

KONFIGURASI KINEMATIK DAN DINAMIK SIMULATOR KENDALI TURRET

Munadi dan Mohammad Tauviqirrahman¹⁾

Abstract

Technology development is a fundamental need for a country, especially in the defense area. To catch up technological with advancement, it requires many skills according to the vast and complex defence technology development. We need to start basic research in the defense area to minimize our dependence to foreign countries.

One important device that is still imported is the gun turret. This equipment can be placed in a tank or a battle ship to control gun, cannon or missile launcher.

The design of a turret control simulator is a preliminary stage in designing the real turret. This simulator implements knowledge from robotic science which study the kinematic and dynamic aspects of a robot. From the kinematic aspect, the speed of each link is known. From the dynamics aspect, the torque for each joint from the actuator, which due to the hydraulic force or a hydraulic torque, is known. The Newton-Euler method is used to solve the dynamic equation.

Keywords : Simulator, Turret, Dynamic Equation, Newton-Euler, Joint Torque

1. PENDAHULUAN

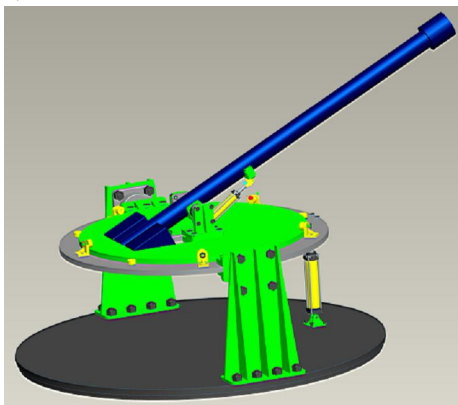
Turret merupakan salah satu tempat senjata sementara yang dapat diputar dan diarahkan sesuai posisi sasaran tembak. Turret sering digunakan di bidang militer terutama untuk tank sebagai senjata arteleri. Selama ini turret digerakkan secara manual khususnya sudut putarnya terhadap acuan dasarnya^[6].

Dengan perancangan simulator kendali turret dapat diketahui perilaku kinematik dan dinamikanya. Simulator turret merupakan sebuah aplikasi manipulator robot di bidang militer. Robot dapat didefinisikan sebagai sebuah alat mekanik yang dapat melakukan tugas fisik, baik menggunakan pengawasan dan kontrol manusia, atau menggunakan program yang telah didefinisikan (kecerdasan buatan).

Paper ini membahas spesifikasi simulator turret, klasifikasi sistem, konfigurasi kinematik dan konfigurasi dinamik simulator.

2. SPESIFIKASI SIMULATOR TURRET

Pada dasarnya turret yang dipasang di tank yang mempunyai sudut putar dan sudut barrel tertentu yang bisa digunakan untuk menembakkan meriam ke sasaran.

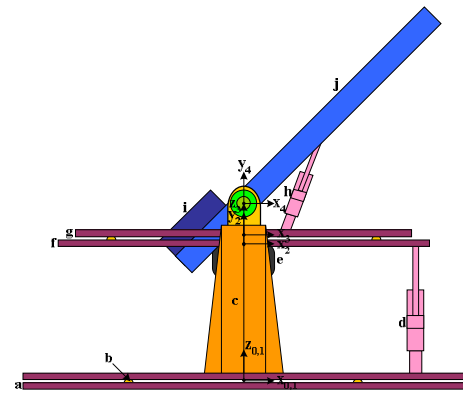


Gambar 1. Model simulator kendali turret

Spesifikasi teknik yang ditetapkan untuk simulator kendali turret adalah sebagai berikut :

1. Berat total : 6100 kg
2. Sudut putar turret : $\pm 360^\circ$
3. Sudut elevasi barrel : -5 s/d $+60^\circ$
4. Panjang barrel : 3000 mm
5. Diameter dalam barrel : 76,2 mm
6. Diameter luar barrel : 139,7 mm
7. Sudut elevasi base : -5° s/d $+15^\circ$

Secara skematis, mekanisme rancangan simulator kendali turret digambarkan pada gambar 2.



Gambar 2. Skematik simulator kendali turret

Nama komponen penyusun simulator kendali turret adalah sebagai berikut :

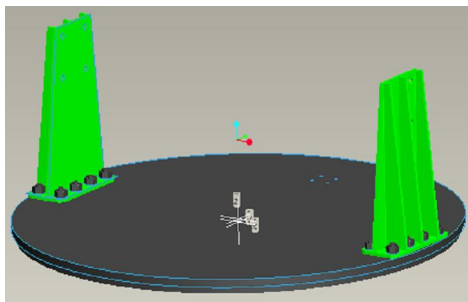
- a. Link nol dan satu
- b. Ball transfer
- c. Penyangga
- d. Silinder hidrolik satu
- e. Motor hidrolik
- f. Link dua
- g. Link tiga
- h. Silinder hidrolik dua
- i. Pemberat
- j. Link empat atau barrel

3. KLASIFIKASI SISTEM SIMULATOR

Klasifikasi sistem simulator kendali *turret* terdiri dari :

3.1. Link Satu

Dasar atau *base* simulator kendali *turret* digambarkan sebagai *link satu* yang terdiri dari dua buah plat dengan masing-masing ketebalan 40 mm yang berbentuk lingkaran dan dihubungkan dengan alur *ball transfer*^[3] dengan alur melingkar sehingga antara plat bawah dan atas dapat bebas berputar. Jarak antara dua permukaan plat tersebut adalah 7 mm. Antara dua buah plat yang terhubung dengan *ball transfer* dinyatakan sebagai *joint nol* dan satu.

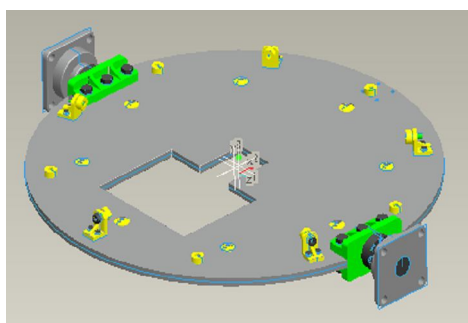


Gambar 3. *Link satu*

Sudut putar *joint satu* adalah dari 0° sampai dengan 360° dengan bantuan aktuator motor AC. *Joint* ini menggambarkan roda pada tank yang dapat berputar sesuai arah kendali yang diinginkan pada lintasan tank yang nyata. Lintasan ini menggambarkan *joint revolute*.

3.2. Link Dua

Komponen *link dua* adalah sebuah plat yang mempunyai ketebalan 40 mm dan berbentuk lingkaran ditambah dengan komponen lain seperti poros dan bantalan^[5]. Antara penyangga dengan *link dua* dihubungkan dengan bantalan sehingga *link dua* dapat berputar yang dinyatakan dengan *joint revolute* sebagai *joint dua* simulator.

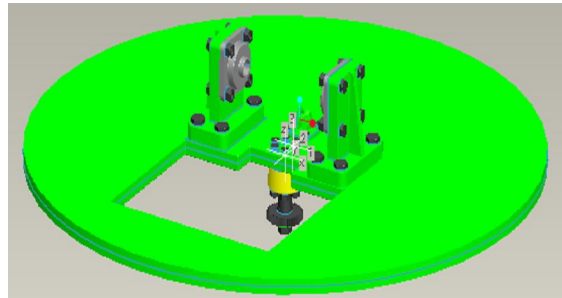


Gambar 4. *Link dua*

Joint dua mempunyai sudut elevasi -5° sampai dengan $+15^{\circ}$. *Joint* ini dikendalikan oleh aktuator silinder hidrolik^[9]. *Joint* ini menggambarkan badan *tank*. Adanya aktuator memberikan kompensasi permukaan lintasan (ketidakrataan) yang terjadi selama simulator bergerak translasi menuju target.

3.3. Link Tiga

Link tiga terdiri dari sebuah plat dengan tebal 40 mm dan berdiameter 1700 mm. *Link* ini sebagai dudukan *barrel*. Antara *link dua* dan *link tiga* terhubung dengan *ball transfer* pada alur melingkar dengan jarak antara dua *link* tersebut 9 mm. Hubungan dua *link* ini merupakan *joint revolute* yang dinyatakan sebagai *joint tiga*.

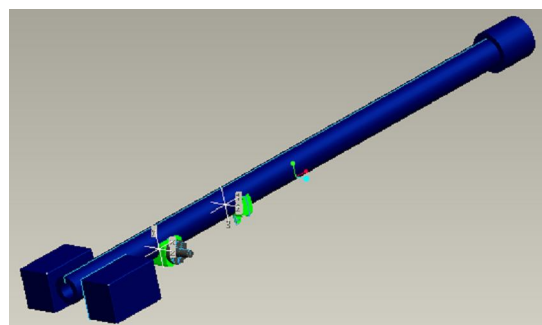


Gambar 5. *Link tiga*

Adanya *ball transfer* membuat *link tiga* dapat berputar sebesar $\pm 360^{\circ}$ dengan bantuan penggerak sebuah aktuator motor hidrolik. *Joint* ini menggambarkan putaran *turret* pada *tank* sehingga *turret* dapat diarahkan berputar sesuai dengan sasaran tembak *tank*.

3.4. Link Empat

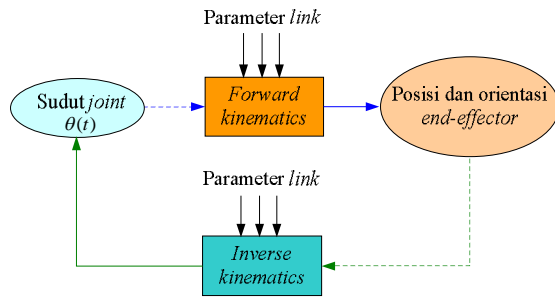
Link empat merupakan *link terakhir* yang terdiri dari pipa berongga dengan diameter dalam 76,2 mm, diameter luar 139,7 mm dan panjang 3000 mm. *Link empat* terhubung dengan *link tiga* melalui bantalan pada *joint empat* yang merupakan *joint revolute*. Dengan bantuan aktuator silinder hidrolik, *link empat* dapat digerakkan dengan sudut yang dikehendaki sesuai spesifikasi yaitu antara -5° s/d $+60^{\circ}$. *Link* ini menggambarkan *barrel* yang ada pada *turret*.



Gambar 6. *Link empat*

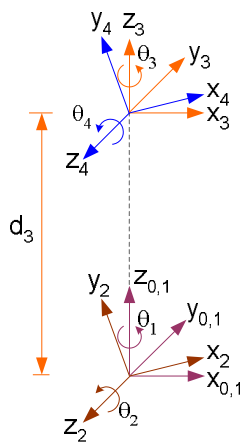
4. KONFIGURASI KINEMATIK SIMULATOR

Simulator merupakan gabungan dari *link* dan *joint* yang dapat melakukan gerak relatif antar *link*. Konfigurasi kinematik berarti menitikberatkan pada posisi statik, gaya statik dan kecepatan. Pembahasan kinematik berkenaan dengan analisa geometri gerak simulator, yaitu kinematik maju (*forward kinematics*) dan kinematik mundur (*inverse kinematics*)^[2].



Gambar 7. Forward dan inverse kinematics

Parameter *link* merupakan parameter yang dibutuhkan dalam melakukan analisis kinematik simulator. Dari gambar 2, maka hubungan *frame* penyusun simulator kendali *turret* dapat diketahui parameter *link* dari simulator yang telah didesain. Notasi yang digunakan untuk mendeskripsikan parameter *link* adalah Notasi Denavit-Hartenberg^[1].



Gambar 8. Parameter *link* pada tiap *joint* simulator

Berikut ini parameter *link* simulator kendali *turret* :
Tabel 1. Parameter Denavit-Hartenberg simulator

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90^0	0	0	θ_2
3	-90^0	0	d_3	θ_3
4	90^0	0	0	θ_4

Parameter *link* tersebut akan digunakan dalam analisis *forward kinematics* yang menghasilkan matrik transformasi yang mendeskripsikan posisi dan orientasi dari ujung *link* relatif terhadap *base*. Nilai elemen setiap matrik transformasi *homogen* diperoleh dari parameter Denavit-Hartenberg adalah sebagai berikut :

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ -s_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

sehingga *transpose* dari matrik-matrik rotasinya adalah sebagai berikut :

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; {}^1_2R = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 \\ -s_2 & 0 & c_2 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3R = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 \\ -s_3 & 0 & -c_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; {}^3_4R = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 \\ -s_4 & 0 & c_4 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dari matrik transformasi diperoleh hubungan transformasi yang menghubungkan *frame* {4} terhadap *frame* {0} melalui perkalian transformasi *link*, sehingga diketahui kedudukan dan orientasi *end-effector* simulator relatif terhadap *frame* pangkal simulator. Dengan metode kinematik mundur (*inverse kinematics*), berikut ini persamaan kinematik ujung simulator :

$${}^0_4T = {}^0_1T(\theta_1) {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) {}^3_4T(\theta_4)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

untuk θ_i dimana 0_4T dinyatakan sebagai nilai numerik.

Pernyataan ulang dari persamaan (1) menunjukkan ketergantungan θ_1 pada bagian sebelah kiri persamaan yang dinyatakan sebagai berikut :

$$\left[{}^0_1T(\theta_1) \right]^{-1} {}^0_4T = {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) {}^3_4T(\theta_4) = {}^1_4T$$

$$= \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_2c_3c_4 - s_2s_4 & -c_2c_3s_4 - s_2c_4 & c_2s_3 & -s_2d_3 \\ s_3c_4 & -s_3s_4 & -c_3 & 0 \\ s_2c_3c_4 + c_2s_4 & -s_2c_3s_4 + c_2c_4 & s_2s_3 & c_2d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dari kedua persamaan diatas, maka perhitungan sudut *joint* sebagai berikut :

(1) Sudut *joint* satu (θ_1)

$$\text{Berdasarkan elemen (2,4) : } -s_1p_x + c_1p_y = 0$$

$$\text{Maka : } \theta_1 = \text{Atan2}(s_1, c_1) = \text{Atan2}(p_y, p_x) \quad (3)$$

(2) Sudut *joint* dua (θ_2)

Berdasarkan elemen (1,4) : $c_1 p_x + s_1 p_y = -s_2 d_3$

Berdasarkan elemen (3,4) : $p_z = c_2 d_3$

Maka : $\theta_2 = \text{Atan2}(s_2, c_2) = \text{Atan2}(-c_1 p_x - s_1 p_y, p_z)$ (4)

(3) Sudut *joint* tiga (θ_3)

Berdasarkan elemen (3,3) : $r_{33} = s_2 s_3$

Berdasarkan elemen (2,3) : $-s_1 r_{13} + c_1 r_{23} = -c_3$

Maka :

$$\theta_3 = \text{Atan2}(s_3, c_3) = \text{Atan2}(r_{33}/s_2, s_1 r_{13} - c_1 r_{23}) \quad (5)$$

(4) Sudut *joint* empat (θ_4)

Berdasarkan elemen (2,2) : $-s_1 r_{12} + c_1 r_{22} = -s_3 s_4$

Berdasarkan elemen (2,1) : $-s_1 r_{11} + c_1 r_{21} = s_3 c_4$

Maka :

$$\theta_4 = \text{Atan2}(s_4, c_4) = \text{Atan2}(s_1 r_{12} - c_1 r_{22}, c_1 r_{21} - s_1 r_{11}) \quad (6)$$

5. KONFIGURASI DINAMIK SIMULATOR

Konfigurasi dinamik simulator menggambarkan persamaan gerak manipulator yang timbul akibat adanya torsi oleh aktuator. Dengan metode *Newton-Euler*, diperoleh nilai torsi^[1]. Metode ini berdasarkan kepada hukum *Newton* kedua untuk komponen translasi dan digabung dengan sistem sudut *Euler* untuk komponen rotasi.

Berdasarkan klasifikasi simulator, maka berikut ini identifikasi yang dilakukan di tiap *link* dan perhitungan untuk mendapatkan persamaan dinamik simulator :

5.1. Identifikasi *Link*

5.1.1. *Link* Satu

Berdasarkan gambar 3, berikut ini identifikasi *link* :

(1) Vektor lokasi pusat massa *link* satu (mm) :

$${}^1P_{C1} = \begin{bmatrix} -0,020 \\ -0,171 \\ 18,175 \end{bmatrix}$$

(2) Massa *link* satu = $m_1 = 3897,50$ kg

(3) *Inertia tensor* terhadap pusat massa (kg.mm²) :

$${}^cI_1 = \begin{bmatrix} 17,51410^8 & 0 & 47,285.10^8 \\ 0 & 21,90110^8 & -79,896.10^8 \\ 47,285.10^8 & -79,896.10^8 & 38,039.10^8 \end{bmatrix}$$

5.1.2. *Link* Dua

Berdasarkan gambar 4, berikut ini identifikasi *link* :

(1) Vektor lokasi pusat massa *link* dua (mm) :

$${}^2P_{C2} = \begin{bmatrix} 28,926 \\ 1,104 \\ 0,126 \end{bmatrix}$$

(2) Massa *link* dua = $m_2 = 1083,24$ kg

(3) *Inertia tensor* terhadap pusat massa (kg.mm²) :

$${}^cI_2 = \begin{bmatrix} 46,335.10^8 & 35,933.10^8 & -20,249.10^8 \\ 35,933.10^8 & 69,969.10^8 & -70,137.10^8 \\ -20,249.10^8 & -70,137.10^8 & 23,835.10^8 \end{bmatrix}$$

5.1.3. *Link* Tiga

Berdasarkan gambar 5, berikut ini identifikasi *link* :

(1) Vektor lokasi pusat massa *link* tiga (mm) :

$${}^3P_{C3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 48,296 \\ 8,675 \end{bmatrix}$$

(2) Massa *link* tiga = $m_3 = 668,62$ kg

(3) *Inertia tensor* terhadap pusat massa (kg.mm²) :

$${}^cI_3 = \begin{bmatrix} 11,170.10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 12,643.10^8 & 27,578.10^8 \\ 0 & 27,578.10^8 & 23,583.10^8 \end{bmatrix}$$

5.1.4. *Link* Empat

Berdasarkan gambar 6, berikut ini identifikasi *link* :

(1) Vektor lokasi pusat massa (mm) :

$${}^4P_{C4} = \begin{bmatrix} 451,870 \\ 31,920 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(2) Massa *link* empat = $m_4 = 459,25$ kg

(3) *Inertia tensor* terhadap pusat massa (kg.mm²) :

$${}^cI_4 = \begin{bmatrix} 8848810^5 & -48,466.10^5 & -30,628 \\ -48,466.10^5 & 46,966.10^5 & 0 \\ -30,628 & 0 & 46,318.10^5 \end{bmatrix}$$

5.2. Perhitungan Persamaan Dinamik Simulator

Perhitungan dilakukan menggunakan metode *Recursive Newton Euler (RNE)*^[2] dengan memasukan hasil identifikasi *link* pada persamaan berikut :

5.2.1. Iterasi ke Luar (*Outward Iterations*)

Iterasi dilakukan dari *link* base (*link* nol) menuju ke *link* paling ujung simulator (*link* empat) dengan tahapan iterasi sebagai berikut :

a. Kecepatan angular (*angular velocity*) :

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (6)$$

b. Percepatan angular (*angular acceleration*) :

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (7)$$

c. Percepatan linier (*linear acceleration*) :

$${}^{i+1}v_{i+1} = {}^{i+1}R^i (\{ \omega_i \times {}^i P_{i+1} \} + \{ \dot{\omega}_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) \} + v_i) \quad (8)$$

$$\text{Gaya gravitasi : } v_0 = g \hat{Z}_0$$

d. Percepatan linier pada pusat massa

(*linear acceleration of the center of mass*) :

$${}^{i+1}v_{C_{i+1}} = \omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + \{ {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}) \} + v_{i+1} \quad (9)$$

e. Gaya inersial (*inertial force*) pada pusat massa :

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} \cdot {}^{i+1}v_{C_{i+1}} \quad (10)$$

f. Torsi inersial/momen (*inertial torque*) pada pusat massa :

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} \cdot {}^{i+1}\omega_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} \cdot {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (11)$$

5.2.2. Iterasi ke Dalam (*Inward Iterations*)

Iterasi dilakukan dari *link* paling luar (*link* empat) menuju *link base* (*link nol*) simulator :

a. Gaya (*force exerted*) :

$${}^i f_i = {}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \quad (12)$$

b. Momen (*torque exerted*) :

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}^i R^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^i R^{i+1} f_{i+1} \quad (13)$$

c. Torsi *joint* (*joint torque*) :

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i Z_i \quad (14)$$

Dari perhitungan diatas untuk semua *link* dengan piranti lunak, maka dihasilkan persamaan dinamik simulator kendali *turret* yang dapat diekspresikan dalam bentuk torsi dinamik sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \tau &= M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \\ &= M(\theta)\ddot{\theta} + B(\theta)\left[\dot{\theta}\dot{\theta}\right] + C(\theta)\left[\dot{\theta}^2\right] + G(\theta) \end{aligned} \quad (15)$$

Dan besarnya torsi *joint* tiap *joint* adalah sebagai berikut^[4] :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 & k_4 \\ k_5 & k_6 & k_7 & k_8 \\ k_9 & k_{10} & k_{11} & k_{12} \\ k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{17} \\ k_{18} \\ k_{19} \\ k_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{21} \\ k_{22} \\ k_{23} \\ k_{24} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{25} \\ k_{26} \\ k_{27} \\ k_{28} \end{bmatrix}$$

dimana :

$M(\theta)$ adalah matrik massa simulator

$B(\theta)$ adalah matriks *damping* pengaruh efek *coriolis*

$C(\theta)$ adalah matriks *damping* pengaruh gaya sentrifugal

$G(\theta)$ adalah vektor gaya akibat gaya gravitasi.

6. KESIMPULAN

Saat ini *turret* digerakkan secara manual dan terbatas sudut gerakannya. Dengan berhasilnya dirancang simulator *turret* maka sangat dimungkinkan *turret* dikontrol secara otomatis dengan dasar kontrol kinematik dan kontrol dinamik berdasarkan konfigurasi kinematik dan dinamik simulator. Dengan kontrol kinematik berfungsi untuk meningkatkan kekokohan (*robustness*), sedangkan kontrol dinamik sebagai kontrol torsi (*torque control*).

Metode *Newton-Euler* merupakan salah satu metode yang secara parsial dapat digunakan untuk mencari persamaan dinamik tiap *joint* berdasarkan kesetimbangan gaya. Untuk manipulator dengan konfigurasi serial, metode ini digunakan secara berurutan dengan menganalisa satu persatu *link* yang berdekatan.

Persamaan torsi tiap *joint* dari tiap *link* simulator digunakan untuk menentukan torsi aktuator akan yang diberikan kepada *link* berdasarkan lintasan (*trajectory*) yang akan ditentukan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Craig, John J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., California, 1989.
2. Fu, Gonzales, Lee, Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligence, International Edition, McGraw-Hill, New York, 1987.
3. Machined Press Ball Transfers. website:www.balltransfer.com
4. Hand Book, Bearing Units Handbooks, NTN Corporation.
5. Patria Haggblunds, AMOS (*Advanced Mortar System*), finland. website:www.patriahagglunds.fi
6. Pippenger, Tyler, Industrial Hydraulics, Third Edition, International Edition, McGraw-Hill, Aucland, 1980.
7. Pitowarno, Endro, Robotika : Desain, Kontrol, dan Kecerdasan Buatan, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
8. Rexroth Bosch Group, Hydraulic Cylinder NFPA Industrial Type Model CDT4, Bosch Rexroth Corporation, Bethlehem, USA.