

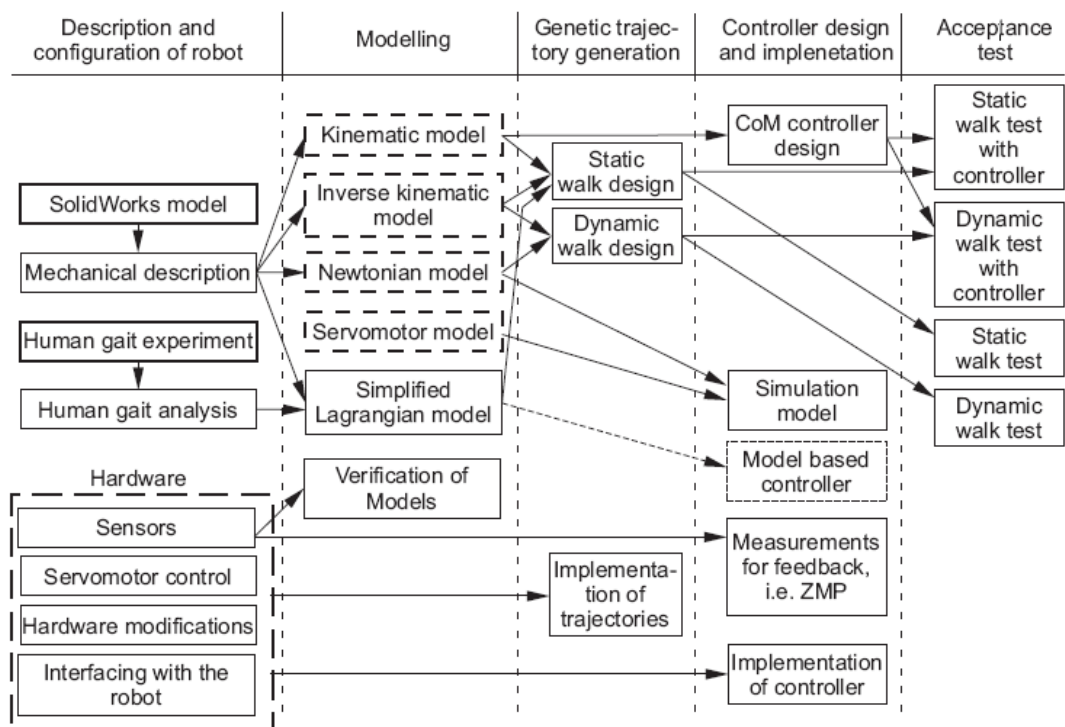
### BAB 3

#### DESAIN HUMANOID ROBOT

Dalam bab ini berisi tentang tahapan dalam mendesain *humanoid robot*, diagram alir penelitian, pemodelan *humanoid robot* dengan *software* SolidWorks serta pemodelan kinematik *humanoid robot*.

#### 3.1 Tahapan Desain *Humanoid Robot*

Dalam mendesain *humanoid robot* ada tahapan-tahapan yang perlu dilakukan. Mulai dari deskripsi dan konfigurasi robot, pemodelan, analisa lintasan, desain kontrol, dan terakhir pengujian. Pada Gambar 3.1 adalah salah satu model diagram alir (*flowchart*) desain *humanoid robot* yang dikembangkan oleh Orts et al. pada tahun 2006<sup>[1]</sup>.



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan desain *humanoid robot*<sup>[1]</sup>.

Dalam penelitian ini, penulis hanya menganalisa dari tahapan pemodelan dengan SolidWorks, pemodelan kinematik, dan pemodelan *Lagrangian*. Hal ini dilakukan karena terbatasnya waktu dalam pengerjaan penelitian tersebut.

### 3.1.1 Pemodelan dengan SolidWorks

Pemodelan desain *humanoid robot* dengan *software* SolidWorks berbentuk 3D. Pemodelan dibuat perkomponen, sehingga apabila dilakukan pembuatannya mendatang akan lebih mudah dan praktis. Dalam pemodelan desain di SolidWorks ini, dimensi, *center of masses* dan *moment inersia* dapat diketahui. Sehingga dapat dilakukan pemodelan selanjutnya, misalnya pemodelan kinematik dan pemodelan *Lagrangian*.

### 3.1.2 Pemodelan Kinematik

Dalam menganalisa pergerakan robot ada dua pemodelan yang dapat digunakan untuk menganalisa pergerakannya, yaitu pemodelan kinematik dan pemodelan dinamik. Pemodelan kinematik adalah pemodelan yang berkaitan dengan pergerakan robot tanpa memperdulikan gaya yang menyebabkan pergerakan itu. Sedangkan, pemodelan dinamik adalah pemodelan matematis yang menggambarkan tingkah laku dinamis dari manipulator dengan memperhatikan gaya yang menyebabkan pergerakannya.

Pemodelan kinematik dalam robotik adalah suatu bentuk pernyataan yang berisi tentang deskripsi matematik geometri dari suatu struktur robot. Dari persamaan kinematik dapat diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu obyek. Kinematik dalam robotik dibagi menjadi dua, yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. *Forward kinematics* adalah proses menghitung posisi  $P(x,y,z)$  berdasarkan sudut-sudut *joint* yang ditentukan nilainya. *Inverse kinematics* adalah sebaliknya, diberikan posisi  $P(x,y,z)$  untuk menghitung sudut-sudut *joint*. Dalam pemodelan kinematik ini, penulis membahas tentang *forward kinematics* dengan parameter Denavit-Hertenberg.

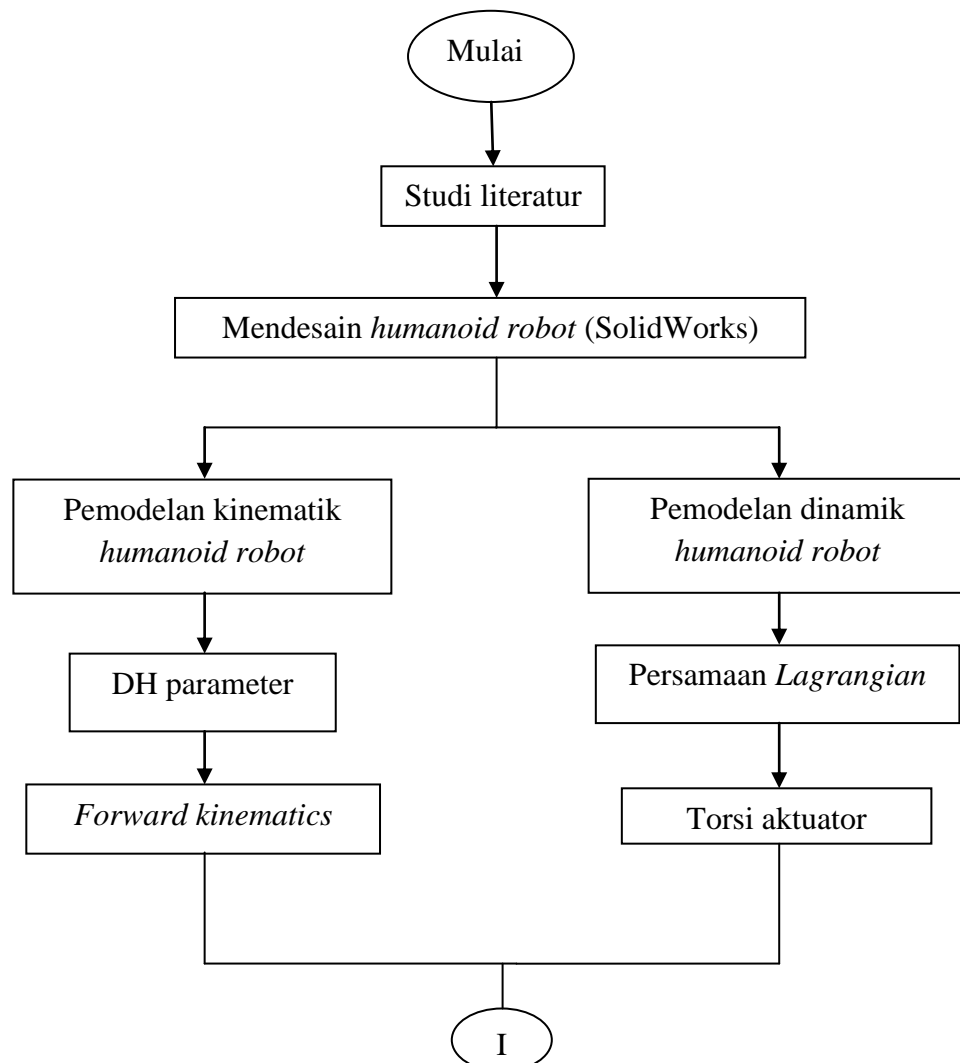
### 3.1.3 Pemodelan Dinamik dengan Persamaan *Lagrangian*

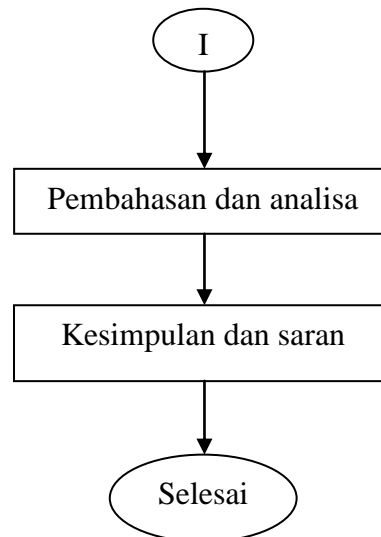
Pemodelan dinamik adalah pemodelan matematis yang menggambarkan tingkah laku dinamis dari manipulator dengan memperhatikan gaya yang menyebabkan

pergerakan tersebut. Pemodelan dinamik dapat menggunakan dua metode, yaitu pemodelan *Lagrangian* dan pemodelan *Newton-Euler*. Pemodelan *Lagrangian* merupakan pemodelan persamaan *Lagrangian* untuk menghitung torsi pada *joint* yang didapat dengan menjabarkan energi kinetik dan energi potensial pada tiap *link robot*. Pemodelan *Newton-Euler* berdasarkan pada hukum newton kedua untuk komponen translasi dan digabung dengan sudut Euler untuk komponen rotasi. Dalam penelitian ini, penulis dalam menganalisa pergerakan robot dengan persamaan *Lagrangian*.

### 3.2 Diagram Alir Penelitian

Dalam sebuah penelitian diperlukan diagram alir untuk menggambarkan bagaimana jalannya proses penelitian tersebut mulai dari awal hingga akhir yang dilakukan. Pada Gambar 3.2 adalah diagram alir desain *humanoid robot* dalam tugas akhir ini.





Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.

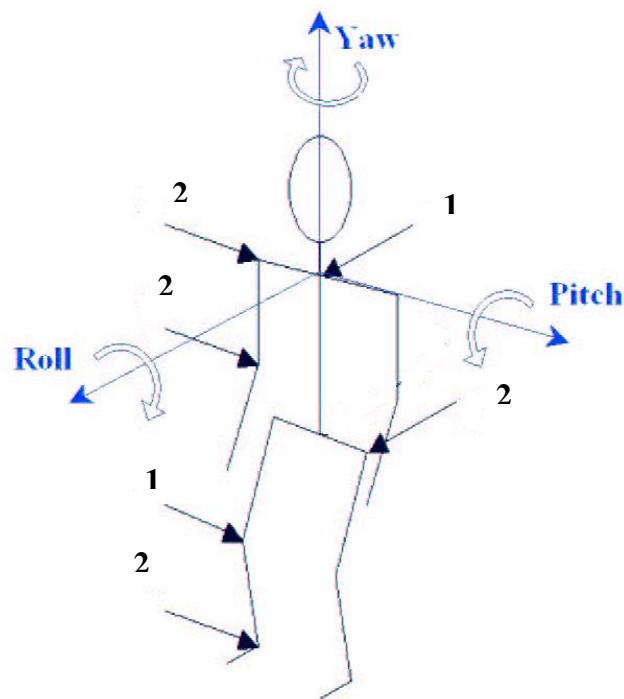
### 3.3. Pemodelan *Humanoid Robot* dengan SolidWorks

Dalam mendesain *humanoid robot* penulis merancanginya dengan menggunakan *software* SolidWorks. Hal ini dilakukan agar dalam melakukannya mendapat lebih jelas dan dapat mengurangi *miss understanding* pada gambar. Dengan program SolidWorks maka kita dapat melihat suatu benda dengan gambaran utuh atau perbagian dengan sudut pandang yang jelas dan dapat diatur dengan sudut pandang *isometric*. Sebelum mendesain *humanoid robot*, perlu diketahui terlebih dahulu tentang derajat kebebasan atau *Degrees of freedom* (DoF).

#### 3.3.1 Derajat Kebebasan atau *Degrees of Freedom* (DoF)

Derajat kebebasan merupakan jumlah variabel maksimum yang dibutuhkan untuk mendefinisikan gerak suatu benda. Gerakan manipulator dihasilkan dari adanya sendi (*joint*). Persendian antara dua buah lengan yang berhubungan dapat dibentuk dengan sifatnya sebagai *joint revolute* (putar) atau *joint prismatic* (geser). Dalam desain *humanoid robot* ini, persendiannya menggunakan *joint revolute* yang dapat berputar ke sumbu *longitudinal* (*roll*), sumbu *lateral* (*pitch*) atau sumbu *vertikal* (*yaw*).

Pada sendi pergelangan kaki (*ankle*) memiliki 2 DoF yaitu berputar ke sumbu *pitch* dan *roll*. Sendi lutut (*knee*) memiliki 1 DoF yaitu berputar ke sumbu *pitch*. Sendi pinggul (*hip*) memiliki 2 DoF yaitu berputar ke sumbu *pitch* dan *roll*. Pada sendi bahu memiliki 2 DoF yaitu berputar ke sumbu *pitch* dan *roll*. Sendi siku memiliki 2 DoF yaitu berputar ke sumbu *pitch* dan *yaw*. Dan pada sendi kepala memiliki 1 DoF yaitu berputar ke sumbu *yaw*. Total DoF dalam desain *humanoid robot* ini sebanyak 19 DoF. Lokasi dan keterangan DoF *humanoid robot* dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Tabel 3.1 di bawah.

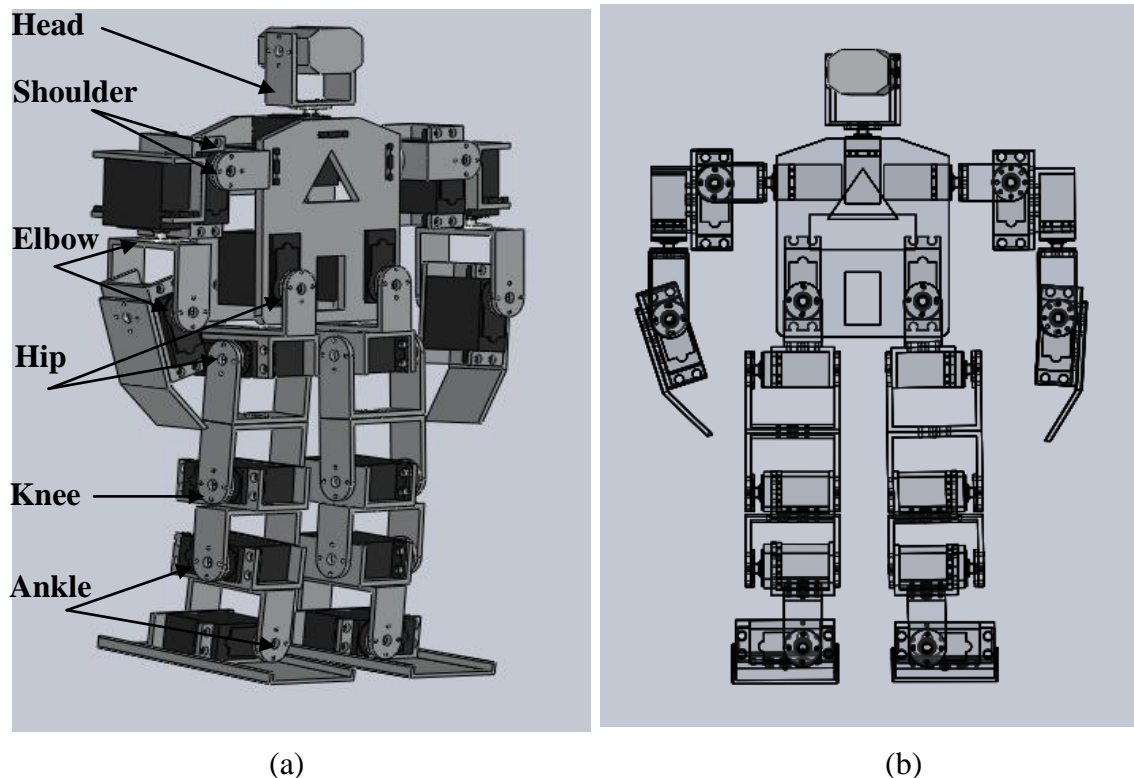


Gambar 3.3 Lokasi dan *degrees of freedom*.

Tabel 3.1 Lokasi dan *degrees of freedom*

Lokasi	DoF	Keterangan
Kepala ( <i>Head</i> )	1	<i>Yaw</i>
Bahu ( <i>Shoulder</i> )	2 x 2	<i>Pitch + Roll</i>
Siku ( <i>Elbow</i> )	2 x 2	<i>Pitch + Yaw</i>
Pinggul ( <i>Hip</i> )	2 x 2	<i>Pitch + Roll</i>
Lutut ( <i>Knee</i> )	2 x 1	<i>Pitch</i>
Pergelangan kaki ( <i>Ankle</i> )	2 x 2	<i>Pitch + Roll</i>
Total	19	

Lokasi *degrees of freedom* desain *humanoid robot* pada *software* SolidWorks dapat dilihat pada Gambar 3.4 dengan tampak *isometric* dan tampak depan. Pada setiap DoF terlihat mempunyai jarak, hal ini dikarenakan aktuatornya menggunakan *servomotor*. Sehingga pada pemasangan *servomotor* dipasang dengan diberi jarak dalam satu sendi untuk mempermudah dalam proses pembuatannya.

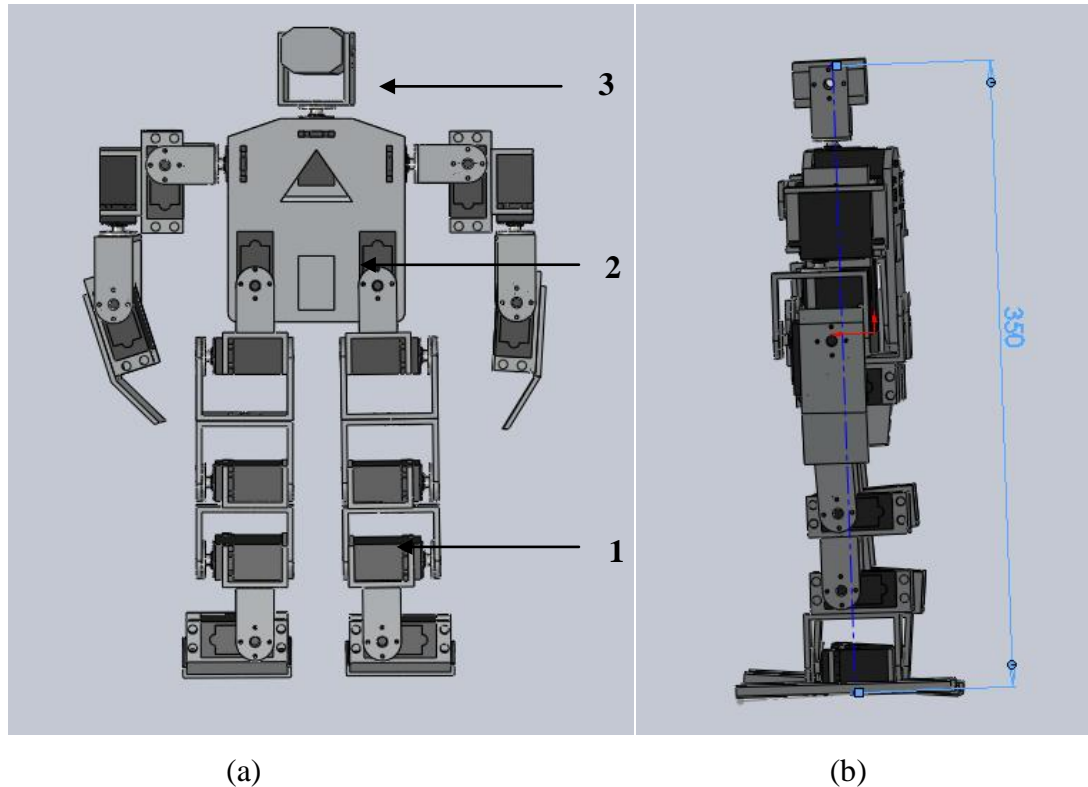


Gambar 3.4 Lokasi *degrees of freedom* tampak *isometric* (a) dan tampak depan (b) desain *humanoid robot*.

### 3.3.2 Desain Struktur *Humanoid Robot*

Dalam perkembangan robotik dewasa ini, banyak perusahaan maupun universitas yang bersaing mengembangkan dan memproduksi *humanoid robot* dengan biaya yang tidak murah dan waktu yang lama. Oleh karena itu, salah satu tujuan penelitian ini adalah mendesain konstruksi mekanik *humanoid robot* yang sederhana, murah, dan ringan. Sehingga untuk proses pembelajaran dalam lingkup universitas masih terjangkau dalam hal biaya maupun waktu. Desain struktur *humanoid robot* pada penelitian ini berukuran kecil dengan tinggi 350 mm yang memiliki 19 DoF. 5x2 DoF pada kaki, 4x2 DoF pada lengan, dan 1x1 DoF pada kepala. Struktur *humanoid robot*

dapat dibagi dalam 3 komponen, yaitu kaki, badan, dan kepala. Gambar 3.5 menunjukkan desain struktur *humanoid robot*.



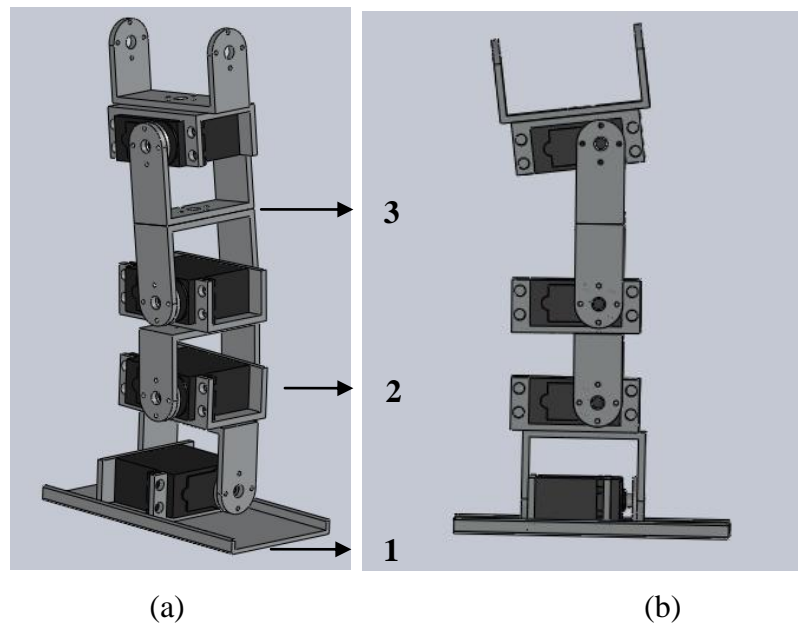
Gambar 3.5 Desain *humanoid robot* tampak depan (a) dan tampak samping (b).

Keterangan Gambar 3.5 adalah sebagai berikut:

- 1 = Kaki (*leg*)
- 2 = Badan (*body*)
- 3 = kepala (*head*)

### 3.3.2.1 Kaki (*leg*)

Desain pada kaki dengan panjang 210,1 mm memiliki 5 *joint* dan memiliki 4 *link*. *Link* merupakan penghubung antara *joint* ke satu ke *joint* berikutnya. Kaki *humanoid robot* ini terdiri dari 3 komponen, yaitu telapak kaki (*feet*), betis (*shank*) dan paha (*thigh*). Desain kaki *humanoid robot* dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Kaki (*Leg*) tampak isometric (a) dan tampak samping (b).

Keterangan Gambar 3.6 adalah sebagai berikut:

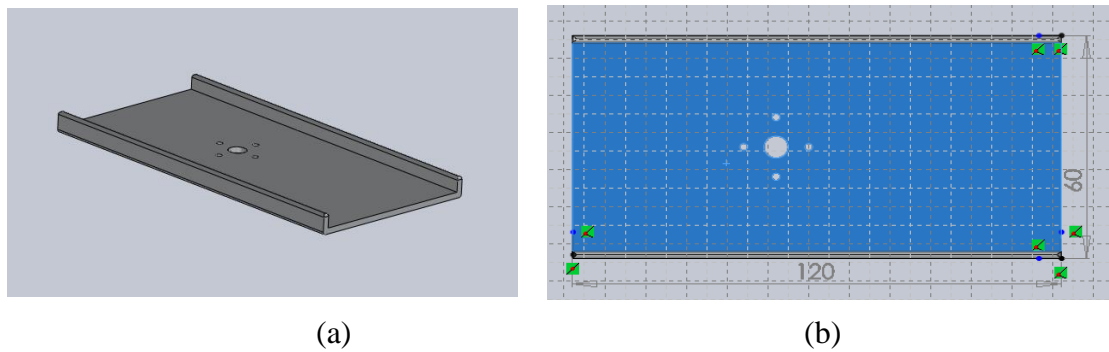
1 = Telapak kaki

2 = Betis

3 = Paha

a. Telapak kaki

Telapak kaki berfungsi sebagai titik keseimbangan, sehingga di desain dengan bentuk dan dimensi yang tampak pada Gambar 3.7 di bawah ini. Dimensi dari telapak kaki ini dengan panjang 120 mm dan lebar 60 mm. Pada telapak kaki ini ada *joint ankle* yang menghubungkan ke betis.

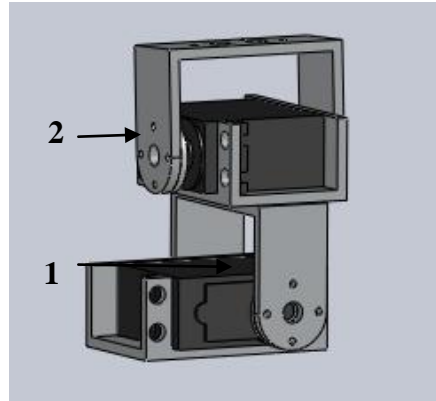


Gambar 3.7 Telapak kaki tampak *isometric* (a) dan tampak depan (b).



b. Betis

Pada betis ini memiliki 2 *link* yang menghubungkan *joint ankle* ke *joint knee*. Bentuk betis dan dimensi *link* dapat dilihat pada Gambar 3.8 dan Gambar 3.9 di bawah.

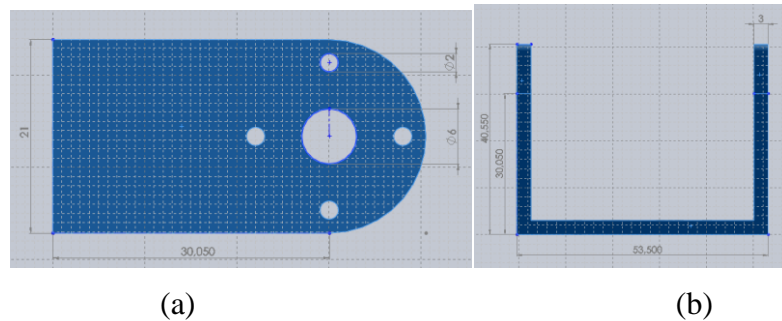


Gambar 3.8 Betis tampak *isometric*.

Keterangan Gambar 3.8 adalah sebagai berikut:

- 1 = *link* 1
- 2 = *link* 2

1. *Link* 1



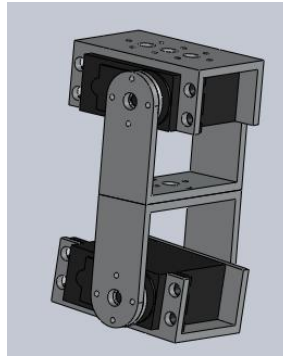
Gambar 3.9 Sketsa *link* 1 tampak samping (a) dan tampak depan (b).

2. *Link* 2

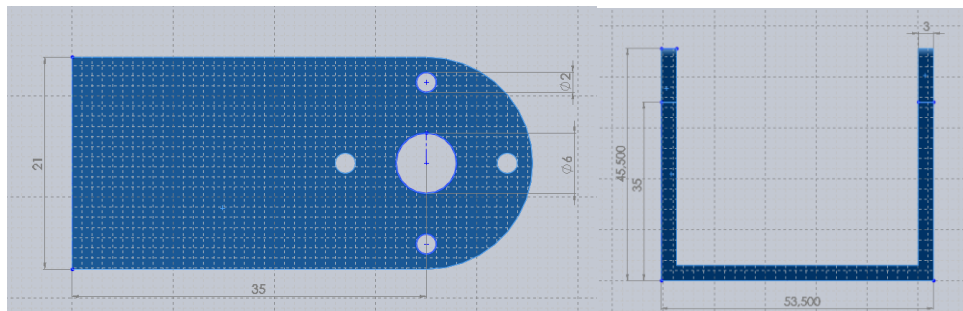
Bentuk dan dimensi *link* 2 pada betis sama dengan *link* 1 yang dapat dilihat pada Gambar 3.9 sebelumnya.

c. Paha

Pada paha memiliki 1 *link* yang menghubungkan *joint knee* ke *joint hip*. Bentuk paha dan dimensi *link* dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah.



(a)



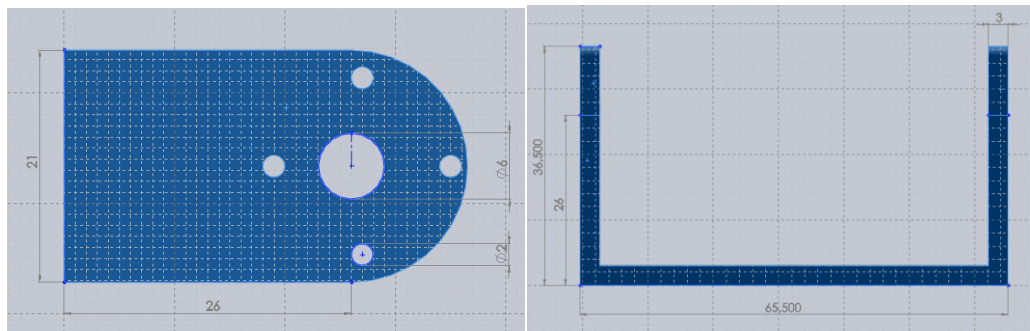
(b)

(c)

Gambar 3.10 Paha (a) dan sketsa *link* tampak samping (a) dan tampak depan (b).

#### d. Pinggul (*hip*)

Sendi pinggul mempunyai 2 DoF yang dihubungkan dengan 1 *link*. Bentuk dan dimensi *link* pada *hip* dapat dilihat pada Gambar 3.11. *Joint hip* merupakan penghubung antara kaki dengan badan.



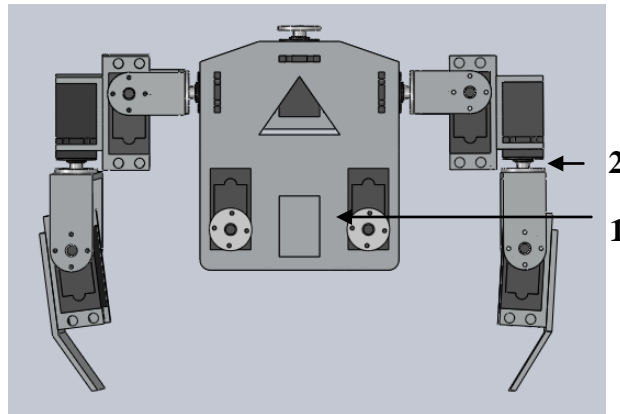
(a)

(b)

Gambar 3.11 Sketsa *link* pada *hip* tampak samping (a) dan tampak depan (b).

### 3.3.2.2 Badan (*body*)

Badan terdiri dari *torso* dan lengan (*arm*). Bentuk dan komponen dari badan dapat dilihat pada Gambar 3.12



Gambar 3.12 Badan tampak depan.

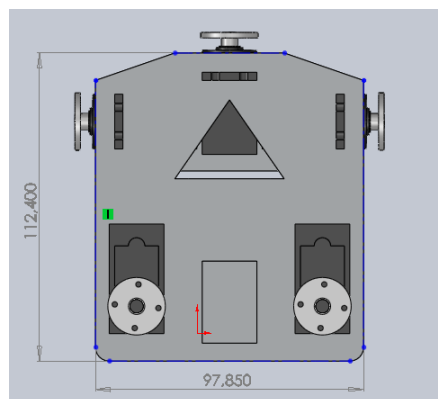
Keterangan Gambar 3.11 adalah sebagai berikut:

1 = *Torso*

2 = Lengan

a. *Torso* (batang tubuh)

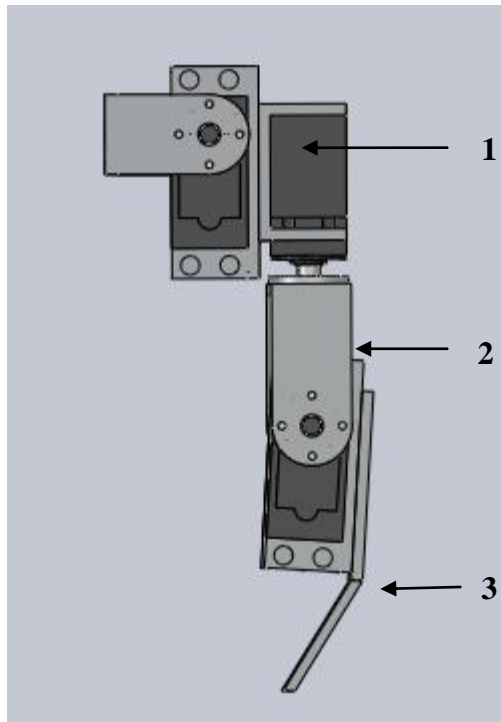
Desain *Torso* merupakan bagian yang penting bagi robot. *Torso* berfungsi menghubungkan semua *limbs* (anggota badan robot), tempat menempatkan *on board computer* dan baterai. Pada *torso* membutuhkan 5 buah *servomotor* untuk menggerakkan tiap *limbs* robot. Dua *servomotor* untuk menggerakkan kaki, dua *servomotor* untuk menggerakkan lengan, dan satu *servomotor* untuk menggerakkan kepala. Gambar 3.13 adalah desain *torso humanoid robot* yang dapat dilihat di bawah ini.



Gambar 3.13 *Torso*.

b. Lengan (*arm*)

Desain lengan *humanoid robot* memiliki 4 *joint* yang dihubungkan dengan 3 *link*. Struktur dari lengan itu sendiri terdiri dari bahu, siku dan pergelangan tangan. Sendi bahu merupakan penghubung antara *torso* dengan lengan. Pada bahu memiliki 2 DoF yang berputar 50ea rah *pitch and roll* dan pada siku memiliki 2 DoF yang berputar ke arah *pitch* dan *yaw*. Gambar 3.14 adalah desain tangan *humanoid robot*.



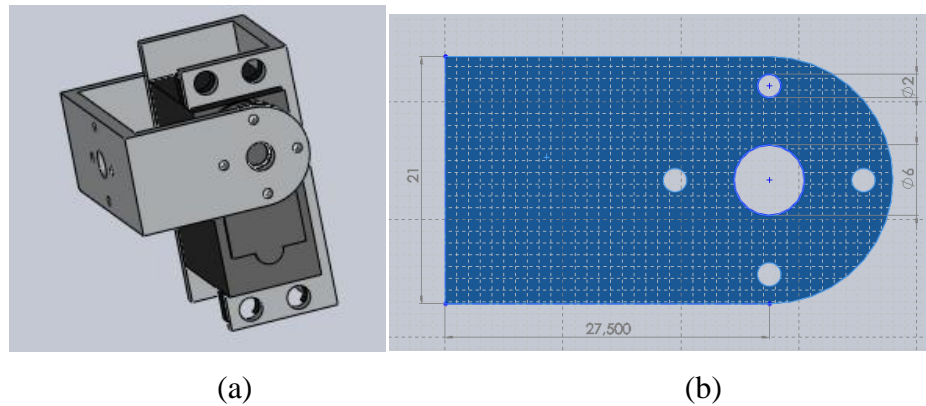
Gambar 3.14 Tangan (*arm*).

Keterangan Gambar 3.14 adalah sebagai berikut:

- 1 = Bahu
- 2 = Siku
- 3 = Telapak tangan

1. Bahu

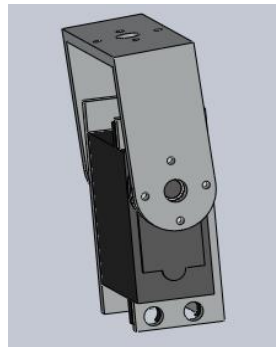
Pada sendi bahu memiliki 2 DoF yang mempunyai jarak antar sendi. Jarak antar sendi dihubungkan 1 *link*. Desain bahu, sketsa dan dimensi *link* dapat dilihat pada Gambar 3.15 di bawah ini.



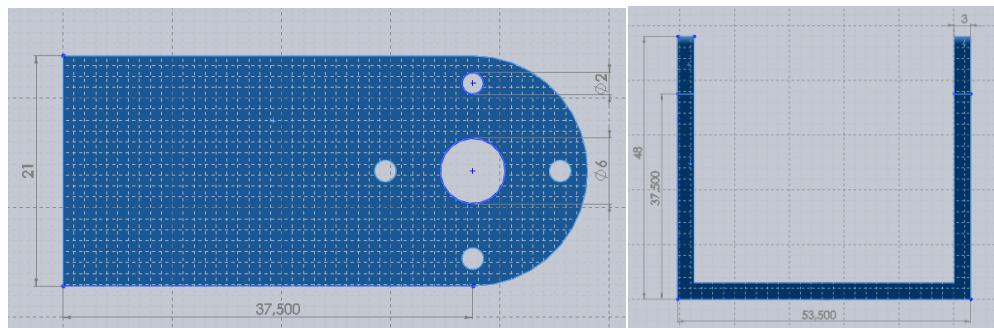
Gambar 3.15 Bahu (a), *link* tampak samping (b) dan *link* tampak depan(c).

## 2. Siku

Pada sendi siku memiliki 2 DoF yang mempunyai jarak antar sendi. Jarak antar sendi tersebut dihubungkan dengan *link*. Bentuk bahu, sketsa dan dimensi *link* dapat dilihat pada Gambar 3.16.



(a)



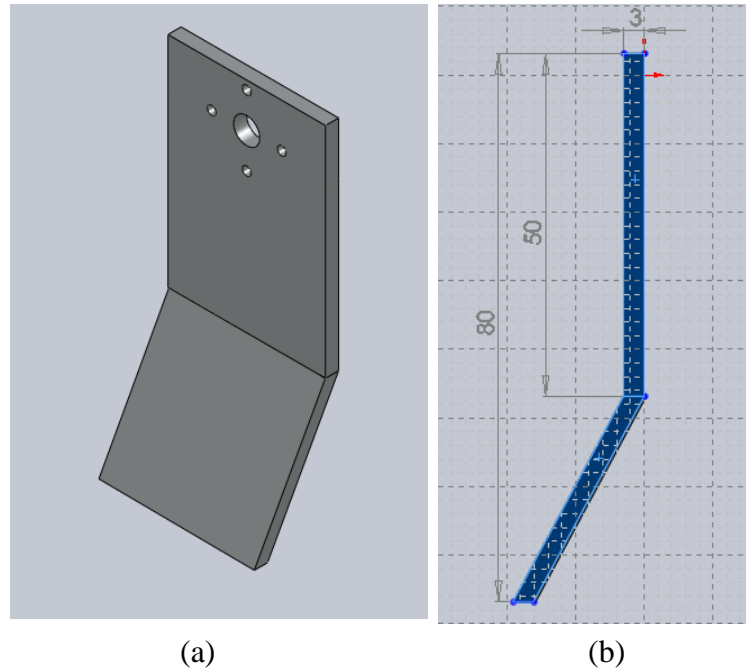
(b)

(c)

Gambar 3.16 Bahu (a), Sketsa *link* tampak samping (b) dan tampak depan (c).

### 3. Telapak Tangan

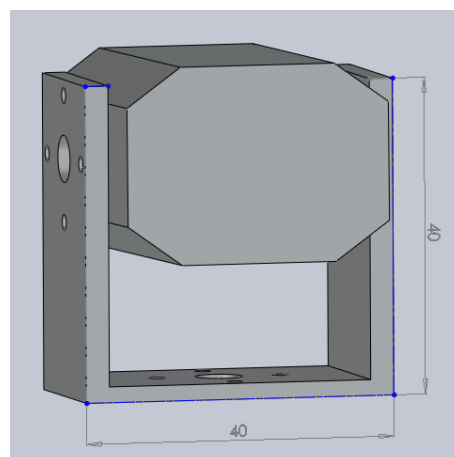
Desain telapak tangan dan dimensi dapat dilihat pada Gambar 3.17 di bawah ini.



Gambar 3.17 Telapak tangan sudut pandang *isometric* (a) dan sketsa tampak depan (b).

#### 3.3.2.3 Kepala (*head*)

Pada desain kepala dapat dilihat pada Gambar 3.18 di bawah ini.



Gambar 3.18 Kepala tampak *isometric*.

### 3.4 Pemodelan Kinematik *Humanoid Robot*

Kinematika robot adalah studi analitis pergerakan kaki atau lengan robot terhadap sistem kerangka koordinat acuan yang diam atau bergerak tanpa memperhatikan gaya yang menyebabkan pergerakan tersebut. Dari persamaan kinematik dapat diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang biasa dipakai untuk menentukan kedudukan dari suatu obyek. Ada tiga tahapan untuk menentukan model kinematik pada robot, yaitu langkah pertama menentukan *frames link* robot, langkah kedua mengindifikasi 4 *link* parameter pada setiap *link* robot, dan yang ketiga menemukan hubungan matrik transformasi.

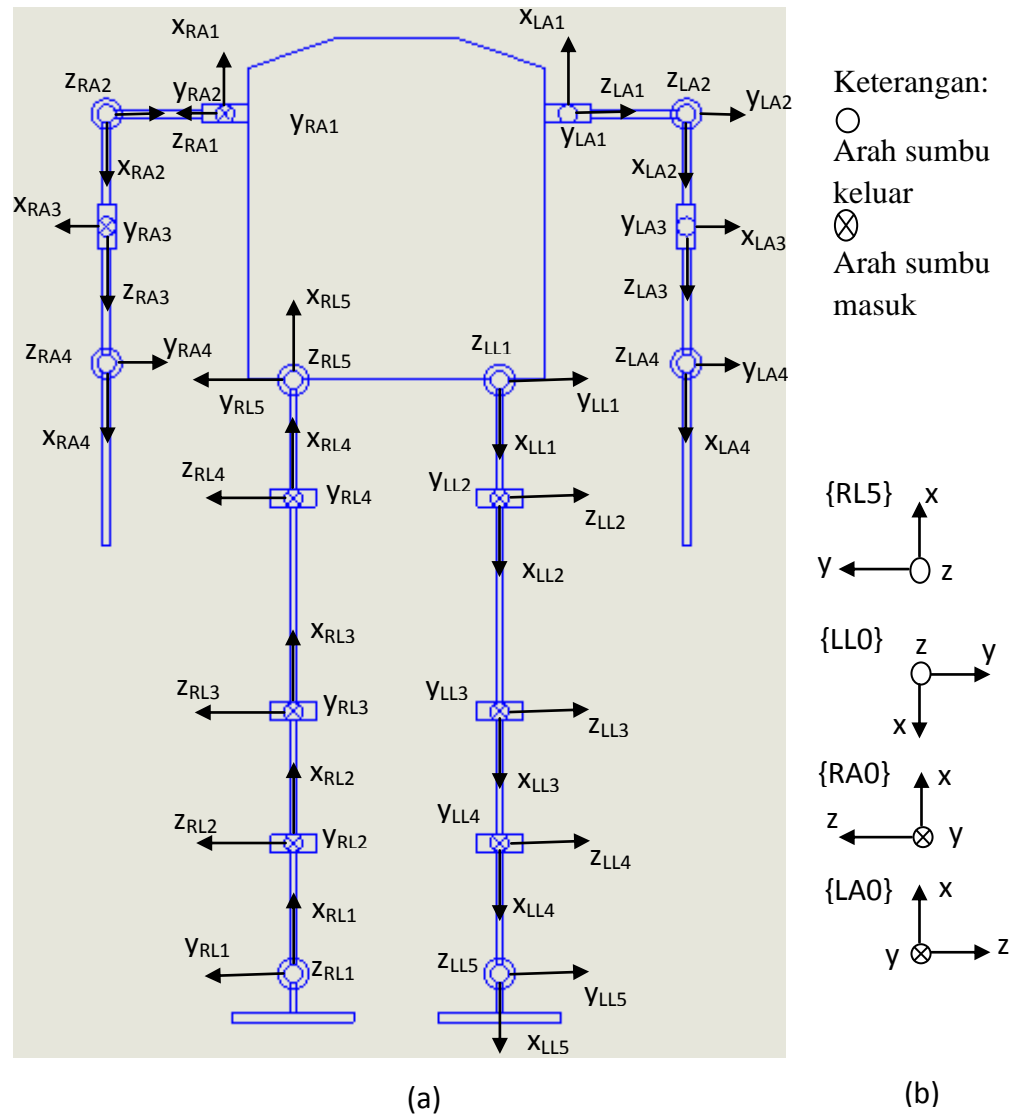
#### 3.4.1 Menentukan *Frames* Robot

Dalam menentukan *frames humanoid robot* dibagi dalam empat rantai (*chain*), yaitu:

- a. *Chain* 1 terdiri atas kaki pendukung (*supporting leg*), dimulai dari kaki dan berakhir pada hip.
- b. *Chain* 2 dimulai dari hip dan berakhir pada kaki (*non-supporting leg*).
- c. *Chain* 3 terdiri atas lengan kanan, dimulai dari bahu dan berakhir pada telapak tangan.
- d. *Chain* 4 terdiri atas lengan kiri, dimulai dari bahu dan berakhir pada telapak tangan.

*Chain* 1 agar terpasang dengan *chain* 2, 3 dan 4 dengan menggunakan persamaan matriks transformasi homogen.

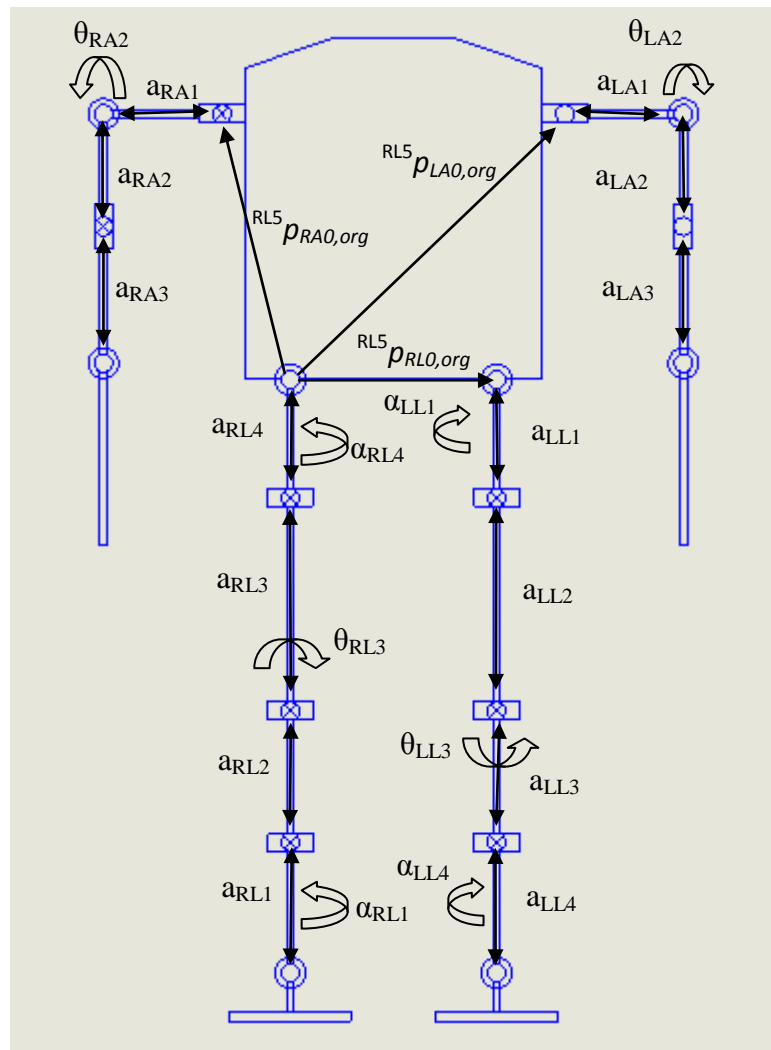
*Frames humanoid robot* dapat di lihat pada Gambar 3.19 di bawah ini. Pada gambar, kaki kanan (*Right Leg*) disingkat dengan RL, kaki kiri (*Left Leg*) disingkat dengan LL, tangan kanan (*Right Arm*) disingkat dengan RA, dan tangan kiri (*Left Arm*) disingkat dengan LA. RL1 menunjukkan *joint* pertama pada kaki kanan robot. LL1 menunjukkan *joint* pertama pada kaki kiri robot. RA1 menunjukkan *joint* pertama pada tangan kanan robot. LA1 menunjukkan *joint* pertama pada tangan kiri robot.



Gambar 3.19 *Frames humanoid robot* dengan kaki kanan sebagai *supporting foot* (a) dan detail *frame* {RL5}, {LL0}, {RA0} dan {LA0} (b).

Pada Gambar 3.20 menggambarkan *link* parameter yaitu panjang *link*  $a_{i-1}$ , perubahan sudut *joint*  $\theta_i$ , dan perubahan arah sudut *joint*  $\alpha_{i-1}$ .





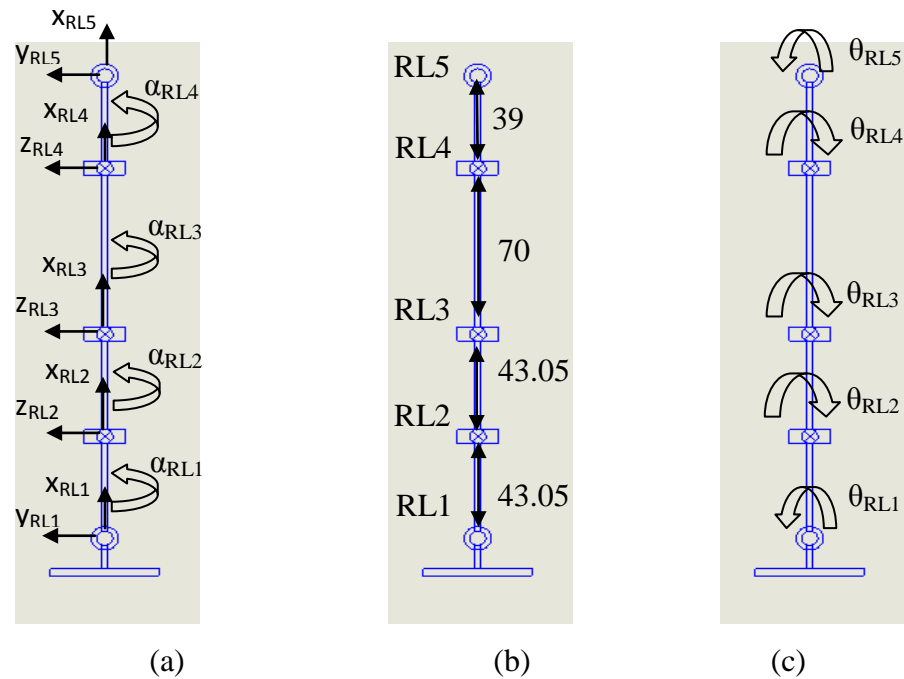
Gambar 3.20 *Link parameter humanoid robot.*

### 3.4.2 Mengidentifikasi *Link* Parameter

Mengidentifikasi *link* parameter dengan notasi Denavit dan Hartenberg (DH). DH parameter memperkenalkan pendekatan sistematis dan pendekatan umum menggunakan matriks algebra untuk menyatakan dan menunjukkan geometri spasial pada *link* pada frame *link* parameter *humanoid robot*. DH parameter pada kaki kanan, kaki kiri, tangan kanan, dan tangan kiri dapat ditentukan sebagai berikut.

a. DH Parameter Kaki Kanan / *Right Leg* (RL)

Desain kaki kanan humanoid robot memiliki 5 *joint* yang dihubungkan dengan 4 *link*. Untuk mencari DH parameter pada kaki kanan di mulai dari *joint* pertama (*ankle*) dengan notasi RL1 dan berakhir pada *joint* kelima (*hip*) dengan notasi RL5.



Gambar 3.21 *Link* parameter perubahan arah sudut *joint*  $\alpha_{i-1}$  (a), panjang *link*  $a_{i-1}$  (b) dan perubahan sudut *joint*  $\theta_i$  (c) pada kaki kanan.

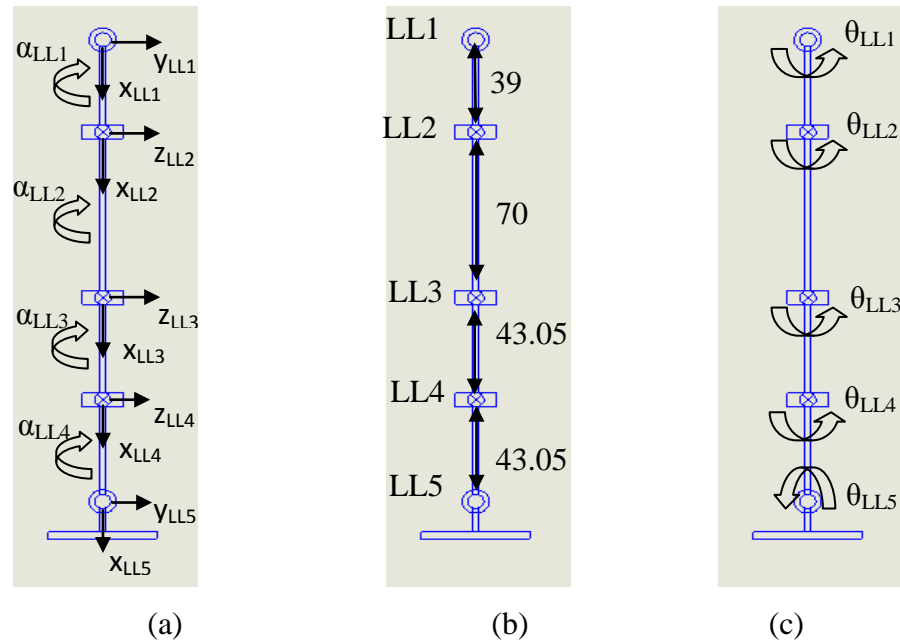
Dari Gambar 3.21 menunjukkan link parameter pada kaki kanan sehingga DH parameter pada kaki kanan dapat diketahui yang ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 DH parameter pada kaki kanan / *Right Leg* (RL)

<i>Link</i> <i>i</i>	$\alpha_{RL,i-1}$ [°]	$a_{RL,i-1}$ [mm]	$d_{RL,i}$ [mm]	$\theta_{RL,i}$ [°]
1	0	0	0	$\theta_{RL1}$
2	-90	43.05	0	$\theta_{RL2}$
3	0	43.05	0	$\theta_{RL3}$
4	0	70	0	$\theta_{RL4}$
5	90	39	0	$\theta_{RL5}$

b. DH Parameter Kaki Kiri / Left Leg (LL)

Desain kaki kiri humanoid robot memiliki 5 *joint* yang dihubungkan dengan 4 *link*. Untuk mencari DH parameter pada kaki kiri di mulai dari *joint* pertama (*hip*) dengan notasi LL1 dan berakhir pada *joint* kelima (*ankle*) dengan notasi LL5.



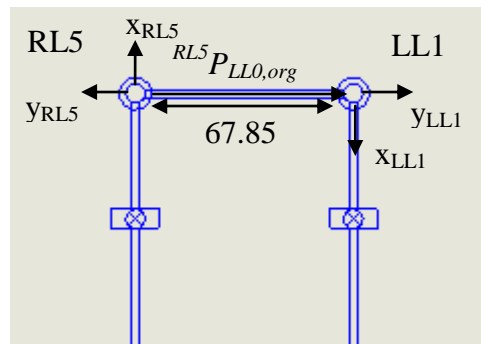
Gambar 3.21 *Link* parameter perubahan arah sudut *joint*  $\alpha_{i-1}$  (a), panjang *link*  $a_{i-1}$  (b) dan perubahan sudut *joint*  $\theta_i$  (c) pada kaki kiri.

Dari Gambar 3.21 menunjukkan *link* parameter pada kaki kiri sehingga DH parameter pada kaki kiri dapat diketahui yang ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 DH parameter pada kaki kiri / *Left Leg* (LL)

<i>Link</i> <i>i</i>	$\alpha_{LL,i-1}$ [°]	$a_{LL,i-1}$ [mm]	$d_{LL,i}$ [mm]	$\theta_{LL,i}$ [°]
1	0	0	0	$\theta_{LL1}$
2	-90	39	0	$\theta_{LL2}$
3	0	70	0	$\theta_{LL3}$
4	0	43.05	0	$\theta_{LL4}$
5	90	43.05	0	$\theta_{LL5}$

Vektor  ${}^{RL5}P_{LL0,org}$ ,  ${}^{RL5}P_{RA0,org}$ , dan  ${}^{RL5}P_{LA0,org}$ , posisi *frame* {LL0}, {RA0} dan {LA0} relatif terhadap {RL0}. *Orientasi frame* {LL0}, {RA0} dan {LA0} relatif terhadap {RL0} diperoleh dengan menurunkan matrik rotasi yang berhubungan.



Gambar 3.22 Vektor posisi  ${}^{RL5}P_{LL0,org}$ .

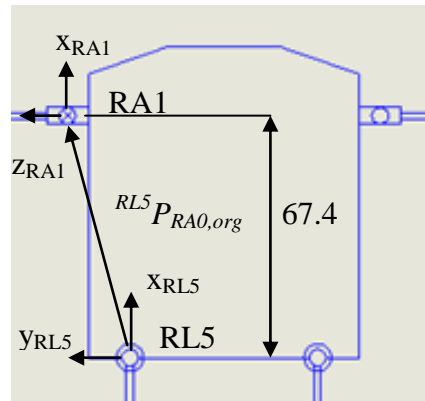
Pada Gambar 3.22 Menunjukkan vektor posisi dari *joint* kelima kaki kanan (*frame* RL5) ke *joint* pertama kaki kiri (*frame* LL0), yaitu:

$${}^{RL5}P_{LL0,org} = \begin{bmatrix} 0 \\ -67.85 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dan matrik rotasi *frame* LL0 relatif terhadap *frame* RL5 berputar  $180^\circ$  terhadap sumbu z, yaitu:

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{LL0}^{RL5}R = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Gambar 3.23 Vektor posisi  ${}^{RL5}P_{RA0,org}$ .

Pada Gambar 3.23 menunjukkan vektor posisi  ${}^{RL5}P_{RA0,org}$  dari *joint* kelima kaki kanan (*frame* RL5) ke *joint* pertama tangan kanan (*frame* RA0), yaitu:

$${}^{RL5}P_{RA0,org} = \begin{bmatrix} 67.4 \\ 22.5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

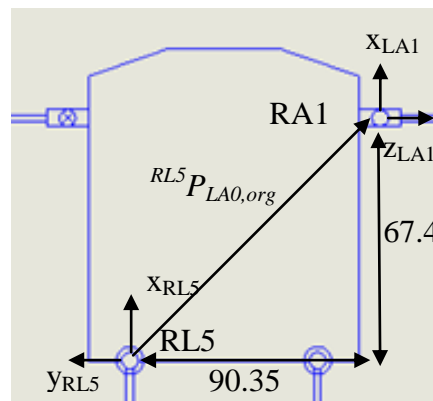
Dan matrik rotasi frame RA0 relatif terhadap frame RL5 berputar  $-90^\circ$  terhadap sumbu x, yaitu:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

RL5

RA1

$${}^{RL5}_{LL0}R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$



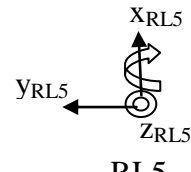
Gambar 2.24 posisi  ${}^{RL5}P_{LA0,org}$ .

Pada Gambar 3.24 menunjukkan vektor posisi  ${}^{RL5}P_{LA0,org}$  dari *joint* kelima kaki kanan (*frame* RL5) ke *joint* pertama tangan kiri (*frame* LA0), yaitu:

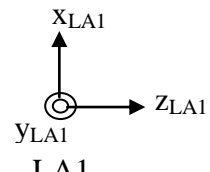
$${}^{RL5}P_{LA0,org} = \begin{bmatrix} 67.4 \\ -90.35 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dan matrik rotasi *frame* LA0 relatif terhadap *frame* RL5 berputar  $90^\circ$  terhadap sumbu x, yaitu:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$



RL5

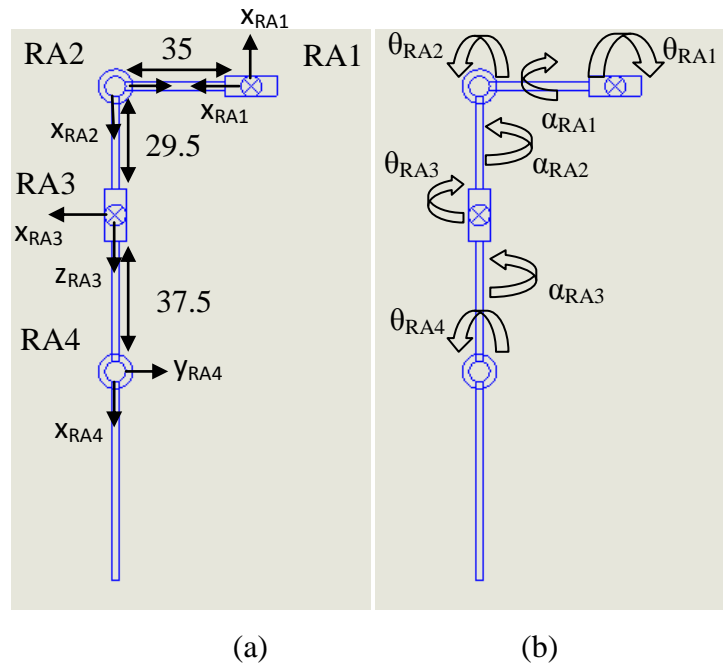


LA1

$${}^{RL5}_{LL0}R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

#### c. DH Parameter Tangan Kanan / Right Arm (RA)

Desain tangan kanan humanoid robot memiliki 4 *joint* yang dihubungkan dengan 3 *link*. Untuk mencari DH parameter pada tangan kanan di mulai dari *joint* pertama (*shoulder*) dengan notasi RA1 dan berakhir pada *joint* kelima (*elbow*) dengan notasi RA4.



Gambar 3.25 *Link* parameter panjang *link*  $a_{i-1}$  (a), perubahan arah sudut *joint*  $\alpha_{i-1}$  dan perubahan sudut *joint*  $\theta_i$  (b) pada tangan kanan.

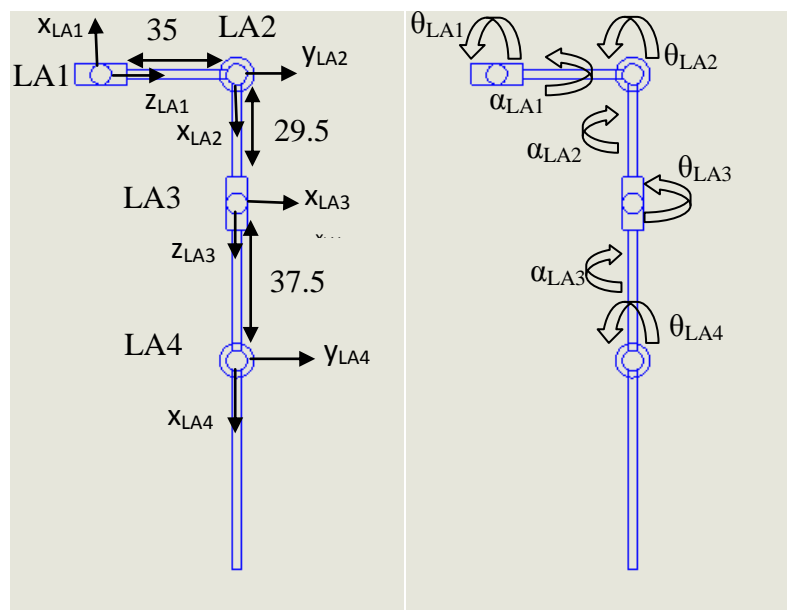
Dari Gambar 3.25 menunjukkan *link* parameter pada tangan kanan sehingga DH parameter pada tangan kanan dapat diketahui yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 DH parameter pada tangan kanan / *Right Arm* (RA)

$i$	$\alpha_{RA,i-1}$ [°]	$a_{RA,i-1}$ [mm]	$d_{RA,i}$ [mm]	$\theta_{RA,i}$ [°]
1	0	0	0	$\theta_{RA1}$
2	90	35	0	$\theta_{RA2}$
3	-90	29.5	0	$\theta_{RA3}$
4	90	37.5	0	$\theta_{RA4}$

d. DH Parameter Tangan Kiri / *Left Arm* (LA)

Desain tangan kiri humanoid robot memiliki 4 *joint* yang dihubungkan dengan 3 *link*. Untuk mencari DH parameter pada tangan kiri di mulai dari *joint* pertama (*shoulder*) dengan notasi LA1 dan berakhir pada *joint* kelima (*elbow*) dengan notasi LA4.



Gambar 3.26 *Link* parameter panjang *link*  $a_{i-1}$  (a), perubahan arah sudut *joint*  $\alpha_{i-1}$  dan perubahan sudut *joint*  $\theta_i$  (b) pada tangan kiri.

Dari Gambar 3.26 menunjukkan link parameter pada tangan kiri sehingga DH parameter pada tangan kiri dapat diketahui yang ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 DH parameter pada tangan kiri / *Left Arm* (LA)

i	$\alpha_{LA,i-1}$ [°]	$a_{LA,i-1}$ [mm]	$d_{LA,i}$ [mm]	$\theta_{LA,i}$ [°]
1	0	0	0	$\theta_{LA1}$
2	-90	35	0	$\theta_{LA2}$
3	90	29.5	0	$\theta_{LA3}$
4	-90	37.5	0	$\theta_{LA4}$

### 3.4.3 Menentukan Matriks Transformasi

Persamaan matrik transformasi dari *frames* {i} ke {i - 1} berdasarkan empat parameter *link*  $\alpha_i$ ,  $a_i$ ,  $d_i$ , dan  $\theta_i$  sebagai berikut:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos a_{i-1} & \cos\theta_i \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & -d_i \sin a_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin a_{i-1} & \cos\theta_i \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & -d_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

#### a. Matrik Transformasi pada Kaki Kanan / Right Leg (RL)

Matriks transformasi pada kaki kanan dapat ditentukan dengan menggunakan DH parameter pada Tabel 3.2 yang disubstitusikan pada persamaan 3.1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} {}^{RL0}T_{RL1} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL1} & -\sin\theta_{RL1} & 0 & a_{RL0} \\ \sin\theta_{RL1} \cos a_{RL0} & \cos\theta_{RL1} \cos a_{RL0} & -\sin a_{RL0} & -d_{RL1} \sin a_{RL0} \\ \sin\theta_{RL1} \sin a_{RL0} & \cos\theta_{RL1} \sin a_{RL0} & \cos a_{RL0} & -d_{RL1} \cos a_{RL0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL1} & -\sin\theta_{RL1} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{RL1} \cos 0 & \cos\theta_{RL1} \cos 0 & -\sin 0 & 0 \sin 0 \\ \sin\theta_{RL1} \sin 0 & \cos\theta_{RL1} \sin 0 & \cos 0 & 0 \cos 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL1} & -\sin\theta_{RL1} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{RL1} & \cos\theta_{RL1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
{}^{RL1}T_{RL2} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL2} & -\sin\theta_{RL2} & 0 & a_{RL1} \\ \sin\theta_{RL2} \cos a_{RL1} & \cos\theta_{RL2} \cos a_{RL1} & -\sin a_{RL1} & -d_{RL2} \sin a_{RL1} \\ \sin\theta_{RL2} \sin a_{RL1} & \cos\theta_{RL2} \sin a_{RL1} & \cos a_{RL1} & -d_{RL2} \cos a_{RL1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL2} & -\sin\theta_{RL2} & 0 & 43.05 \\ \sin\theta_{RL2} \cos -90 & \cos\theta_{RL2} \cos -90 & -\sin -90 & 0 \sin -90 \\ \sin\theta_{RL2} \sin -90 & \cos\theta_{RL2} \sin -90 & \cos -90 & 0 \cos -90 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL2} & -\sin\theta_{RL2} & 0 & 43.05 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{RL2} & -\cos\theta_{RL2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{RL2}T_{RL3} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL3} & -\sin\theta_{RL3} & 0 & a_{RL2} \\ \sin\theta_{RL3} \cos a_{RL2} & \cos\theta_{RL3} \cos a_{RL2} & -\sin a_{RL2} & -d_{RL3} \sin a_{RL2} \\ \sin\theta_{RL3} \sin a_{RL2} & \cos\theta_{RL3} \sin a_{RL2} & \cos a_{RL2} & -d_{RL3} \cos a_{RL2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL3} & -\sin\theta_{RL3} & 0 & 43.05 \\ \sin\theta_{RL3} \cos 0 & \cos\theta_{RL3} \cos 0 & -\sin 0 & 0 \sin 0 \\ \sin\theta_{RL3} \sin 0 & \cos\theta_{RL3} \sin 0 & \cos 0 & 0 \cos 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL3} & -\sin\theta_{RL3} & 0 & 43.05 \\ \sin\theta_{RL3} & \cos\theta_{RL3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.4}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{RL3}T_{RL4} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL4} & -\sin\theta_{RL4} & 0 & a_{RL3} \\ \sin\theta_{RL4} \cos a_{RL3} & \cos\theta_{RL4} \cos a_{RL3} & -\sin a_{RL3} & -d_{RL4} \sin a_{RL3} \\ \sin\theta_{RL4} \sin a_{RL3} & \cos\theta_{RL4} \sin a_{RL3} & \cos a_{RL3} & -d_{RL4} \cos a_{RL3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL4} & -\sin\theta_{RL4} & 0 & 70 \\ \sin\theta_{RL4} \cos 0 & \cos\theta_{RL4} \cos 0 & -\sin 0 & 0 \sin 0 \\ \sin\theta_{RL4} \sin 0 & \cos\theta_{RL4} \sin 0 & \cos 0 & 0 \cos 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL4} & -\sin\theta_{RL4} & 0 & 70 \\ \sin\theta_{RL4} & \cos\theta_{RL4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{RL4}T_{RL5} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL5} & -\sin\theta_{RL5} & 0 & a_{RL4} \\ \sin\theta_{RL5} \cos a_{RL4} & \cos\theta_{RL5} \cos a_{RL4} & -\sin a_{RL4} & -d_{RL5} \sin a_{RL4} \\ \sin\theta_{RL5} \sin a_{RL4} & \cos\theta_{RL5} \sin a_{RL4} & \cos a_{RL4} & -d_{RL5} \cos a_{RL4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL5} & -\sin\theta_{RL5} & 0 & 39 \\ \sin\theta_{RL5} \cos 90 & \cos\theta_{RL5} \cos 90 & -\sin 90 & 0 \sin 90 \\ \sin\theta_{RL5} \sin 90 & \cos\theta_{RL5} \sin 90 & \cos 90 & 0 \cos 90 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{RL5} & -\sin\theta_{RL5} & 0 & 39 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_{RL5} & \cos\theta_{RL5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.6}
\end{aligned}$$

b. Matrik Transformasi pada Kaki Kiri / Left Leg (LL)

Matriks transformasi pada kaki kiri dapat ditentukan dengan menggunakan DH parameter pada Tabel 3.3 yang disubstitusikan pada persamaan 3.1 sebagai berikut:

$${}^{RL5}T_{LL0} = \begin{bmatrix} {}^{RL5}T_{LL0} & {}^{RL5}P_{LL0,org} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -67.85 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LL0}T_{LL1} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL1} & -\sin\theta_{LL1} & 0 & a_{LL0} \\ \sin\theta_{LL1} \cos a_{LL0} & \cos\theta_{LL1} \cos a_{LL0} & -\sin a_{LL0} & -d_{LL1} \sin a_{LL0} \\ \sin\theta_{LL1} \sin a_{LL0} & \cos\theta_{LL1} \sin a_{LL0} & \cos a_{LL0} & -d_{LL1} \cos a_{LL0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL1} & -\sin\theta_{LL1} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{LL1} & \cos\theta_{LL1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.7}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LL1}T_{LL2} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL2} & -\sin\theta_{LL2} & 0 & a_{LL1} \\ \sin\theta_{LL2} \cos a_{LL1} & \cos\theta_{LL2} \cos a_{LL1} & -\sin a_{LL1} & -d_{LL2} \sin a_{LL1} \\ \sin\theta_{LL2} \sin a_{LL1} & \cos\theta_{LL2} \sin a_{LL1} & \cos a_{LL1} & -d_{LL2} \cos a_{LL1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL2} & -\sin\theta_{LL2} & 0 & 39 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{LL2} & -\cos\theta_{LL2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LL2}T_{LL3} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL3} & -\sin\theta_{LL3} & 0 & a_{LL2} \\ \sin\theta_{LL3} \cos a_{LL2} & \cos\theta_{LL3} \cos a_{LL2} & -\sin a_{LL2} & -d_{LL3} \sin a_{LL2} \\ \sin\theta_{LL3} \sin a_{LL2} & \cos\theta_{LL3} \sin a_{LL2} & \cos a_{LL2} & -d_{LL3} \cos a_{LL2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL3} & -\sin\theta_{LL3} & 0 & 70 \\ \sin\theta_{LL3} & \cos\theta_{LL3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LL3}T_{LL4} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL4} & -\sin\theta_{LL4} & 0 & a_{LL3} \\ \sin\theta_{LL4} \cos a_{LL3} & \cos\theta_{LL4} \cos a_{LL3} & -\sin a_{LL3} & -d_{LL4} \sin a_{LL3} \\ \sin\theta_{LL4} \sin a_{LL3} & \cos\theta_{LL4} \sin a_{LL3} & \cos a_{LL3} & -d_{LL4} \cos a_{LL3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL4} & -\sin\theta_{LL4} & 0 & 43.05 \\ \sin\theta_{LL4} & \cos\theta_{LL4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LL4}T_{LL5} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL5} & -\sin\theta_{LL5} & 0 & a_{LL4} \\ \sin\theta_{LL5} \cos a_{LL4} & \cos\theta_{LL5} \cos a_{LL4} & -\sin a_{LL4} & -d_{LL5} \sin a_{LL4} \\ \sin\theta_{LL5} \sin a_{LL4} & \cos\theta_{LL5} \sin a_{LL4} & \cos a_{LL4} & -d_{LL5} \cos a_{LL4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LL5} & -\sin\theta_{LL5} & 0 & 43.05 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_{LL5} & \cos\theta_{LL5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)
\end{aligned}$$

c. Matrik Transformasi pada Tangan Kanan / Right Arm (RA)

Matriks transformasi pada tangan kanan dapat ditentukan dengan menggunakan DH parameter pada Tabel 3.4 yang disubstitusikan pada persamaan 3.1 sebagai berikut:

$${}^{RL5}T_{RA0} = \begin{bmatrix} {}^{RL5}T_{RA0} & {}^{RL5}P_{RA0,org} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 67.4 \\ 0 & 0 & 1 & 22.5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$${}^{RA0}T_{RA1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{RA1} & -\sin\theta_{RA1} & 0 & a_{RA0} \\ \sin\theta_{RA1} \cos a_{RA0} & \cos\theta_{RA1} \cos a_{RA0} & -\sin a_{RA0} & -d_{RA1} \sin a_{RA0} \\ \sin\theta_{RA1} \sin a_{RA0} & \cos\theta_{RA1} \sin a_{RA0} & \cos a_{RA0} & -d_{RA1} \cos a_{RA0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA1} & -\sin \theta_{RA1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{RA1} & \cos \theta_{RA1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} {}^{RA1}T_{RA2} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA2} & -\sin \theta_{RA2} & 0 & a_{RA1} \\ \sin \theta_{RA2} \cos a_{RA1} & \cos \theta_{RA2} \cos a_{RA1} & -\sin a_{RA1} & -d_{RA2} \sin a_{RA1} \\ \sin \theta_{RA2} \sin a_{RA1} & \cos \theta_{RA2} \sin a_{RA1} & \cos a_{RA1} & -d_{RA2} \cos a_{RA1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA2} & -\sin \theta_{RA2} & 0 & 35 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{RA2} & \cos \theta_{RA2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} {}^{RA2}T_{RA3} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA3} & -\sin \theta_{RA3} & 0 & a_{RA2} \\ \sin \theta_{RA3} \cos a_{RA2} & \cos \theta_{RA3} \cos a_{RA2} & -\sin a_{RA2} & -d_{RA3} \sin a_{RA2} \\ \sin \theta_{RA3} \sin a_{RA2} & \cos \theta_{RA3} \sin a_{RA2} & \cos a_{RA2} & -d_{RA3} \cos a_{RA2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA3} & -\sin \theta_{RA3} & 0 & 29.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{RA3} & -\cos \theta_{RA3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} {}^{RA3}T_{RA4} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA4} & -\sin \theta_{RA4} & 0 & a_{RA3} \\ \sin \theta_{RA4} \cos a_{RA3} & \cos \theta_{RA4} \cos a_{RA3} & -\sin a_{RA3} & -d_{RA4} \sin a_{RA3} \\ \sin \theta_{RA4} \sin a_{RA3} & \cos \theta_{RA4} \sin a_{RA3} & \cos a_{RA3} & -d_{RA4} \cos a_{RA3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA4} & -\sin \theta_{RA4} & 0 & 37.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{RA4} & \cos \theta_{RA4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.16)$$

#### d. Matrik Transformasi pada Tangan Kiri / Left Arm (LA)

Matriks transformasi pada tangan kiri dapat ditentukan dengan menggunakan DH parameter pada Tabel 3.5 yang disubstitusikan pada persamaan 3.1 sebagai berikut:

$${}^{RL5}T_{LA0} = \begin{bmatrix} {}^{RL5}T_{LA0} & {}^{LA0,org}P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 67.4 \\ 0 & 0 & -1 & -90.35 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned}
{}^{LA0}T_{LA1} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA1} & -\sin\theta_{LA1} & 0 & a_{LA0} \\ \sin\theta_{LA1} \cos a_{LA0} & \cos\theta_{LA1} \cos a_{LA0} & -\sin a_{LA0} & -d_{LA1} \sin a_{LA0} \\ \sin\theta_{LA1} \sin a_{LA0} & \cos\theta_{LA1} \sin a_{LA0} & \cos a_{LA0} & -d_{LA1} \cos a_{LA0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA1} & -\sin\theta_{LA1} & 0 & 0 \\ \sin\theta_{LA1} & \cos\theta_{LA1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LA1}T_{LA2} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA2} & -\sin\theta_{LA2} & 0 & a_{LA1} \\ \sin\theta_{LA2} \cos a_{LA1} & \cos\theta_{LA2} \cos a_{LA1} & -\sin a_{LA1} & -d_{LA2} \sin a_{LA1} \\ \sin\theta_{LA2} \sin a_{LA1} & \cos\theta_{LA2} \sin a_{LA1} & \cos a_{LA1} & -d_{LA2} \cos a_{LA1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA2} & -\sin\theta_{LA2} & 0 & 35 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{LA2} & -\cos\theta_{LA2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LA2}T_{LA3} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA3} & -\sin\theta_{LA3} & 0 & a_{LA2} \\ \sin\theta_{LA3} \cos a_{LA2} & \cos\theta_{LA3} \cos a_{LA2} & -\sin a_{LA2} & -d_{LA3} \sin a_{LA2} \\ \sin\theta_{LA3} \sin a_{LA2} & \cos\theta_{LA3} \sin a_{LA2} & \cos a_{LA2} & -d_{LA3} \cos a_{LA2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA3} & -\sin\theta_{LA3} & 0 & 29.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_{LA3} & \cos\theta_{LA3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^{LA3}T_{LA4} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA4} & -\sin\theta_{LA4} & 0 & a_{LA3} \\ \sin\theta_{LA4} \cos a_{LA3} & \cos\theta_{LA4} \cos a_{LA3} & -\sin a_{LA3} & -d_{LA4} \sin a_{LA3} \\ \sin\theta_{LA4} \sin a_{LA3} & \cos\theta_{LA4} \sin a_{LA3} & \cos a_{LA3} & -d_{LA4} \cos a_{LA3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\theta_{LA4} & -\sin\theta_{LA4} & 0 & 37.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{LA4} & -\cos\theta_{LA4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)
\end{aligned}$$