameter bantu sebagai berikut:

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \tag{4.44}$$

$$r' = r - a_1 \tag{4.45}$$

$$z' = z - d_1 \tag{4.46}$$

$$s = \sqrt{(r'^2 + z'^2)} \tag{4.47}$$

Di mana r: jarak radial dari base ke target pada bidang XY, r': jarak radial yang telah dikurangi offset horizontal a_1, z': jarak vertikal yang telah dikurangi offset vertikal d_1, dan s: jarak planar dari shoulder ke wrist center.

Sebelum melanjutkan perhitungan, dilakukan pengecekan reachability untuk memastikan posisi target dapat dijangkau. Posisi target dinyatakan reachable apabila memenuhi:

$$|a_2 - a_3| \leq s \leq a_2 + a_3 \tag{4.48}$$

Sudut elbow (θ_3) dihitung menggunakan hukum cosinus pada segitiga yang dibentuk oleh a_2, a_3, dan s:

$$cos\,\varphi = ({a_2}^2 + {a_3}^2 - s^2) / (2 \cdot a_2 \cdot a_3) \tag{4.49}$$

$$\theta_3 = (\pi - \varphi) = (\pi - arccos(cos\,\varphi)) \tag{4.50}$$

Sudut shoulder (θ_2) dihitung menggunakan dua sudut bantu, yaitu sudut β antara garis s dan bidang horizontal, serta sudut γ antara link a_2 dan garis s:

$$\beta = atan2(z', r') \tag{4.51}$$

$$cos\,\gamma = ({a_2}^2 + s^2 - {a_3}^2) / (2 \cdot a_2 \cdot s) \tag{4.52}$$

$$\theta_2 = \beta - \gamma \tag{4.53}$$

Perhitungan Orientasi (Joint 4, 5, dan 6)

Joint 4, 5, dan 6 membentuk konfigurasi spherical wrist yang menentukan orientasi end-effector. Perhitungan dilakukan dengan metode isolasi matriks rotasi. Matriks rotasi total dari base ke end-effector dapat didekomposisi menjadi:

$$R_total = R_arm \cdot R_wrist \tag{4.54}$$

Di mana R_arm adalah matriks rotasi yang dihasilkan oleh J1-J3 (telah

diketahui dari perhitungan posisi) dan R_wrist adalah matriks rotasi yang dihasilkan oleh J4-J6.

Matriks rotasi wrist diisolasi dengan:

$$R_wrist = R_arm\hat{}T \cdot R_target \quad (4.55)$$

Di mana R_target adalah matriks rotasi orientasi target yang diinginkan.

Matriks R_arm dihitung dari komposisi rotasi J1–J3 berdasarkan DH parameter:

$$R_arm = Rz(\theta_1) \cdot Ry(\theta_2) \cdot Ry(\theta_3) \quad (4.56)$$

Setelah R_wrist diperoleh, sudut θ_4, θ_5, dan θ_6 diekstraksi menggunakan dekomposisi Euler ZYZ, yaitu:

$$R_wrist = Rz(\theta_4) \cdot Ry(\theta_5) \cdot Rz(\theta_6) \quad (4.57)$$

Ekstraksi sudut dilakukan dengan rumus:

$$\theta_5 = atan2(\sqrt{(R_{13}{}^2 + R_{23}{}^2)}, R_{33}) \quad (4.58)$$

Untuk kondisi non-singular ($\sin\theta_5 \neq 0$):

$$\theta_4 = atan2(R_{23}, R_{13}) \quad (4.59)$$

$$\theta_6 = atan2(R_{32}, -R_{31}) \quad (4.60)$$

Untuk kondisi singular ($\sin\theta_5 \approx 0$), digunakan konvensi $\theta_6 = 0$ dan θ_4 dihitung dari elemen matriks rotasi yang tersisa.

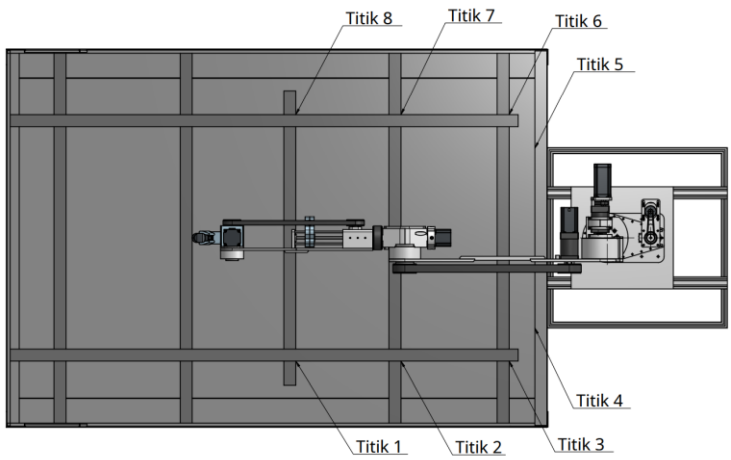
Pada implementasinya, saya dapat menginputkan posisi target (x, y, z) beserta orientasi target dalam bentuk sudut Roll-Pitch-Yaw (Rx, Ry, Rz) yang kemudian dikonversi menjadi matriks rotasi target secara otomatis.

4.3.5 Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan dengan skenario robot arm melakukan proses welding pada delapan titik sambungan bak motor roda tiga. Urutan gerakan simulasi dimulai dari posisi awal (posisi 0), berpindah ke posisi home, kemudian bergerak secara berurutan menuju delapan titik welding, dan kembali ke posisi home setelah seluruh titik selesai. Video simulasi lengkap dapat dilihat pada tautan Simulasi Kinematika dan Dinamika.webm berikut (https://bit.ly/simulasi-kinematika-dan-dinamika).

Posisi awal robot (posisi 0) didefinisikan dengan J1 = 0°, J2 = 0°, J3 = 90°, J4 = 0°, J5 = 0°, J6 = 0°. Posisi home merupakan posisi robot dalam keadaan melipat dan bersandar dengan konfigurasi J1 = 0°, J2 = 150°, J3 = −60°, J4 = 0°, J5 = 0°, J6 = 0°.

Delapan titik welding ditentukan berdasarkan lokasi sambungan pada bak motor roda tiga, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.23. Setiap titik didefinisikan dengan koordinat posisi (x, y, z) dalam satuan milimeter serta orientasi end-effector (Rx, Ry, Rz) dalam satuan derajat. Tabel 4.5 menunjukkan koordinat target beserta orientasi untuk setiap titik welding.



Gambar 4.23 Ilustrasi Titik Welding

Tabel 4.5 Koordinat Target Titik Welding

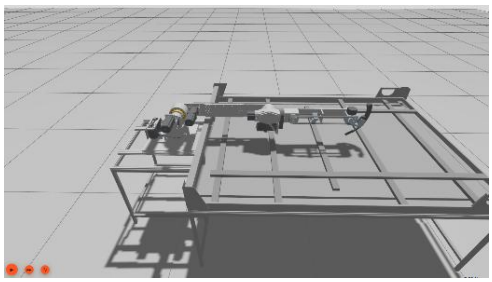
Titik	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Rx (°)	Ry (°)	Rz (°)
1	1036,3	410,0	4,3	0	55	0
2	686,3	410,0	4,3	0	55	0
3	326,3	410,0	4,3	0	55	0
4	240,7	263,5	82,1	0	-35	0
5	240,7	-263,5	82,1	0	-35	0
6	326,3	-410,0	4,3	0	55	0
7	686,3	-410,0	4,3	0	55	0
8	1036,3	-410,0	4,3	0	55	0

Koordinat target tersebut kemudian dihitung menggunakan inverse kinematics untuk memperoleh sudut setiap joint yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

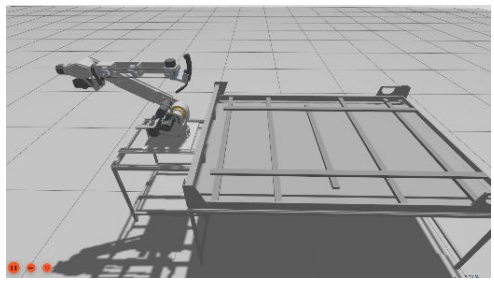
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Inverse Kinematics

Titik	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ_3 (°)	θ_4 (°)	θ_5 (°)	θ_6 (°)
1	−21,59	14,04	−50,84	17,54	89,83	−12,73
2	−30,85	31,84	−98,94	27,65	115,12	−31,45
3	−51,49	36,63	−128,74	49,14	122,06	−67,31
4	−47,59	43,78	−147,45	−25,51	79,50	−46,86
5	47,59	43,78	−147,45	25,51	79,50	46,86
6	51,49	36,63	−128,74	−49,14	122,06	67,31
7	30,85	31,84	−98,94	−27,65	115,12	31,45
8	21,59	14,04	−50,84	−17,54	89,83	12,73

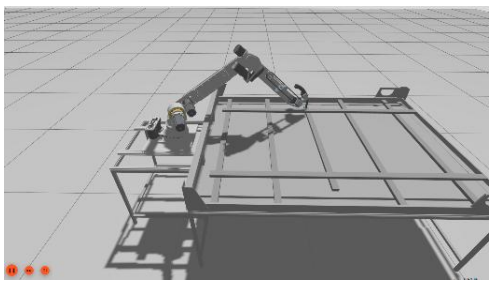
Seluruh delapan titik welding berhasil dijangkau oleh robot dalam simulasi. Gambar 4.24 hingga Gambar 4.29 menunjukkan tangkapan layar simulasi pada beberapa posisi, meliputi posisi awal, posisi home, serta beberapa titik welding.



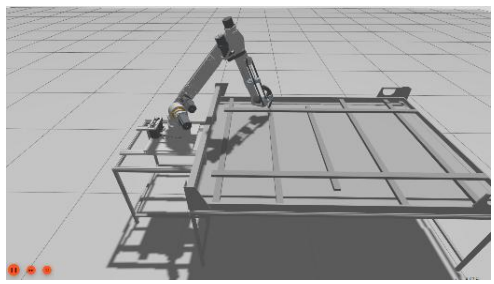
Gambar 4.24 Posisi Awal



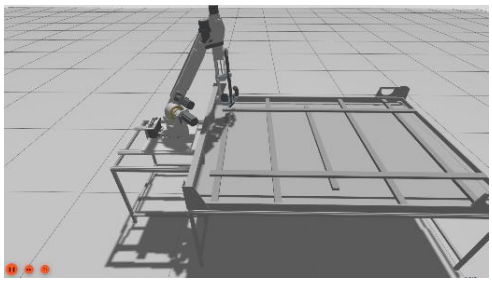
Gambar 4.25 Posisi Home



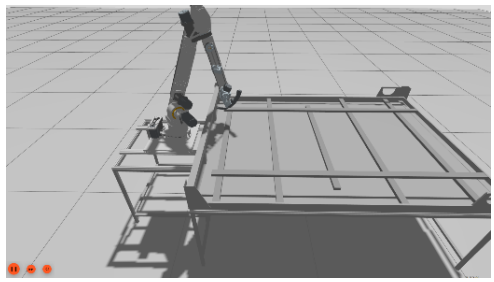
Gambar 4.26 Titik Welding 1



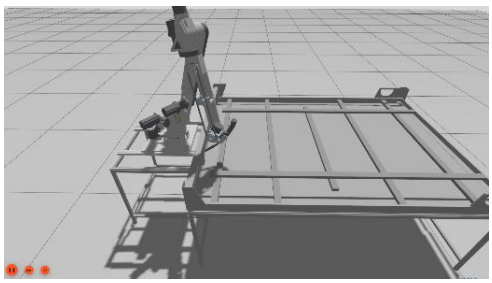
Gambar 4.27 Titik Welding 2



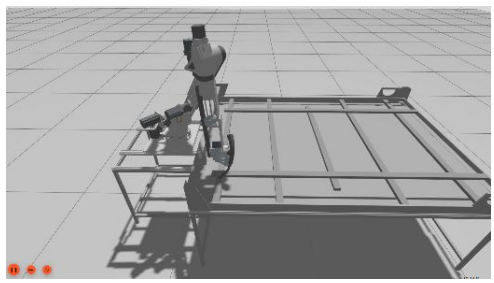
Gambar 4.28 Titik Welding 3



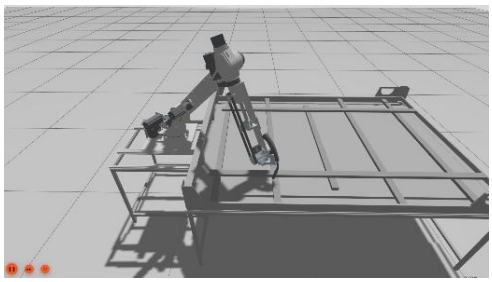
Gambar 4.29 Titik Welding 4



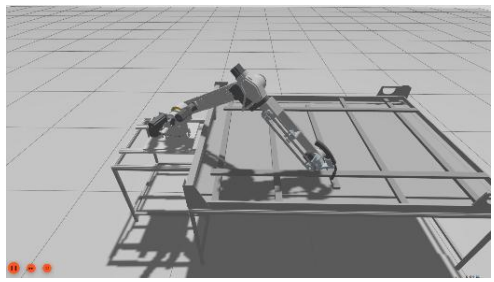
Gambar 4.30 Titik Welding 5



Gambar 4.31 Titik Welding 6



Gambar 4.32 Titik Welding 7



Gambar 4.33 Titik Welding 8

Implementasi inverse kinematics analitik geometris menghasilkan solusi sudut joint yang sesuai dengan perhitungan teoritis. Secara keseluruhan, simulasi ini memverifikasi bahwa desain mekanik, perhitungan torque, dan pemilihan aktuator yang telah dilakukan pada tahap perancangan sudah sesuai dan mampu memenuhi kebutuhan operasi robot arm.

4.4 Manufaktur

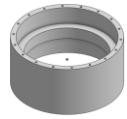
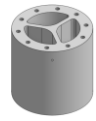
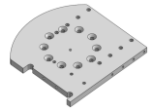
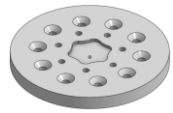
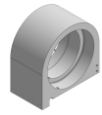
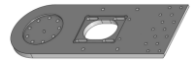
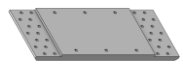
Proses manufaktur dilakukan berdasarkan desain akhir yang telah divalidasi pada tahap sebelumnya. Tujuan utama dari tahap ini adalah menghasilkan sistem robot arm yang sesuai secara geometris, struktural, dan fungsional dengan rancangan yang telah ditetapkan.

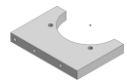
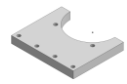
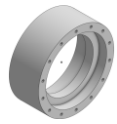
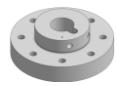
4.4.1 Tabel Proses Manufaktur

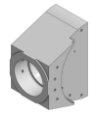
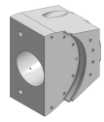
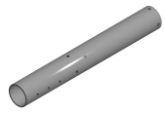
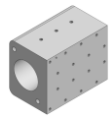
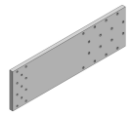
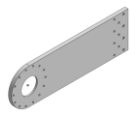
Pada sub-subbab ini disajikan tabel proses manufaktur yang merangkum seluruh komponen mekanik robot arm. Pemilihan metode manufaktur pada setiap komponen didasarkan pada kebutuhan kekuatan struktural, tingkat presisi, serta efisiensi biaya dan waktu produksi yang telah ditentukan pada proses perancangan. Proses manufaktur diupayakan mengikuti desain tanpa adanya kompensasi, kecuali pada kondisi tertentu di mana komponen tidak memungkinkan untuk dimanufaktur, sehingga diperlukan penyesuaian desain.

Tabel 4.7 Tabel Komponen Manufaktur CNC Milling dan Turning

No.	Nama Komponen	Material	Dimensi Ukuran (mm)	Jumlah	Tinjauan

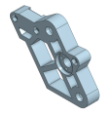
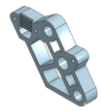
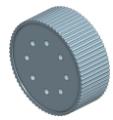
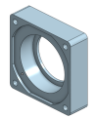
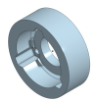
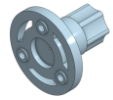
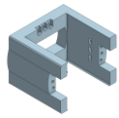
1	J1 Base Bracket	Aluminium 5052	272 x 164 x 9	1	
2	J1 Spacer	Aluminium 6061	⌀12.5 x 42	20	
3	J1 Base Plate	Aluminium 5052	272 x 164 x 9	1	
4	J1 Tension Bracket	Aluminium 5052	30x 29 x 9	1	
5	J1 Spindle Housing	Aluminium 6061	⌀139 x 68	1	
6	J1 Spindle Turret	Aluminium 6061	⌀81 x 77	1	
7	J1 Turret Platform	Aluminium 5052	139 x 139 x 9	1	
8	J1 Spindle Bracket	Aluminium 5052	103 x 103 x 9	1	
9	J1 Belt Mount	Aluminium 5052	159 x 61 x 9	1	
10	J2 Spindle Housing	Aluminium 5052	125 x 122 x 68	1	
11	J2 Spindle Turret	Aluminium 6061	⌀66 x 73	1	
12	J2 Bottom Arm A	Aluminium 5052	285 x 105 x 9	1	
13	J2 Bottom Arm B	Aluminium 5052	285 x 105 x 9	1	
14	J2 Bottom Arm C	Aluminium 5052	285 x 105 x 13	1	
15	J3 Tension Bracket	Aluminium 5052	55 x 13 x 13	1	

16	J2 Spindle Bracket	Aluminium 5052	79 x 79 x 12	1	
17	J2 Motor Bracket Top	Aluminium 5052	79 x 40 x 9	1	
18	J2 Motor Bracket Bottom	Aluminium 5052	79 x 55 x 9	1	
19	J2 Motor Support Top	Aluminium 5052	79 x 40 x 9	1	
20	J2 Motor Support Bottom	Aluminium 5052	79 x 64 x 9	1	
21	J2 Motor Ring	Aluminium 5052	79 x 79 x 23	2	
22	J2 Belt Motor	Aluminium 5052	117 x 69 x 9	1	
23	J2 LS Mount A	Aluminium 5052	33 x 33 x 10	1	
24	J2 LS Mount B	Aluminium 5052	68 x 33 x 10	1	
25	J2 LS Mount C	Aluminium 5052	33 x 33 x 5	1	
26	J2 Spacer	Aluminium 6061	⌀10 x 20	3	
27	J3 Spindle Housing	Aluminium 6061	⌀105 x 41	1	
28	J3 Spindle Turret	Aluminium 6061	⌀46 x 54	1	
29	J3 Turret Platform	Aluminium 5052	105 x 105 x 7	1	
30	J3 Spindle Bracket	Aluminium 5052	60 x 60 x 7	1	
31	J3 Pulley Mount	Aluminium 6061	⌀60 x 20	1	
32	J3 Belt Lock A	Aluminium 5052	58 x 40 x 9	1	

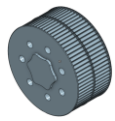
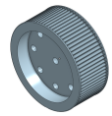
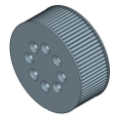
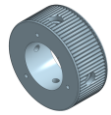
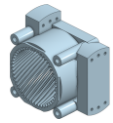
33	J3 Belt Lock B	Aluminium 5052	58 x 40 x 9	1	
34	J3 Belt Lock C	Aluminium 5052	58 x 40 x 9	1	
35	J4 Front Turret Housing	Aluminium 5052	105 x 76 x 62	1	
36	J4 Rear Turret Housing	Aluminium 5052	105 x 76 x 62	1	
37	J4 Main Shaft	Steel	⌀41 x 304	1	
38	J4 Motor Mount Center	Aluminium 5052	70 x 64 x 9	1	
39	J4 Motor Mount Left	Aluminium 5052	162 x 14 x 7	1	
40	J4 Motor Mount Right	Aluminium 5052	179 x 138 x 7	1	
41	J5 Pipe Housing	Aluminium 5052	100 x 77 x 63	1	
42	J5 Lead Screw Housing	Aluminium 5052	77 x 63 x 9	1	
43	J5 Bearing Stopper	Aluminium 5052	31 x 19 x 5	1	
44	J5 Top Arm A	Aluminium 5052	255 x 77 x 7	1	
45	J5 Top Arm B	Aluminium 5052	253 x 77 x 7	1	
46	J5 Top Arm C	Aluminium 5052	80 x 77 x 7	1	
47	J5 Spindle Housing	Aluminium 6061	⌀77 x 28	1	

48	J5 Spindle Turret	Aluminium 6061	⌀31 x 37	1	
49	J5 Turret Platform	Aluminium 5052	77 x 77 x 7	1	
50	J5 Spindle Bracket	Aluminium 5052	42 x 42 x 5	1	
51	J5 Idler Tension	Aluminium 5052	60 x 42 x 9	1	
52	J5 Bearing Post	Aluminium 6061	⌀18 x 20	1	
53	J5 Motor Mount	Aluminium 5052	75 x 75 x 25	1	

Tabel 4.8 Tabel Komponen Manufaktur FDM Printing

Joint	Nama Komponen	Material	Massa (gram)	Jumlah	Tinjauan
1	J5 Carrier A	PLA	49	1	
2	J5 Carrier B	PLA	51	1	
3	J3 Spindle Pulley	PLA	93	1	
4	J6 Ring B	PLA	35	1	
5	J6 Orbital A	PLA	16	1	
6	J6 Orbital B	PLA	19	1	
7	J6 Reinforcement	PLA	94	1	

Tabel 4.9 Tabel Komponen Manufaktur DLP Printing

Joint	Nama Komponen	Material	Volume (cm^3)	Jumlah	Tinjauan
1	J1 Spindle Pulley	Standard Resin	122	1	
2	J1 Motor Pulley	Standard Resin	18	1	
3	J3 Motor Pulley	Standard Resin	96	1	
4	J3 Spindle Pulley	Standard Resin	52	1	
5	J4 Gearbox Pulley	Standard Resin	25	1	
6	J4 Timing Hub	Standard Resin	79	1	
7	J5 Timing Hub A	Standard Resin	19	2	
8	J5 Timing Hub B	Standard Resin	20	2	
9	J6 Sun	Standard Resin	5	1	
10	J6 Planet	Standard Resin	3	3	
11	J6 Ring A	Standard Resin	68	1	

4.4.2 Dokumentasi Proses Manufaktur

Dokumentasi ini mencakup proses persiapan material, pembuatan komponen, serta tahapan penyelesaian seperti pengeboran, perakitan subkomponen, dan finishing. Setiap jenis proses manufaktur didokumentasikan secara garis besar untuk

menunjukkan bagaimana proses manufaktur dilakukan.

CNC Turning

Proses CNC turning digunakan untuk membuat komponen-komponen dengan geometri silindris seperti spindle housing, spindle turret, spacer, bearing post, dan pulley mount. Proses dimulai dengan pemotongan material batang aluminium sesuai dimensi awal yang dibutuhkan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.34 yang menunjukkan proses pemotongan menggunakan Horizontal Band Saw.

Material kemudian dicekam pada chuck mesin CNC lathe dan dilakukan proses turning bertahap untuk membentuk diameter luar sesuai desain, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.35. Lalu diikuti dengan proses boring untuk membentuk diameter dalam pada komponen yang memerlukan lubang bearing menggunakan mata pisau boring seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.36.


Gambar 4.34 Band Saw


Gambar 4.35 CNC Turn


Gambar 4.36 Pisau Bore

CNC Milling

Proses CNC milling digunakan untuk membuat komponen-komponen dengan geometri plat dan bracket, seperti base bracket, base plate, turret platform, spindle bracket, motor bracket, belt mount, arm. Sebelum proses pengerjaan dimulai,

dilakukan tahap persiapan yang meliputi pemilihan dan pemasangan mata cutting yang sesuai dengan jenis operasi, yaitu flat end mill untuk proses kontur dan pocket, serta drill bit untuk pembuatan lubang, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.37. Selanjutnya dilakukan kalibrasi titik nol sumbu Z menggunakan Z-axis zero setter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.38. Kalibrasi ini penting dilakukan setiap kali terjadi pergantian cutting tool maupun pergantian benda kerja.



Gambar 4.37 Persiapan Mata Cutting



Gambar 4.38 Z-Axis Zero Setter

Dikarenakan kompleksitas bentuk komponen yang mengharuskan pengerjaan dua sisi, dibuatlah jig khusus untuk mempermudah proses pencekaman dan menjaga konsistensi posisi benda kerja. Jig ini dirancang agar benda kerja dapat dipasang dan dilepas secara cepat menggunakan minimal tiga buah pin stainless steel sebagai referensi posisi, sehingga tidak diperlukan proses alignment ulang setiap kali mengerjakan sisi sebaliknya. Salah satu jig dan contoh penggunaannya ditunjukkan pada Gambar 4.39 dan Gambar 4.40 berikut.



Gambar 4.39 DIY Milling Jig



Gambar 4.40 Penggunaan Milling Jig

Proses pengerjaan pada mesin CNC milling meliputi face milling untuk

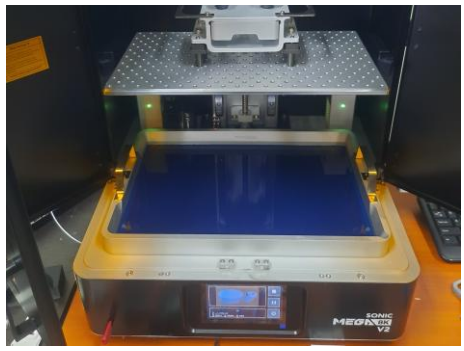
meratakan permukaan atas benda kerja, profile milling atau contouring untuk membentuk kontur luar komponen, pocket milling untuk membuat rongga atau kantong pada komponen housing, serta drilling untuk pembuatan lubang-lubang baut. Contoh proses milling ditunjukkan pada Gambar 4.41 berikut.



Gambar 4.41 Prosses Milling

3D Print DLP

Proses 3D print DLP (Digital Light Processing) digunakan untuk membuat komponen-komponen yang memiliki geometri kompleks dan memerlukan akurasi dimensi yang tinggi, seperti pulley, timing hub, serta komponen planetary gear pada Joint 6 yang meliputi sun gear, planet gear, dan ring gear. Proses pencetakan dimulai dengan penyiapan file model 3D dalam format STL yang kemudian dilakukan slicing menggunakan software slicer yang bernama Chitubox. Proses pencetakan dilakukan secara otomatis oleh mesin dengan prinsip pengerasan resin cair lapis demi lapis menggunakan proyeksi cahaya UV, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.42 berikut.


Gambar 4.42 Proses 3D Print DLP

Setelah proses pencetakan selesai, komponen memerlukan tahapan post-processing. Tahap pertama adalah pembersihan residu resin yang masih menempel pada permukaan komponen. Pembersihan dilakukan dengan menyemprotkan cairan isopropyl alcohol (IPA)pada seluruh permukaan komponen, seperti ditujukkan pada Gambar 4.43. Tahap selanjutnya adalah proses curing tambahan dengan menjemur komponen di bawah sinar matahari, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.44 untuk memastikan seluruh resin telah mengeras sempurna sehingga komponen mencapai kekuatan mekanis yang optimal.


Gambar 4.43 Pembersihan Residu Resin


Gambar 4.44 Curing Resin

3D Print FDM

Proses 3D print FDM (Fused Deposition Modeling) digunakan untuk membuat komponen-komponen yang memiliki geometri kompleks namun tidak memerlukan tingkat presisi setinggi komponen hasil DLP printing. Komponen yang dibuat menggunakan proses ini meliputi carrier pada Joint 5, spindle pulley pada Joint 3, serta

komponen ring, orbital, dan reinforcement pada Joint 6. Proses pencetakan FDM dimulai dengan penyiapan file STL yang kemudian dilakukan slicing menggunakan software bernama Ultimaker Cura. Proses pencetakan berlangsung secara otomatis dengan prinsip deposisi filamen PLA yang dipanaskan melalui nozzle dan ditumpuk lapis demi lapis hingga membentuk geometri akhir komponen, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.45 berikut.



Gambar 4.45 Proses 3D Print FDM

Assembly Sub-komponen

Setelah sebagian komponen yang berkaaitan selesai difabrikasi, dilakukan proses assembly sub-komponen pada setiap joint sebelum dilakukan perakitan keseluruhan robot arm. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap komponen hasil manufaktur dapat saling terintegrasi dengan baik, serta untuk mengidentifikasi sejak dini apabila terdapat ketidaksesuaian dimensi atau interferensi mekanik antar komponen.



Gambar 4.46 Assembly Joint 1

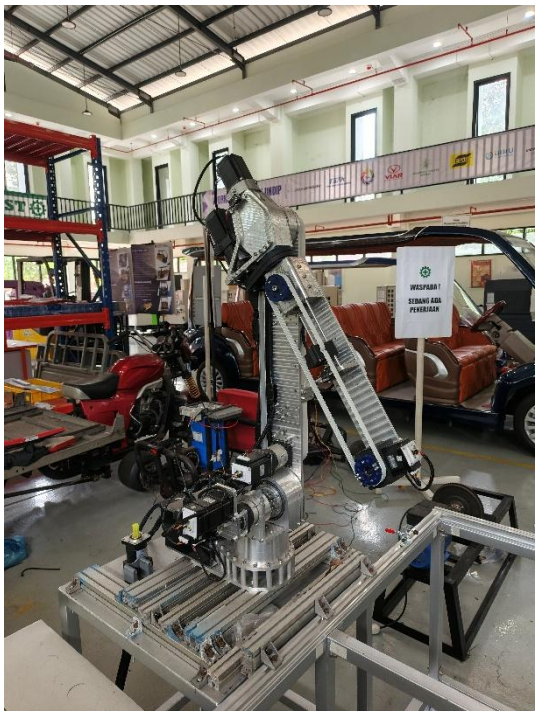


Gambar 4.47 Assembly Joint 1-3

Selama proses assembly, dilakukan pengecekan pada setiap joint untuk memverifikasi bahwa putaran shaft berlangsung halus dan clearance antar komponen sesuai dengan desain. Apabila ditemukan ketidaksesuaian, dilakukan penyesuaian minor seperti penghalusan permukaan kontak menggunakan hand-tools.

4.4.3 Hasil Akhir Perakitan Robot Arm

Hasil perakitan ditampilkan dalam bentuk dokumentasi visual dari berbagai sudut pandang untuk memperlihatkan struktur keseluruhan robot arm. Hasil perakitan menunjukkan bahwa seluruh komponen dapat terintegrasi dengan baik tanpa interferensi mekanik yang signifikan. Setiap joint dapat bergerak sesuai dengan derajat kebebasan yang dirancang, dan struktur robot arm secara keseluruhan menunjukkan kesesuaian antara desain virtual dan realisasi fisik.



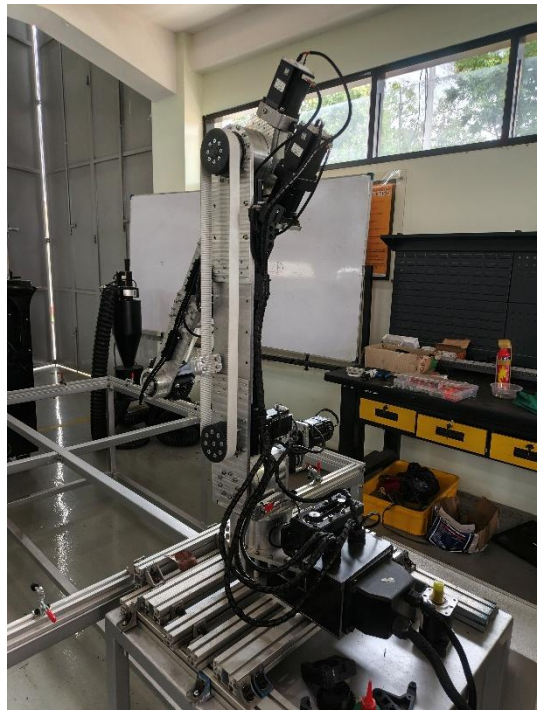
Gambar 4.48 Hasil Perakitan Tampak 1



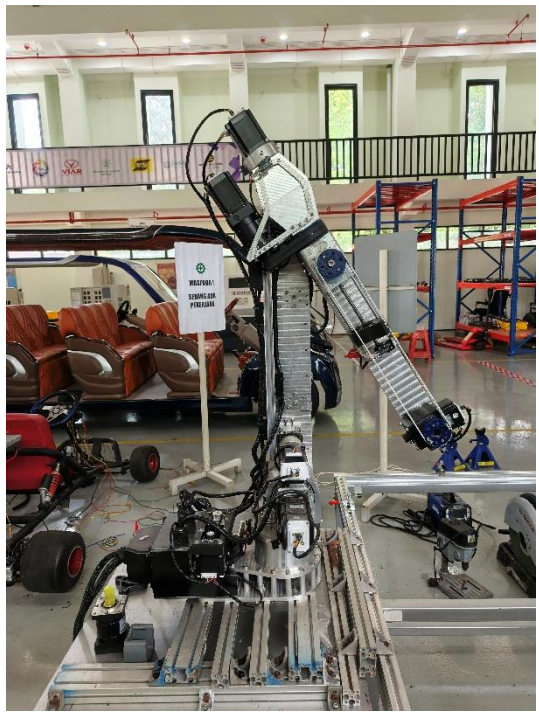
Gambar 4.49 Hasil Perakitan Tampak 2



Gambar 4.50 Hasil Perakitan Tampak 3



Gambar 4.51 Hasil Perakitan Tampak 4



Gambar 4.52 Hasil Perakitan Tampak 5