

DESAIN DAN PEMODELAN *HUMANOID ROBOT*

*Munadi, Beni Anggoro

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang 50275

*E-mail: munadi@undip.ac.id

ABSTRAK

Artikel ini memaparkan tahapan dalam mendesain konstruksi mekanik *humanoid robot* yang sederhana. Desain sebagai tahapan awal dalam pembuatan *humanoid robot* sebelum dilakukan pemodelan kinematik dan pemodelan dinamik. Untuk pemodelan kinematik akan dilakukan analisa *forward kinematics* dengan menggunakan notasi parameter *Denavit-Hartenberg* (DH parameter). DH parameter menggunakan matrik *homogeneous transformation* 4x4 untuk menyatakan hubungan spasial antara dua *link* yang berhubungan, sehingga dengan matrik transformasi tiap *link humanoid robot* yang diperoleh dapat menyederhanakan masalah *forward kinematic*. Pada pemodelan dinamik akan dilakukan analisa torsi pada *joint ankle* dengan menggunakan persamaan *Lagrangian*. Pemodelan dinamik diperoleh energi kinetik dan energi potensial yang terdapat pada tiap *link humanoid robot*, sehingga dari turunan persamaan *Lagrangian* diperoleh torsi pada *joint ankle humanoid robot*. Dalam pergerakan *humanoid robot* pada *joint space* mempunyai jalur lintasan (*trajectory*) sebagai fungsi *trajectory* terhadap waktu. Proses desain menggunakan alat bantu *software* SolidWorks dan untuk analisa perhitungan kinematik dan dinamik menggunakan *software* MATLAB.

Kata kunci: *Humanoid robot*, Kinematik, Dinamik, *Lagrangian*, MATLAB

1. PENDAHULUAN

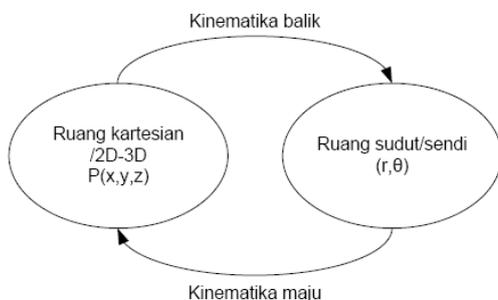
Dewasa ini, perkembangan teknologi robot sangat cepat. Robot diciptakan dengan tujuan agar dapat membantu manusia untuk melakukan pekerjaan yang khususnya bersifat memerlukan kecepatan tinggi, memiliki resiko tinggi, kotor (kumuh) dan yang sifatnya berulang-ulang [1]. Model robot saat ini sangat bervariasi dari model *mobile robot* sampai dengan *humanoid robot*. *Humanoid robot* didesain agar mampu bergerak seperti layaknya seorang manusia serta dapat berpikir dan mengambil suatu keputusan berdasarkan logika-logika yang telah terprogram, karena itulah *humanoid robot* mendapat perhatian besar untuk dikembangkan. Selanjutnya beberapa perusahaan maupun institusi perguruan tinggi baik luar negeri maupun dalam negeri berlomba-lomba mengembangkan dan memproduksi *humanoid robot* dengan teknologi terkini.

Proses desain sampai dengan aplikasi *humanoid robot* tentunya memakan banyak biaya yang tidak murah dan waktu yang cukup lama untuk penelitian. Oleh karena itu, salah satu tujuan penelitian ini adalah mendesain konstruksi mekanik *humanoid robot* yang sederhana, murah, dan ringan, sehingga dapat digunakan untuk proses pembelajaran dalam lingkup perguruan tinggi, artinya masih terjangkau dalam hal biaya maupun waktu.

Pada penelitian ini akan dibahas tentang desain dan pemodelan kinematik dan dinamik *humanoid robot* yang merupakan tahapan awal dalam rantai bangun *humanoid robot*. Desain dan pemodelan kinematik *humanoid robot* ini difokuskan pada *humanoid robot* yang berukuran kecil yang kedepannya dapat diaplikasikan pada perlombaan *Soccer Robot* pada event Kontes Robot Indonesia (KRI) dan Kontes Robot Cerdas Indonesia (KRCI).

2. KINEMATIKA DAN DINAMIKA ROBOT

2.1. Konsep Kinematika pada Robot



Gambar 1. Transformasi kinematik maju dan kinematik balik [2]

Berdasarkan Gambar 1 diperoleh informasi bahwa jari-jari r dan θ dari suatu struktur robot n -DoF diketahui, maka posisi yang dinyatakan dengan $P(x,y,z)$ dapat dihitung. Jika θ merupakan sebuah fungsi berdasarkan waktu $\theta(t)$, maka posisi dan orientasi $P(t)$ dapat dihitung juga secara pasti. Transformasi koordinat ini dikenal sebagai kinematika maju. Selanjutnya jika posisi dan orientasi $P(t)$ diketahui maka, $\theta(t)$ tidak langsung dapat dihitung tanpa mendefinisikan berapa DoF struktur robot itu. Jumlah sendi n dari n -DoF yang dapat dibuat untuk melaksanakan tugas sesuai dengan posisi dan orientasi $P(t)$ itu dapat bernilai $n=(m,m+1, m+2, \dots, m+p)$ dimana m adalah jumlah sendi minimum dan p adalah jumlah sendi yang dapat ditambahkan. Transformasi ini dikenal sebagai kinematika balik.

Kinematika robot adalah studi analitis pergerakan kaki atau lengan robot terhadap sistem kerangka koordinat acuan yang diam/bergerak tanpa memperhatikan gaya yang menyebabkan pergerakan tersebut. Model kinematika

merepresentasikan hubungan *end effector* dalam ruang tiga dimensi dengan variabel sendi (*joint*) dalam ruang sendi. Pemodelan kinematik ini diklasifikasikan ke dalam kinematik maju (*forward kinematic*) dan kinematik balik (*inverse kinematic*). Kinematika maju mendeskripsikan posisi dan orientasi *end effector* yang dinyatakan dalam posisi sendi, sedangkan kinematika balik mendeskripsikan konfigurasi posisi sendi untuk menghasilkan posisi dan orientasi *end effector* tertentu. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2. Denavit-Hartenberg (DH) Parameter

Denavit dan Hartenberg memperkenalkan pendekatan sistematis dan pendekatan umum menggunakan matriks algebra untuk menyatakan dan menunjukkan geometri spasial pada *link* pada lengan robot dengan frame yang tetap. DH parameter ini menggunakan matriks *homogeneous transformation* 4 x 4 untuk menyatakan hubungan spasial antara dua *link* yang berhubungan serta menyederhanakan masalah *forward kinematics* pada matriks transformasi *homogeneous* yang berhubungan dengan penempatan spasial dari *frame* koordinat lengan terhadap *frame* koordinat referensi. Matriks transformasi *homogeneous* dinyatakan dengan matriks transformasi T pada sendi ke-*i* adalah seperti yang terlihat pada persamaan di bawah ini:

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

2.3. Persamaan Dinamik

Dalam menganalisa pergerakan dinamik pada *humanoid robot* menggunakan persamaan *Lagrangian* yang merupakan selisih dari energi kinetik dan energi potensial. Penurunan model *Lagrangian* dimulai dengan memperkenalkan prinsip-prinsip dalam menghitung torsi yang bekerja pada aktuator *humanoid robot* dengan menggunakan pertimbangan energi. Dengan menggunakan penurunan kinematik, koordinat sudut *servomotor* dan posisi yang dibutuhkan dapat diketahui. Dengan posisi dan kecepatan yang diketahui, energi-energi yang bekerja pada *joint robot* dapat ditentukan.

Persamaan *Lagrangian* didasarkan dengan pertimbangan pada energi kinetik (EP) dan energi potensial (EP) dalam sistem mekanisnya. Sebuah sistem mekanis dengan *n* derajat kebebasan dapat digambarkan dengan *n* koordinat umum, dilambangkan $q_1 \dots q_n$. Ketika sistem tersebut bergerak dari waktu A ke waktu B, prinsip *Hamilton's* menyatakan bahwa perbedaan energi kinetik dan energi potensial adalah minimal. Ini berarti bahwa integral berikut ini memiliki nilai yang penting, dimana *I* adalah minimal.

$$I(q, \dot{q}) = \int_A^B L(t, q, \dot{q}) dt$$

dimana *I* adalah fungsi yang didefinisikan pada suatu kurva dengan nilai sebenarnya. *L* = EK- EP disebut *Lagrangian*, *t* adalah waktu, dan *q* adalah koordinat umum. Kondisi yang diperlukan untuk integral untuk menjadi minimal disebut dengan persamaan *Euler-Lagrangian*, yaitu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

Gaya dari luar *Q* dapat dihitung dengan menggunakan prinsip *Lagrange-d'Alembert*, yaitu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q$$

Sudut *servomotor* θ akan digunakan sebagai koordinat umum yang akan menghasilkan perhitungan sederhana. Hal ini juga mengubah gaya eksternal ke torsi yang dihasilkan dari gerakan dan gravitasi pada sistem. Gesekan pada sendi dan gaya dorongan udara akan diabaikan serta gaya pegas dari kabel juga diabaikan. Dengan demikian persamaannya yaitu:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau$$

dimana τ adalah torsi aktuator [3].

2.4. Trajectory Generation

Dalam pergerakan *humanoid robot* pada *joint space* mempunyai jalur lintasan (*trajecotry*) sebagai fungsi *trajectory* terhadap waktu. *Trajectory* mengacu pada posisi sudut (θ) dan kecepatan sudut ($\dot{\theta}$) terhadap waktu dari setiap *joint*. *Trajectory* pada penelitian ini dinyatakan dengan fungsi *polynomial* orde tiga sebagai berikut:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2$$

Selanjutnya dengan kondisi batas $\theta(0) = 0$ dan $\dot{\theta}(t_f) = 0$ diperoleh nilai:

$$a_0 = \theta_0 ; a_1 = 0 ; a_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) ; \text{ dan } a_3 = -\frac{3}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0)$$

Sehingga didapat persamaan untuk *trajectory* sebagai berikut:

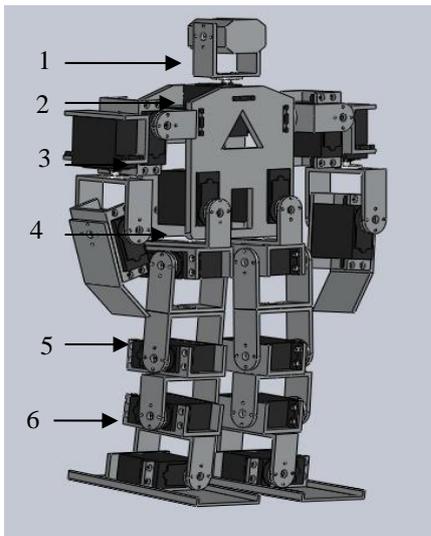
$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0)t^2 - \frac{3}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0)t^3 \qquad \dot{\theta}(t) = \frac{6}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0)t - \frac{6}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0)t^2$$

dimana θ_0 adalah sudut awal, θ_f sudut akhir, dan t_f waktu akhir [4].

3. PEMODELAN HUMANOID ROBOT

3.1. Desain *Humanoid Robot*

Desain *humanoid robot* menggunakan *software* SolidWorks. Hal ini dilakukan agar dalam melakukan pembuatannya dapat mengurangi kesalahan pada gambar, misalnya dimensi. Dengan *software* SolidWorks maka kita dapat melihat suatu benda dengan gambaran utuh atau perbagian dengan sudut pandang yang jelas dan dapat diatur dengan sudut pandang *isometric*. Desain *humanoid robot* ini dibatasi tinggi sebesar 350 mm dan memiliki 19 *degrees of freedom* (DoF) dengan aktuornya adalah *servomotor*. Derajat kebebasan atau *degree of freedom* (DoF) merupakan jumlah variabel maksimum yang dibutuhkan untuk mendefinisikan gerak suatu benda. Gerakan manipulator dihasilkan dari adanya sendi (*joint*). Dalam desain *humanoid robot* ini, persendiannya menggunakan *revolute joint* yang dapat berputar ke sumbu *longitudinal* (*roll*), sumbu *lateral* (*pitch*) atau sumbu *vertikal* (*yaw*). Lebih jelasnya, desain *humanoid robot* ditunjukkan pada Gambar 2, dan penjelasannya pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 2. Desain *humanoid robot*.

Tabel 1. Keterangan desain *humanoid robot*.

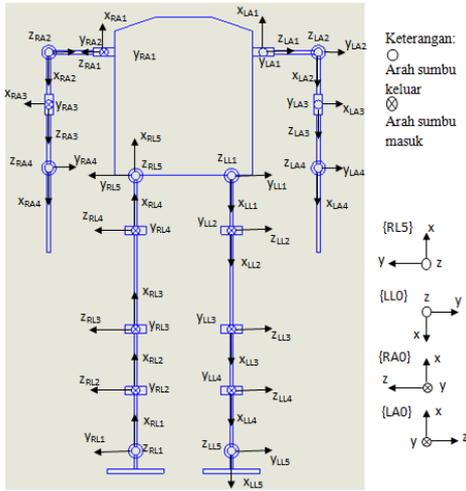
No	Lokasi	DoF	Keterangan
1	Kepala (<i>Head</i>)	1	<i>Yaw</i>
2	Bahu (<i>Shoulder</i>)	2 x 2	<i>Pitch + Roll</i>
3	Siku (<i>Elbow</i>)	2 x 2	<i>Pitch + Yaw</i>
4	Pinggul (<i>Hip</i>)	2 x 2	<i>Pitch + Roll</i>
5	Lutut (<i>Knee</i>)	2 x 1	<i>Pitch</i>
6	Pergelangan kaki (<i>Ankle</i>)	2 x 2	<i>Pitch + Roll</i>

Tabel 2. Spesifikasi desain *humanoid robot*.

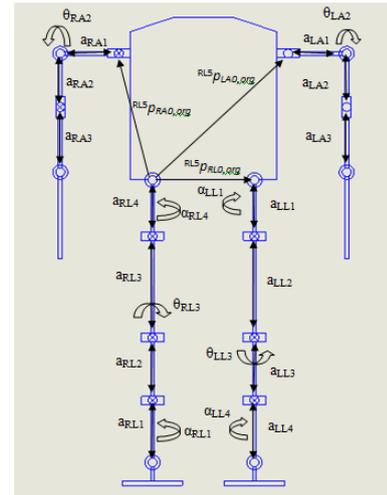
No	Item spesifikasi	
1	Tinggi	: 350 mm
2	Berat	: 2.840 gr
3	<i>Degree of Freedom</i> (DoF)	
	- Kaki	: 5 x 2 = 10
	- Tangan	: 4 x 2 = 8
	- Kepala	: 1 x 1 = 1
	- Total	: 19 DoF
4	Aktuator joint	: Servomotor
5	Material link	: Almunium

3.2. Pemodelan Kinematik

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. Untuk menentukan *frames* robot pada *humanoid robot*, dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4. 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. *Frames humanoid robot.*



Gambar 4. *Link parameter humanoid robot.*

Tahapan selanjutnya adalah mengidentifikasi link parameter. Berdasarkan Gambar 3 dan 4 maka dapat ditentukan DH parameter pada kaki kanan, kaki kiri, tangan kanan, dan tangan kiri yang hasilnya ditabelkan pada Tabel 3-6:

Tabel 3. DH parameter kaki kanan / *right leg* (RL).

Link i	$\alpha_{RL,i-1}$ [°]	$a_{RL,i-1}$ [mm]	$d_{RL,i}$ [mm]	$\theta_{RL,i}$ [°]
1	0	0	0	θ_{RL1}
2	-90	43,05	0	θ_{RL2}
3	0	43,05	0	θ_{RL3}
4	0	70	0	θ_{RL4}
5	90	39	0	θ_{RL5}

Tabel 4. DH parameter kaki kiri/ *left leg* (LL).

Link i	$\alpha_{LL,i-1}$ [°]	$a_{LL,i-1}$ [mm]	$d_{LL,i}$ [mm]	$\theta_{LL,i}$ [°]
1	0	0	0	θ_{LL1}
2	-90	39	0	θ_{LL2}
3	0	70	0	θ_{LL3}
4	0	43,05	0	θ_{LL4}
5	90	43,05	0	θ_{LL5}

Tabel 5. DH parameter tangan kanan / *right arm* (RA).

Link i	$\alpha_{RA,i-1}$ [°]	$a_{RA,i-1}$ [mm]	$d_{RA,i}$ [mm]	$\theta_{RA,i}$ [°]
1	0	0	0	θ_{RA1}
2	90	43,05	0	θ_{RA2}
3	-90	43,05	0	θ_{RA3}
4	90	70	0	θ_{RA4}

Tabel 6. DH parameter tangan kiri/ *left arm* (LA).

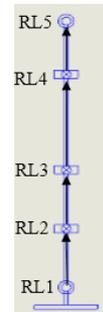
Link i	$\alpha_{LA,i-1}$ [°]	$a_{LA,i-1}$ [mm]	$d_{LA,i}$ [mm]	$\theta_{LA,i}$ [°]
1	0	0	0	θ_{LA1}
2	-90	35	0	θ_{LA2}
3	90	29,50	0	θ_{LA3}
4	-90	37,50	0	θ_{LA4}

Matrik transformasi sangat penting dalam memodelkan robot dimana berdasarkan hasil tabel DH parameter di atas (Tabel 3-6) maka persamaan matrik transformasi dari *frames* {i} ke {i - 1} dengan menggunakan empat parameter *link* α_i , a_i , d_i , dan θ_i dapat diketahui dan dinyatakan sebagai berikut:

a. Matrik transformasi kaki kanan

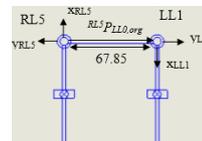
$$\begin{aligned}
 {}^{RL0}T_{RL1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RL1} & -\sin \theta_{RL1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{RL1} & \cos \theta_{RL1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^{RL2}T_{RL3} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RL3} & -\sin \theta_{RL3} & 0 & 43.05 \\ \sin \theta_{RL3} & \cos \theta_{RL3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^{RL4}T_{RL5} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RL5} & -\sin \theta_{RL5} & 0 & 39 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{RL5} & \cos \theta_{RL5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}^{RL1}T_{RL2} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RL2} & -\sin \theta_{RL2} & 0 & 43.05 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{RL2} & -\cos \theta_{RL2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^{RL3}T_{RL4} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RL4} & -\sin \theta_{RL4} & 0 & 70 \\ \sin \theta_{RL4} & \cos \theta_{RL4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

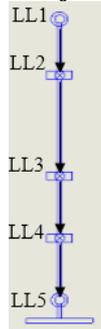


b. Matrik transformasi kaki kiri

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

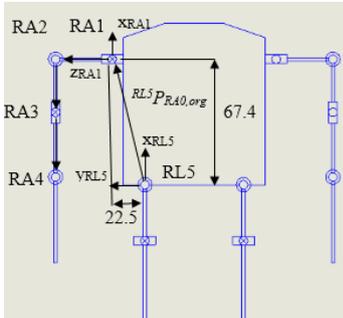


$$\begin{aligned}
 LL0T_{LL1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LL1} & -\sin \theta_{LL1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{LL1} & \cos \theta_{LL1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 LL1T_{LL2} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LL2} & -\sin \theta_{LL2} & 0 & 39 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{LL2} & -\cos \theta_{LL2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 LL3T_{LL4} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LL4} & -\sin \theta_{LL4} & 0 & 43.05 \\ \sin \theta_{LL4} & \cos \theta_{LL4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 LL2T_{LL3} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LL3} & -\sin \theta_{LL3} & 0 & 70 \\ \sin \theta_{LL3} & \cos \theta_{LL3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$LL4T_{LL5} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{LL5} & -\sin \theta_{LL5} & 0 & 43.05 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{LL5} & \cos \theta_{LL5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$


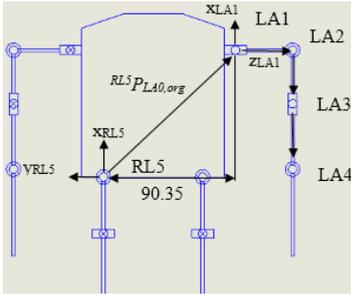
c. Matrik transformasi tangan kanan

$$\begin{aligned}
 RL5T_{RA0} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 67.4 \\ 0 & 0 & 1 & 22.5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 RA1T_{RA2} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA2} & -\sin \theta_{RA2} & 0 & 35 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{RA2} & \cos \theta_{RA2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 RA3T_{RA4} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA4} & -\sin \theta_{RA4} & 0 & 37.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{RA4} & \cos \theta_{RA4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 RA0T_{RA1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA1} & -\sin \theta_{RA1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{RA1} & \cos \theta_{RA1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$RA2T_{RA3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{RA3} & -\sin \theta_{RA3} & 0 & 29.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{RA3} & -\cos \theta_{RA3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$


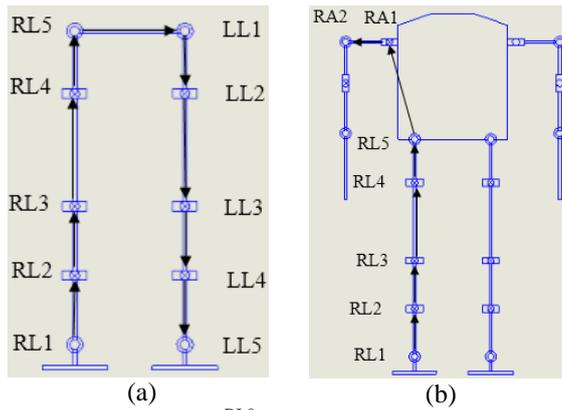
d. Matrik transformasi tangan kiri

$$\begin{aligned}
 RL5T_{LA0} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 67.4 \\ 0 & 0 & -1 & -90.35 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 LA1T_{LA2} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LA2} & -\sin \theta_{LA2} & 0 & 35 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{LA2} & -\cos \theta_{LA2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 LA3T_{LA4} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LA4} & -\sin \theta_{LA4} & 0 & 37.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{LA4} & -\cos \theta_{LA4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 LA0T_{LA1} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{LA1} & -\sin \theta_{LA1} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{LA1} & \cos \theta_{LA1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$LA2T_{LA3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{LA3} & -\sin \theta_{LA3} & 0 & 29.5 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_{LA3} & \cos \theta_{LA3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$


Selanjutnya untuk mendapatkan matriks transformasi dari matrik $RL0T_{RL1}$ sampai dengan matrik $LL4T_{LL5}$ yang ditunjukkan pada Gambar 5 (a) diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 RL0T_{LL5} &= RL0T_{RL1} \cdot RL1T_{RL2} \cdot RL2T_{RL3} \cdot RL3T_{RL4} \cdot RL4T_{RL5} \cdot RL5T_{LL0} \cdot LL0T_{LL1} \cdot LL1T_{LL2} \cdot LL2T_{LL3} \cdot LL3T_{LL4} \cdot LL4T_{LL5} \\
 &= \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 & Px \\ r21 & r22 & r23 & Py \\ r31 & r32 & r33 & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



Gambar 5. Matrik transformasi dari matrik (a) ${}^{RL0}T_{RL1}$ (*joint* pertama kaki kanan) sampai matrik ${}^{LL4}T_{LL5}$ (*joint* kelima kaki kiri) dan (b) ${}^{RL0}T_{RL1}$ (*joint* pertama kaki kanan) sampai dengan matrik ${}^{RA1}T_{RA2}$ (*joint* kedua tangan kanan).

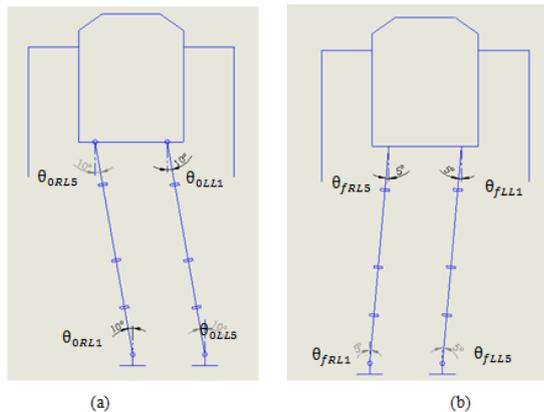
Dan untuk mendapatkan matriks transformasi dari matrik ${}^{RL0}T_{RL1}$ sampai dengan matrik ${}^{LA1}T_{LA2}$ yang ditunjukkan pada Gambar 5 (b) nyatakan dalam persamaan berikut:

$${}^{RL0}T_{LA3} = {}^{RL0}T_{RL1} {}^{RL1}T_{RL2} {}^{RL2}T_{RL3} {}^{RL3}T_{RL4} {}^{RL4}T_{RL5} {}^{RL5}T_{LA0} {}^{LA0}T_{LA1} {}^{LA1}T_{LA2}$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & Px \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Py \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

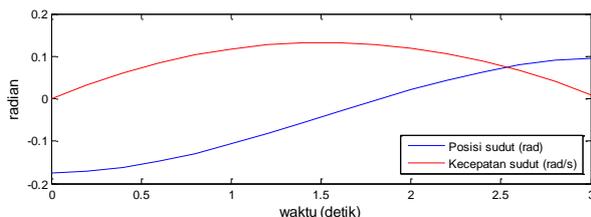
3.3. Pemodelan Dinamik

Dalam pergerakan *humanoid robot*, akan dilihat dari dua bidang (*planes*) yaitu bidang pergerakan depan (*frontal plane*) dan bidang pergerakan samping (*sagittal plane*). Dalam pergerakan pada *frontal plane*, aktuator yang bekerja adalah aktuator pada *joint* pertama dan *joint* kelima kaki kanan (θ_{RL1} dan θ_{RL5}) serta *joint* pertama dan kelima kaki kiri (θ_{LL1} dan θ_{LL5}), sedangkan aktuator pada *joint* yang lain tidak bekerja atau pasif karena aktuator pada *joint* tersebut bekerja pada *sagittal plane*. Posisi pergerakan pada *frontal plane* ditunjukkan pada Gambar 6.

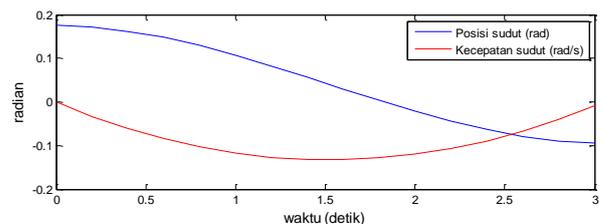


Gambar 6. Pergerakan pada *frontal plane* untuk posisi awal (a) dan posisi akhir (b).

Selanjutnya berdasarkan *trajectory* dengan menggunakan persamaan *polynomial* orde tiga didapat posisi sudut dan kecepatan sudut terhadap waktu yang ditunjukkan di grafik pada Gambar 7 dan Gambar 8.

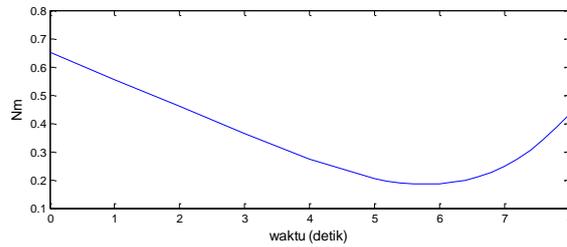


Gambar 7. Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL1} dan θ_{LL5} .



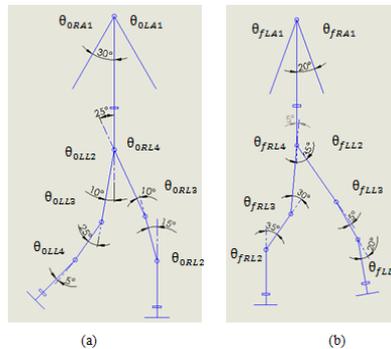
Gambar 8. Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL5} dan θ_{LL1} .

Dengan menganalisa pergerakan *humanoid robot* pada bidang depan (*frontal plane*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, yaitu dengan memisalkan sudut aktuator $\theta_{ORL1} = \theta_{OLL5}$ adalah sebesar -10° dan $\theta_{fRL5} = \theta_{fLL1}$ sebesar 5° , maka torsi pada *joint ankle* kaki kanan (τ_{RL1}) yang bekerja saat pergerakan pada *frontal plane* dengan menggunakan persamaan *Lagrangian* akan diperoleh nilai torsi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



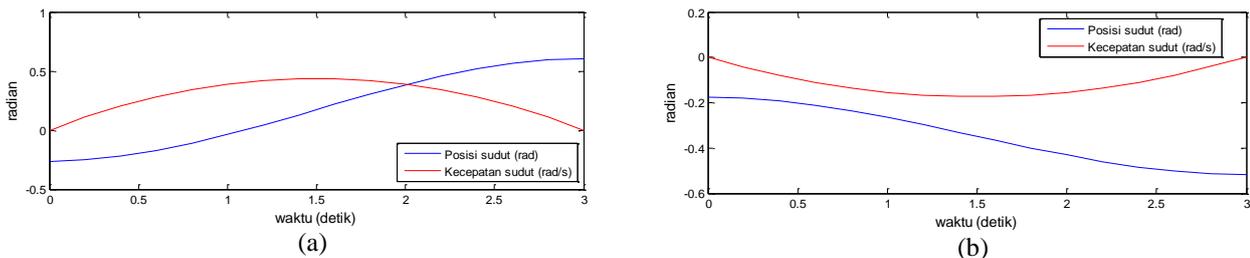
Gambar 9. Torsi *joint ankle* (τ_{RL1}) yang bekerja atas pergerakan pada *frontal plane*.

Selanjutnya untuk pergerakan *sagittal plane*, aktuator yang bekerja adalah aktuator pada *joint* kedua, *joint* ketiga dan *joint* keempat kaki kanan dan kaki kiri (θ_{RL2} , θ_{RL3} , θ_{RL4} dan θ_{LL2} , θ_{LL3} , θ_{LL4}) serta pada *joint* pertama tangan kanan dan tangan kiri (θ_{RA1} dan θ_{LA1}). Posisi sudut aktuator *humanoid robot* pada *sagittal plane* ditunjukkan pada Gambar 10.



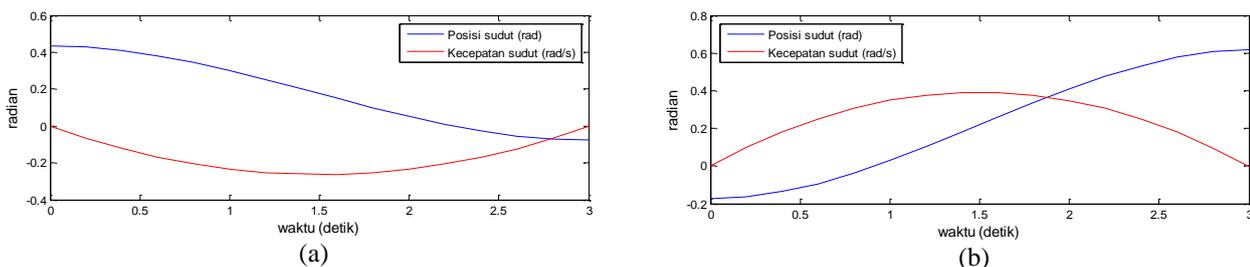
Gambar 10. Pergerakan pada *sagittal plane* untuk posisi awal (a) dan posisi akhir (b).

Berdasarkan Gambar 10, dengan diketahui nilai variabel sudut-sudut aktuator *humanoid robot* pada saat awal melangkah dan akhir melangkah, maka dapat diketahui *trajectory* pada tiap *joint* dengan persamaan *polynomial* orde tiga. *Trajectory* pada *joint* kedua kaki kanan (θ_{RL2}) dan *joint* ketiga kaki kanan (θ_{RL3}) masing-masing ditunjukkan di grafik pada Gambar 11 (a) dan 11 (b).

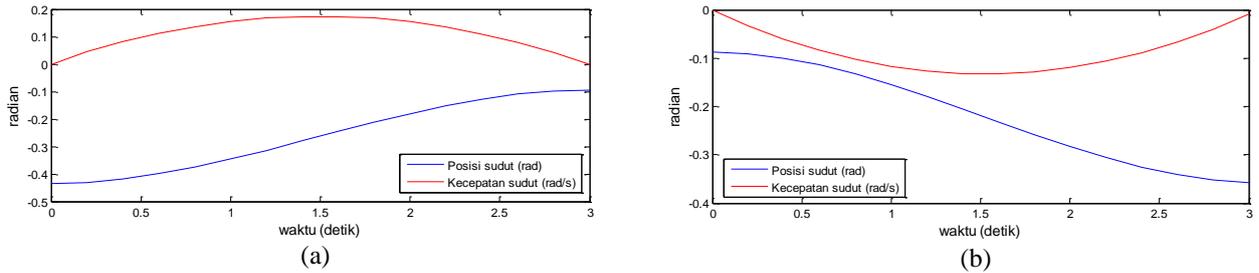


Gambar 11. Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL2} (a) dan θ_{RL3} (b)

Selanjutnya, *trajectory* pada *joint* keempat kaki kanan (θ_{RL4}) dan kedua kaki kiri (θ_{LL2}) secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 12 (a) dan 12 (b). Untuk *trajectory* pada *joint* kedua kaki kiri (θ_{LL3}) dan kedua kaki kiri (θ_{LL4}) masing-masing ditunjukkan pada Gambar 13 (a) dan 13 (b).

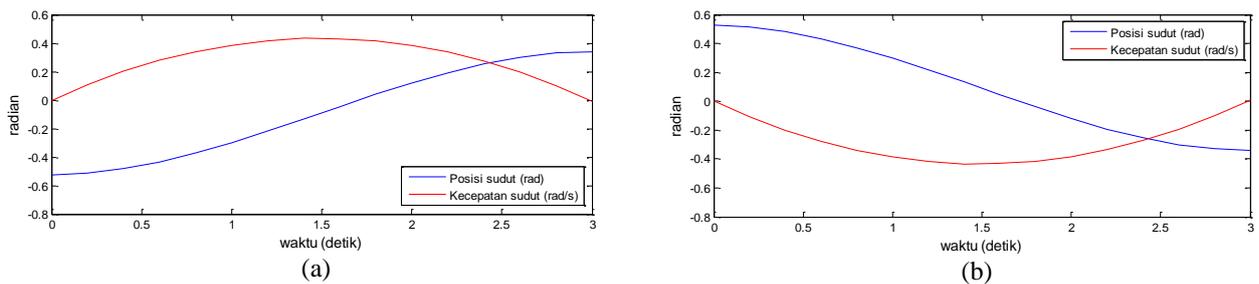


Gambar 12. Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RL4} (a) dan θ_{LL2} (b)



Gambar 13. Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{LL3} (a) dan θ_{LL4} (b)

Adapun *trajectory* pada *joint* kedua kaki kiri (θ_{RA1}) dan kedua kaki kiri (θ_{LA1}) masing-masing ditunjukkan pada Gambar 14 (a) dan 14 (b).



Gambar 14. Grafik posisi sudut dan kecepatan sudut pada θ_{RA1} (a) dan θ_{LA1} (b).

4. KESIMPULAN

Pada penelitian yang berkenaan dengan *humanoid robot* ini, penulis berhasil mendesain konstruksi mekanik *humanoid robot* yang sederhana, dan direncanakan menggunakan bahan acrylic dan aluminium sehingga murah dan ringan. Desain *humanoid robot* selanjutnya dimodelkan berdasarkan kinematik dan dinamikanya. Pemodelan kinematik pada *humanoid robot* meliputi tahapan menentukan *frames link* robot, mengidentifikasi parameter 4 *link* pada setiap *link* robot, dan menghitung hubungan matrik transformasinya. dalam pemodelan dinamik telah menggunakan persamaan *Lagrangian*, sehingga berhasil diperoleh torsi pada *joint ankle* pada kaki kanan *humanoid robot* dan *trajectory* aktuator pada tiap *joint humanoid robot*.

5. REFERENSI

- [1] Ray Asfahl, 1992, “*Robot and Manufacturing Automation*,” John Wiley & Sons, 2nd Edition.
- [2] Moh. Imam Afandi, “Pemodelan Kinematika Sistem Pengarahan Misil dengan Perhitungan Gangguan pada Landasa,” LIPI Tangerang.
- [3] Bajers Fredrik, 2007, “*Modelling and Control of a Biped Robot*,” Department of Control Engineering 8th Semester Aalborg University.
- [4] Craig, J. J., 2003, “*Introduction to Robotics Mechanics and Control*,” Pearson Prentice Hall, 2nd Edition.