PERANCANGAN SISTEM KENDALI *GUN TURRET* PADA *MEDIUM TANK*

DESIGN OF GUN TURRET CONTROL SYSTEM IN MEDIUM TANK

Putri Herdiyana Wulanuari[1], Edy Saptono[2], Triwanto Simanjuntak[3]
TEKNOLOGI DAYA GERAK, FAKULTAS TEKNOLOGI PERTAHANAN, UNIVERSITAS PERTAHANAN

Abstrak – Perkembangan lingkungan strategis Indonesia yang dinamis ini akan mempengaruhi berbagai sistem penyelenggaraan pertahanan negara. Salah satu bidang pertahanan yang dapat mengoptimalkan pertahanan Indonesia adalah Alat Utama Sistem Persenjataan (Alutsista). Bentuk pengembangan modernisasi dari kecanggihan pada kendaraan tank yang sedang dikembangkan adalah *Gun Turret*. Masalah sistem kendali pada kendaraan tempur khususnya *Gun Turret* merupakan salah satu bentuk kritis teknologi terhadap perkembangan startegis yang semakin berubah di Indonesia. Pemodelan dan analisis sistem kendali dari *Gun Turret* merupakan komponen vital dalam merancang sistem kendali gerak dari *Gun Turret* terhadap sasaran (*Locking target*), agar *Gun Turret* tetap pada orientasi sudut yang diinginkan tanpa terpengaruh oleh medan pertempuran. Peneliti lebih fokus dalam sudut elevasinya, sedangkan sudut azimuth dapat dikembangan pada penelitian selanjutnya dengan menggunakan prinsip yang sama digunakan pada saat menentukan sudut elevasi atau sedang dikembangkan pada tesis ini. Teknik sistem kontrol yang digunakan untuk menentukan sudut elevasi pada *Gun Turret* yaitu menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR). Tujuan penelitian ini adalah memodelkan dan menganalisis matematis sistem dinamika gerak dari *Gun Turret*. Mendesain sistem kontrol *Locking target* pada *Gun Turret Medium Tank* ketika tank bergerak pada bidang datar. Menerapkan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) sebagai sistem kontrol dalam menentukan sudut elevasi *Gun Turret.* Metode penelitian ini adalah metode komputasi berbasis simulasi yaitu dengan memodelkan secara matematika dinamika gerak *Gun Turret,* perancangan kontrol untuk locking target, pengujian simulasi, dan analisa. Kesimpulan penelitian ini adalah diperoleh pemodelan dan analisis matematis sistem dinamika gerak *Gun Turret MediumTank* FNSS-Pindad yaitu$M\left[\ddot{\theta}\right] + C\left[\dot{\theta}\right] + K[\theta] = [I_d][u]$. Kedua, sistem dinamik gerak dari *Gun Turret* yang telah menggunakan sistem kontrol *Liniear Quadratic Regulator* (LQR) menunjukan sistem stabil asimtotik dan konvergen untuk menuju titik setimbangnya. Ketiga, metode sistem kontrol optimal menggunakan LQR dapat mempercepat kestabilan suatu sistem gerak dinamik dan meminimalisasi gangguan yang terjadi pada suatu sistem.

Kata Kunci – Sistem Kendali, *Gun Turret, Medium Tank*

Abstrak *– The development of Indonesia's dynamic strategic environment will affect various national defense implementation systems. One area of defense that can optimize Indonesia's defense is the Main Tool for Armaments Systems (ALUTSISTA). The form of modernization development of sophistication in the vehicle tank that is being developed is Gun Turret. The transportation system problem in Gun Turret special combat vehicles is one of the critical forms of strategic developments that are increasingly changing in Indonesia. Modeling and analyzing the control system of the Gun Turret is a vital component in implementing the system of the Gun Turret to the target (Locking the target), so that the Gun Turret remains at the desired point of view without being questioned by the battlefield. Researchers are more focused on the elevation angle, while the azimuthal angle can be*

[1] Program Studi Teknologi Daya Gerak, Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan.
[2] Dosen Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan.
[3] Dosen Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan.

developed in subsequent studies using the same principles used when determining the elevation angle or being developed in this thesis. The control system technique used to determine the elevation angle of the Gun Turret is using a Linear Quadratic Regulator (LQR). The purpose of this study is to model and analyze the motion dynamics system of the Gun Turret. Designing a locking target control system on the Gun Turret, medium tank, flat moving tank Implementing a Linear Quadratic Regulator (LQR) as a control system in determining the Gun Turret elevation angle. This research method is a computation-based simulation method by modeling the dynamics of the motion of the Gun Turret, designing controls to lock targets, simulating testing, and analyzing. The conclusion of this study was obtained mathematical modeling and analysis of the dynamics of the FNSS-Pindad MediumTank Gun Turret motion system namely $M[\ddot{\theta}] + C[\dot{\theta}] + K[\theta] = [I_d][u]$*. Second, the dynamic motion system of the Gun Turret that has used a Linear Quadratic Regulator (LQR) control system shows an asymptotic and convergent stable system to reach its equilibrium point. Third, the optimal control system method uses LQR which can increase the stability of a dynamic motion system and minimize the disturbance that occurs in a system.*

Keywords *– System Control, Gun Turret, Medium Tank*

Pendahuluan

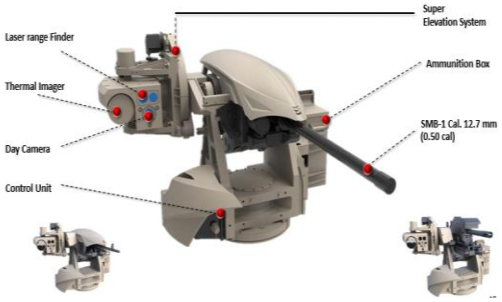
Perkembangan lingkungan strategis Indonesia yang dinamis ini akan mempengaruhi berbagai sistem penyelenggaraan pertahanan negara. Pertahanan negara merupakan sebuah bentuk dari usaha dalam rangka untuk mempertahankan kedaulatan rakyat, keutuhan wilayah, dan keselamatan segenap bangsa dari berbagai ancaman dan gangguan terhadap keutuhan bangsa dan negara (Kementrian Pertahanan Republik Indonesia, 2015). Hal ini menyiratkan betapa pentingnya suatu pertahanan sebagai salah satu unsur utama sebuah negara dalam mempertahankan eksistensinya. Perkembangan sekarang ini, pertahanan negara telah mengalami banyak kemajuan meliputi dari konsep dan teknologi yang menunjang pertahanan itu sendiri. Indonesia sebagai negara yang memiliki wilayah yang begitu luas tentu saja memerlukan adaptasi mengenai berbagai perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk mengatasi berbagai ancaman di bidang pertahanan yang disesuaikan dengan strategi pertahanan dan keamanan negara.

Salah satu bidang pertahanan yang dapat mengoptimalkan pertahanan Indonesia adalah Alat Utama Sistem Persenjataan (Alutsista). Alutsista masuk dalam agenda utama pembinaan pertahanan Indonesia, hal tersebut dikarenakan terkait dengan adanya tujuan prioritas penyempurnaan Alutsista Tentara Nasional Indonesia (TNI) yang nantinya akan menentukan kekuatan

postur pertahanan Indonesia (Kementrian Pertahanan Republik Indonesia, 2014). Terlebih lagi apabila Alutsista dalam konteks pertahanan modern dapat mengoptimalkan pertahanan kedaulatan wilayah negara serta untuk memaksimalkan potensi TNI dalam menjalankan tugas pokok dan fungsinya. Angkatan bersenjata di Indonesia perlu kemampuan baru yang untuk menjamin suskes dalam situasi tempur modern.

Modernisasi kekuatan pertahanan tidak hanya bertujuan untuk mencapai kesetaraan antar berbagai negara, akan tetapi untuk mengantisipasi terjadinya ketidakpastian ancaman akibat situasi strategis yang dinamis. Modernisasi kekuatan militer menurut Kementrian Pertahanan Republik Indonesia (2015) juga dipengaruhi oleh kemajuan teknologi pertahanan baik dari sistem persenjataan konvensional startegis ataupun *Remote Control Weapon System* (RCWS). Modernisasi persenjataan konvensional dan RCWS menjadi faktor penting oleh TNI Angkatan Darat dalam mengembangkan Alutsistanya, bentuk komponen kecanggihan RCWS dapat dilihat pada gambar 2. Salah satu Alutsista yang biasa digunakan oleh TNI Angkatan Darat (TNI AD) adalah tank. Kendaraan tank yang digunakan oleh TNI Angkatan Darat juga sedang dikembangkan oleh PT. Pindad, salah satunya adalah *Medium Tank* kaliber 105 mm yang terdapat pada gambar 1 didukung dengan berbagai kecanggihan sarana dan prasarananya.

Gambar 1. 105 mm *Modern Medium*
Sumber : Kumludere, Oğulbey Mahallesi (2016)



Gambar 2. Konsep *Remote Control*
Sumber : PT.Pindad (2018)

Bentuk pengembangan modernisasi dari kecanggihan pada kendaraan tank yang sedang dikembangkan adalah *Gun Turret*. *Gun Turet* termasuk dalam pengembangan konsep *Firepower and Protection. Gun Turret* adalah sistem senjata laras panjang yang terdapat pada tank dan dapat bergerak untuk menyesuaikan dengan arah dan pergerakan target, dengan modernisasi yang dioperasikan dengan

automatic control. *Automatic control* pada *Gun Turret* berguna untuk melindungi operator dari ancaman musuh saat berperang, respon yang diberikan lebih cepat, akurasi yang dihasilkan lebih baik dan lain-lain.

Sistem gerak utama Gun Turret memiliki 2 sumbu gerak, yaitu sumbu azimuth dan sumbu elevasi. Pada sumbu azimuth meliputi gerak rotasi pada turret sebesar 3600 terhadap horisontalnya, sedangkan sumbu elevasinya meliputi gerak rotasi laras senjata terhadap vertikalnya. Saat ini, sebagian besar kendaraan tempur militer modern menggunakan sistem penggerak dengan listrik untuk mengoperasikan turret dalam menentukan sumbu azimuth dan elevasinya. Sistem penggerak listrik tidak dapat dihindari untuk memenuhi kebutuhan dasar mobilitas Gun Turret dalam ruang terbatas oleh volumenya. Oleh karena itu, sudah seharusnya sistem pengerak listrik menyediakan platform khusus operasi yang lancar menggunakan bantuan sisem kontrol pada senjata, sehingga akan menghasilkan penembak dengan kemampuan dan mendapatkan probablitas yang sangat tingggi dalam mengenai sasaran.

Gomes dan Fereirra (2005) mengatakan bahwa masalah sistem kendali pada kendaraan tempur khususnya Gun Turret merupakan salah satu bentuk kritis teknologi terhadap perkembangan startegis yang semakin berubah di Indonesia. Oleh karena itu, pemodelan dan analisis sistem kendali dari Gun Turret merupakan komponen vital dalam merancang sistem kendali gerak dari Gun Turret terhadap musuhnya (Locking target), agar Gun Turret tetap pada orientasi sudut yang diinginkan tanpa terpengaruh oleh medan pertempuran. Akan tetapi terdapat hal yang mempengaruhi, salah satunya adalah ukuran dari peluru, karena ukuran peluru menjadi faktor yang mempengaruhi dimensi dan inersia dari laras canon. Inersia yang besar membuat sistem sulit bergerak dengan akurat dan presisi, sehingga dibutuhkan sistem kendali yang sesuai untuk menyelesaikan masalah tersebut. Hal ini dikarenakan keberadaan kontroler atau pengendali dalam sebuah sistem kendali memiliki kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini fokus utamanya adalah pemodelan dan analisis sistem

kendali dari *Gun Turret* yang dapat membantu tugas operator kontroler saat mengarahkan kedudukan turretnya pada sudut elevasi yang dibutuhkan. Pada penelitian ini, peneliti lebih fokus dalam sudut elevasinya, sedangkan sudut azimuth dapat dikembangan pada penelitian selanjutnya dengan menggunakan prinsip yang sama digunakan pada saat menentukan sudut elevasi atau sedang dikembangkan pada tesis ini. Dengan adanya pengendali suatu rancangan kontrol sistem diharapkan memiliki kemampuan mengidentifikasi sekaligus mengoreksi kesalahan *output* pada sistem (Astrom & Murray, 2008). Teknik sistem kontrol yang digunakan untuk menentukan sudut elevasi pada *Gun Turret* yaitu menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR). Menurut Fernaza (2016) hal ini dikarenakan kontrol LQR bertujuan untuk meredam berbagai gangguan yang terdapat pada frekuensi tinggi dan memiliki suatu tanggapan atau respon yang cepat terhadap sebuah masukan (*Input*). Selain itu, menurut Yuliyanto (2012) juga berpendapat bahwa *Linier Quadratic Regulator* (LQR) memiliki kemampuan yang dapat mengatasi berbagai gangguan besar yang terjadi pada sistem kestabilan tanpa harus mengurangi perfomansi kinerja sistem.

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis dan memodelkan matematis sistem dinamika gerak dari *Gun Turret.* Kedua, menerapkan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) sebagai sistem kontrol dalam menentukan sudut elevasi *Gun Turret*. Ketiga, Menganalisis stabilitas *locking target* pada *Gun Turret Medium Tank* menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR).

Metode Penelitian

Pendekatan Penelitian

Pendekatan dilaksanakan dengan menggunakan metode komputasi berbasis simulasi dari persamaan dinamika gerak benda. Pendekatan simulasi dilakukan dengan asumsi dinamika gerak titik bermasa dengan solusi persamaan diferensial (*ordinary diferensial eqution-ODE*). Tahapan-tahapan pendekatan yang dilakukan adalah:

1. Studi konsep dasar mengenai mekanisme gerak *Gun Turret*, meliputi dinamika gerak *Gun Turret*, dan kendali *Gun Turret*.
2. Studi perkembangan dan kondisi kekinian mengenai teknologi *Gun Turret*.

3. Penurunan konsep dan persamaan sistem gerak dinamis.
4. Perancangan sistem kontrol
5. Simulasi numerik dan analisis

Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perangkat Keras (*hardware*), berupa satu buah laptop dengan spesifikasi :
   a. *System model* : Lenovo G480
   b. *Operating system*: Windows 7 Ultimate, 64-bit
   c. *Processor*: Intel® core ™ i3-2348M CPU @2.30Ghz 2.30 GHz
   d. *Memory RAM* : 8.00 GB

2. Perangkat lunak

   Perangkat lunak yang digunakan yaitu untuk membantu perhitungan dan proses analisis tanggapan sistem terhadap sinyal masukan dan aksi pengontrolan adalah Python 3.6. Sedangkan untuk penggambaran 3D menggunakan software Autodesk inventor 2018.

Teknik Analisa Data

a. Memodelkan persamaan gerak *Gun Turret* secara analitik simulasi
b. Mendesain sistem kendali *Gun Turret*
c. Menentukan optimal kontrol *Gun Turret*
d. Menentukan *vector stabilization*

Hasil Pembahasan

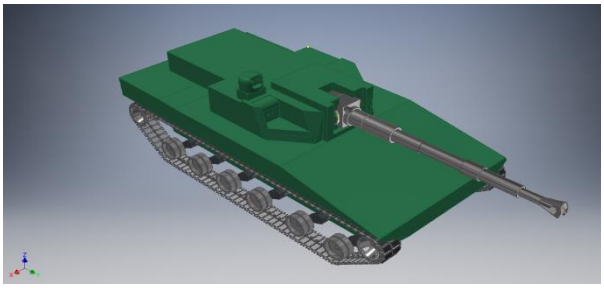
Deskripsi Data

1. Pemodelan 3D Model Medium Tank FNSS Pindad

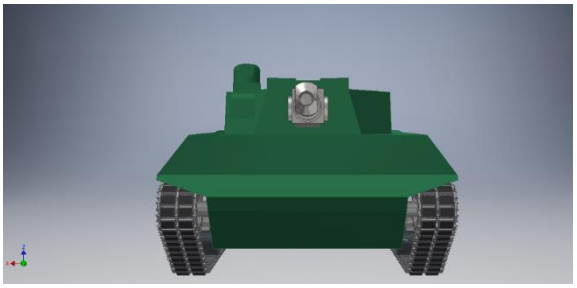
   Melakukan penelitian mengenai perancangan sistem kendali *Gun Turret* Medium Tank FNSS Pindad memerlukan data fisik dari tank itu sendiri untuk menentukan parameter-parameter yang akan digunakan sebagai input dalam sistem kendali pada *Gun Turret*. Data fisik dapat dihasilkan dengan menggunakan dua cara yaitu eksperimental dan computasional. Akan tetapi, untuk melakukan penelitian secara eksperimental belum bisa dilakukan saat ini karena sumber daya yang belum memungkinkan, memerlukan biaya cukup banyak dan waktu yang lama. Oleh karena itu, untuk mendapatkan data fisik seperti inertia properties, Stiffnes dan sebagainya dari Medium Tank FNSS Pindad, memilih dengan membentuk model 3D CAD Medium Tank FNSS Pindad menggunakan Inventor menggunakan data asumsi yang sedekat mungkin dengan wujud aslinya.

Keterbatasan infomasi mengenai data fisik juga berimbas pada penentuan material pada Medium Tank FNSS Pindad.

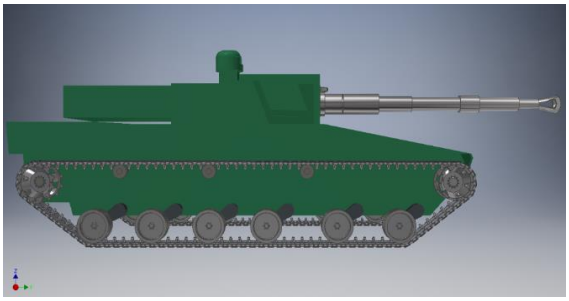
Penentuan material pada tank tidak bisa dilakukan pada setiap bagian. Oleh karena itu, penentuan material setiap bagian model 3D CAD dari Medium Tank FNSS Pindad memilih untuk penggunaan material yang dapat merepresentasikan gambaran model fisik dari wujud aslinya dengan mengunakan satu material untuk semua bagian yaitu Steel Mild. Model 3D yang dibentuk ditentukan dari data yang telah dikumpulkan dari berbagai sumber seperti jurnal dan informasi di internet, akan tetapi tidak secara menyeluruh. Berikut merupakan gambar model secara computasional dilihat dari tiga sudut.



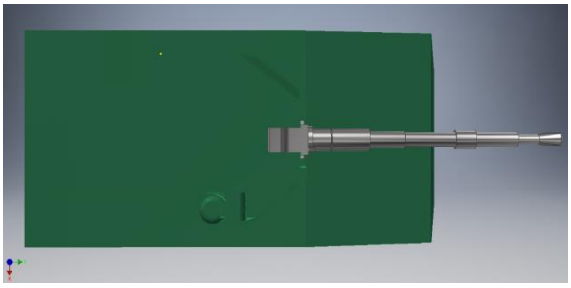
Gambar 3. FNSS Medium Tank Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



Gambar 4. Tampak Depan FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

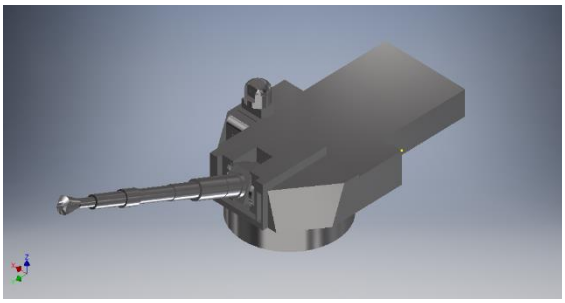


Gambar 5. Tampak Samping FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

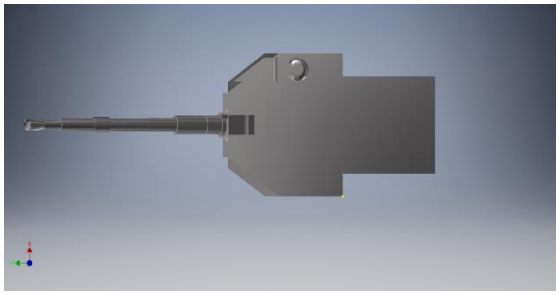


Gambar 6. Tampak Atas FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

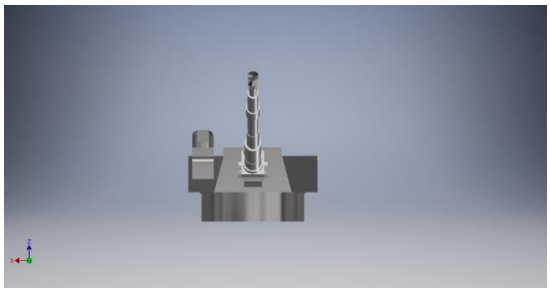
Pada pembahasan dalam tesis ini berfokus pada perancangan sistem kendali *Gun Turret* pada Medium Tank, maka untuk memudahkan dalam menemukan parameter dari *Gun Turret* adalah dengan mengambil rancangan gambar *Gun Turret* dari rancangan gambar tank secara utuh, yang kemudian dicari inertial properties pada masing-masing bagian turret yang dibutuhkan. Berikut ini adalah tampilan *Gun Turret*:



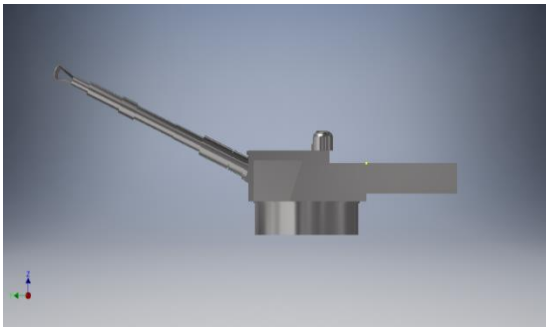
Gambar 7. *Gun Turret* FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



Gambar 8. Tampak Atas *Gun Turret* FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



Gambar 9. Tampak Depan *Gun Turret* FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



Gambar 10. Tampak Samping *Gun Turret* FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Pembuatan model 3D yang telah terbentuk pada Gambar 3 hingga Gambar 10 dibuat menggunakan ukuran-ukuran pada Tabel 1 yang dibentuk semirip mungkin dengan aslinya, berikut adalah spesifikasinya:

Tabel 1. Spesifikasi Tank dalam Model 3D

No	Spesifikasi	Nilai	Asli
1	Panjang Tank	7 meter	6,952 meter
2	Lebar Tank	3 meter	3,36 meter
3	Tinggi Tank	2.5 meter	2,456 meter
4	Massa tank	32 ton	32 ton
5	Material	*Mild Steel*	*Armox500T*

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Sedangkan untuk membuat 3D *Gun Turret* menggunakan ukuran-ukuran berikut ini:

Tabel 2. Spesifikasi *Gun Turret* dalam Model 3D

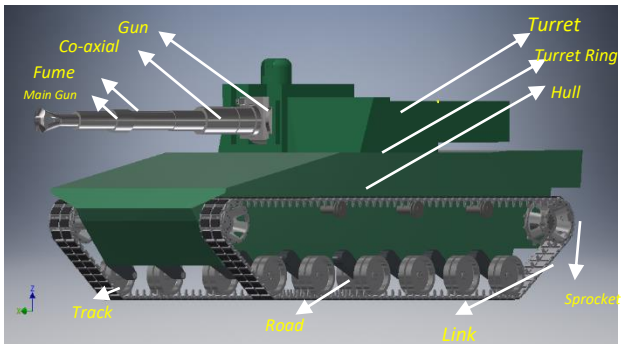
No	Specification	Value
1	Panjang Turret	4 m
2	Lebar Turret	2 m
3	Panjang *Gun*	4 m
4	Dimeter *Gun*	105 mm
5	Massa Turret	5.5 ton

6	Massa *Gun*	2.5 ton
7	*Motor Inertia*	3288.419 $kgmm^2$
8	*Pinion Inertia*	1844.091 $kgmm^2$
9	*Gear Inertia*	175942.124 $kgmm^2$
10	*Load Inertia*	3835417233.827 $kgmm^2$
11	*Motor Shaft Stiffness*	1.16656759 . 10^4 Nm
12	*Load side Torsional stiffness*	11.8056641 . 10^7 Nm
13	*Motor shaft viscous dumping coefficient*	3.0
14	*Turnion bearings viscous coefficient*	10
15	Jumlah gigi pinion *Gun Turret*	25
16	Jumlah gigi gear *Gun Turret*	65
17	*Ratio Gear (N)*	2,6

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Tujuan pembuatan 3D model untuk *Gun Turret* adalah untuk menentukan parameter detail yang dibutuhkan dalam perancangan sistem kendali. Dalam penelitian ini yang akan kita fokuskan adalah 3 *degree of freedom* dalam memodelkan elevasi *Gun Turret*, maka detail parameter yang dibutuhkan dari *Gun Turret* yaitu data yang terdapat pada *motor, pinion, gear* dan *gun*. Jadi, setelah terbentuk 3D dari ukuran-ukuran yang didapatkan secara umum seperti pada Tabel 2, melalui software Inventor dapat membantu menemukan *inertia properties* dari masing-masing komponen, yaitu seperti *motor inertia, pinion inertia, gear inertia, load/gun inertia, gear ratio, motor shaft stiffness* dan *load side torsional stiffness.*

2. Komponen-Komponen Tank



Gambar 11. Komponen FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Secara mendasar tank terbagi menjadi tiga bagian dasar yaitu *Hull, Turret* dan *Gun.* Berikut penjelasan mengenai struktur tank secara umum :

a. *Hull*

Hull merupakan komponen yang membentuk struktur umum pada tank dan dapat disebut sebagai pemegang komponen utama.

b. *Turret*

Turret merupakan komponen yang terletak di atas *hull* dan biasanya dapat berputar sesuai dengan sumbu Azimuth. Detail komponen yang lebih kecil yang biasa terdapat pada turret yaitu seperti periskop, pallka, dan turret.

c. *Gun*

Gun merupakan senjata yang terdapat pada tank dan terletak menempel pada *turret* yang berfungsi sebagai senjata utama. Senjata utama ini biasanya berupa meriam dengan kaliber tinggi yang tergantung dengan jenis tanknya.

d. *Track*

Track merupakan deretan roda yang terdapat pada sepanjang sisi kiri dan kanan dari *Hull* yang berfungsi sebagai sistem penggerak pada tank untuk mobilisasi. *Track* pada tank memiliki dua macam bentuk yaitu berbentuk roda dan rantai.

Pembahasan

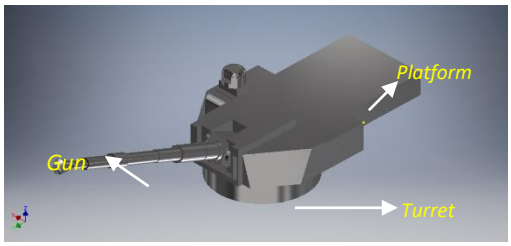
Pemodelan Matematis Sistem Dinamika Gerak Dari *Gun Turret*

Mekanisme gerak dari *Gun Turret Medium Tank* yaitu menggunakan dua motor dengan *gearbox* sebagai sistem penggerak. Salah satu motor digunakan untuk menggerakan *elevating mass* (*Gun assy)*, dan satu motor lagi digunakan untuk menggerakan seluruh *Gun Turret* ke arah Azimuth (*traverse).* Sistem kontrol untuk penentuan sudut elevasi maupun azimuth (berikut kecepatan gerakannya) terdapat pada kendali *Crew gunner* dan *Commander.* Sedangkan apabila berada di dalam keadaan darurat, pengendalian atau sistem kontrol penentuan sudut elevasi dan azimuth *Gun Turret* terdapat pada kontrol manual yang hanya dapat dioperasikan pada pos *gunner*.

Untuk mendapatkan suatu model sistem dinamika gerak dari *Gun Turret* yaitu terbagi menjadi tiga subsistem yaitu terdiri dari platform/*hull*, *turret* (sebagai tautan pertama) dan *Gun* (sebagai tautan yang kedua). Dalam bab ini, akan dijelaskan mengenai 3 *degree of freedom* dari permodelan dinamik matematis dari sumbu elevasi *Gun Turret* dari Tank Harimau Pindad (FNSS Pindad). Persamaan gerak yang dihasilkan yaitu diturunkan dari persamaan Lagrange.

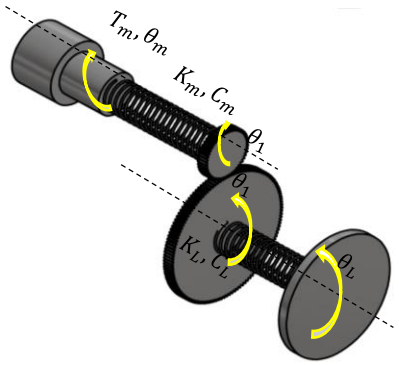
a. Permodelan dinamis

Secara umum *Gun Turret* yang digunakan pada kendaraan milliter memiliki beberapa komponen yang sama satu sama lain sebagai kebutuhan komponen dasar dalam mobilisasi kendaraan militer. komponen yang bisa dikatakan sama, contohnya adalah seperti sistem penggerak (motor), *gear*, *trunnions, gun mounts*, struktur motor, *turret Hull*, dan bantalan (*bearing*) yang memungkinkan untuk membuat rotasi pada sumbu elevasi dan senjatanya.



Gambar 12. Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Gambar 12 menjelaskan bahwa untuk *Gun Turret* bergerak dalam operasi sumbu elevasi maka digerakan oleh motor (*shaft motor* berputar), kemudian menggerakan *pinion* yang memutar *gear* yang menghasilkan *Gun Turret* bergerak secara elevasi karena tersambung dengan *load/Gun.* Penyederhanaan dari gambar 4.13 skematik notasi model sumbu elevasi pada *Gun Turret* dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 13. Model CAD Elevasi Turret

Gambar 13 merupakan ilustrasi yang menggunakan notasi ilmiah dengan massa yang digabungkan (beban). Notasi ilmiah yang terdapat pada gambar 13, torsi yang diberikan dinotasikan dengan T_m. Sedangkan untuk notasi inersia I_m, I_1, I_2, I_L yang ada pada gun turret tersebut, dinotasikan sebagai inersia motor, inersia pinion, inersia, gear sector dan inersia beban. Jumlah roda gigi yang diberikan dinotasikan sebagai N. kesesuaian poros pinion dinotasikan sebagai K_m dan kesesuaian sisi beban dinotasikan sebagai K_L. Koefisien gesekan pada *viscous motor* dinotasikan sebagai C_m, sedangkan untuk koefisien gesekan pada *viscous* beban dinotasikan sebagai C_L. Dasar untuk menghitung *motor*

shaft stiffness menggunakan teori kekuatan adalah sebagai berikut:

$$K_m = \frac{GJ}{L} \quad (1)$$

Dimana :

- G adalah *shear modulus of rigidity*
- J adaah *Polar moment inertia*
- L adalah panjang dari shaft motor

Parameter-parameter yang lain seperti *load side stiffness* didapatkan dari model 3D di autocad. Sedangkan untuk *Viscous damping Stiffnes* data ditentukan dengan mencari diberbagai sumber. *Gear train* dalam pembahasan ini dimodelkan atau divisualisasikan sebagai komponen yang sifatnya rigid terhadap waktu, oleh karena itu *gear train* bertindak sebagai elemen yang dapat mereduksi kecepatan. Sehingga hal ini dapat dijadikan sebagai kendala gerak. Kendala gerak dapat diformulasikan sebagai berikut : (2)

$$N = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\dot{\theta_1}}{\dot{\theta_2}} = \frac{\ddot{\theta_1}}{\ddot{\theta_2}}$$

b. Persamaan Lagrange

Secara umum 'persamaan Lagrange dapat didefinisikan dengan

$$L = T - U \quad (3)$$

Persamaan *Lagrange* dapat digabungkan dengan berbagai kendalanya secara langsung, yaitu dengan pemilihan koordinat umum dari masing-masing sistem yaitu

$$P_k - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} + \frac{\partial D}{\partial q_k} = \overline{Q_k} \quad (4)$$

Dengan adanya pemilihan koordinat umum sebagai $\theta_{m,}\theta_{1,}\theta_L$, maka energi kinetik dari sistem yaitu sebagai berikut :

$$T = \frac{1}{2} I_m \dot{\theta_m}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta_1}^2 + \frac{1}{2} I_2 \left(\frac{\dot{\theta_1}^2}{N^2}\right) + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta_L}^2 \quad (5)$$

energi potensial yang terbentuk adalah sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{2} k_m (\theta_m - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} k_L \left(\frac{\theta_1}{N} - \theta_L\right)^2 \quad (6)$$

Dalam sistem gerak dala m *Gun Turret* terdapat energi yang hiang atau biasanya disebut dengan energi disipasi, bentuk energi disipasi dari sistem adalah sebagai berikut :

$$D = \frac{1}{2} c_m (\dot{\theta_m} - \dot{\theta_1})^2 + \frac{1}{2} c_L \left(\frac{\dot{\theta_1}}{N} - \dot{\theta_L}\right)^2 \quad (7)$$

Akan tetapi, dari persamaa kinetik, energi potensial dan energı disipasi ditentukan terlebih dahulu inisial kondisinya, dengan cara menurunkan dari masing-masing energi, yaitu sebagai berikut :

1. Energi kinetik (T)

a) Jika $q_k = \theta_m$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta_m}}\right) = I_m \ddot{\theta_m} \quad (8)$$

b) Jika $q_k = \theta_1$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta_1}}\right) = \left(I_1 + \frac{I_2}{N^2}\right) \ddot{\theta_1} \quad (9)$$

c) Jika $q_k = \theta_L$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta_L}}\right) = I_L \ddot{\theta_L} \quad (10)$$

2. Energi Potensial (U)

a) Jika $q_k = \theta_m$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_m} = k_m(\theta_m - \theta_1) \quad (11)$$

b) Jika $q_k = \theta_1$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_1} = -k_m\theta_m + \theta_1\left(k_m + \frac{k_L}{N^2}\right) - \frac{k_L}{N}.\theta_L \quad (12)$$

c) Jika $q_k = \theta_L$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_L} = -k_L\left(\frac{\theta_1}{N} - \theta_L\right) \quad (13)$$

3. Energi Disipasi (D)

a) Jika $q_k = \theta_m$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta_m}} = c_m(\dot{\theta_m} - \dot{\theta_1}) \quad (14)$$

b) Jika $q_k = \theta_1$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta_1}} = -c_m\dot{\theta_m} + \left(c_m + \frac{c_L}{N^2}\right)\dot{\theta_1} - \frac{c_L}{N}\dot{\theta_L}$$

c) Jika $q_k = \theta_L$, maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta_L}} = -c_L\left(\frac{\dot{\theta_1}}{N} - \dot{\theta_L}\right) \quad (16)$$

4. Mengansumsikan bahwa

$$\overline{Q_k} = T_m \quad (17)$$

Persamaan-persamaan di atas merupakan penerapan persamaan Lagrange untuk setiap koordinat umum yang dipilih, dan kemudian akan dibentuk dalam sebuah matriks sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} I_m & 0 & 0 \\ 0 & I_1 + \frac{I_2}{N^2} & 0 \\ 0 & 0 & I_L \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \ddot{\theta_m} \\ \ddot{\theta_1} \\ \ddot{\theta_L} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_m & -c_m & 0 \\ -c_m & \left(c_m + \frac{c_L}{N^2}\right) & -\frac{c_L}{N} \\ 0 & -\frac{c_L}{N} & c_L \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \dot{\theta_m} \\ \dot{\theta_1} \\ \dot{\theta_L} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_m & -k_m & 0 \\ -k_m & \left(k_m + \frac{k_L}{N^2}\right) & \frac{k_L}{N} \\ 0 & -\frac{k_L}{N} & k_L \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \theta_m \\ \theta_1 \\ \theta_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} T_m \quad (18)$$

Dengan mendefinisikan :

$$M = \begin{pmatrix} I_m & 0 & 0 \\ 0 & I_1 + \frac{I_2}{N^2} & 0 \\ 0 & 0 & I_L \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_m & -c_m & 0 \\ -c_m & \left(c_m + \frac{c_L}{N^2}\right) & -\frac{c_L}{N} \\ 0 & -\frac{c_L}{N} & c_L \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} k_m & -k_m & 0 \\ -k_m & \left(k_m + \frac{k_L}{N^2}\right) & \frac{k_L}{N} \\ 0 & -\frac{k_L}{N} & k_L \end{pmatrix}$$

(22)

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_m \\ \theta_1 \\ \theta_L \end{pmatrix}$$

$$I_d = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Secara umum persamaan (18), dapat ditulis menjadi :

$$M[\ddot{\theta}] + C[\dot{\theta}] + K[\theta] = [I_d][u] \quad (19)$$

Kemudian, dari persamaan (19) dapat diubah ke dalam persamaan *state* space supaya lebih mudah untuk menentukan keluaran atau *output* dari simulasi. Rumus dari *state space* secara umum adalah sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + BU \quad (20)$$

$$y = Cx + DU \quad (21)$$

Matriks *State Space* yang dihasilkan adalah

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -M^{-1}K & 0 & 0 \\ 0 & -M^{-1}K & 0 \\ 0 & 0 & -M^{-1}K \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -M^{-1}C & 0 & 0 \\ 0 & -M^{-1}C & 0 \\ 0 & 0 & -M^{-1}C \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ M^{-1}.I_d \\ M^{-1}.I_d \\ M^{-1}.I_d \end{bmatrix} U$$

atau dapat disederhanakan menjadi seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0]_{3\times3} & [I]_{3\times3} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0]_{3\times1} \\ M^{-1}.I_d \end{bmatrix} U$$

Dengan mendefinisikan:

a) Matriks A

$$A = \begin{bmatrix} [0]_{3\times3} & [I]_{3\times3} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (23)$$

b) Matriks B

$$B = \begin{bmatrix} [0]_{3\times1} \\ M^{-1}.I_d \end{bmatrix} \quad (24)$$

Dari semua persamaan *state space* yang telah didefinisikan maka dapat digunakan untuk mencari *state vector*:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_1 \\ \theta_L \\ \dot{\theta_m} \\ \dot{\theta_1} \\ \dot{\theta_L} \end{bmatrix}$$ atau

$$x = [\theta_m \quad \theta_1 \quad \theta_L \quad \dot{\theta_m} \quad \dot{\theta_1} \quad \dot{\theta_L}]^T \quad (25)$$

input yang hanya terdapat pada sistem adalah torsi motor, sedangkan untuk menentukan keluaran (*Output*) yang terjadi pada sistem yaitu dengan mendefinisikan matriks C dan D pada *State Space.* Caranya yaitu menentukan terlebih dahulu keluaran yang paling memungkinkan dalam sistem, keluaran tersebut yaitu seperti posisi motor, kecepatan motor, *load position,* atau *load speed.* Sebagai contohnya dapat mengambil *load speed*, maka matriks C dan D adalah sebagai berikut :

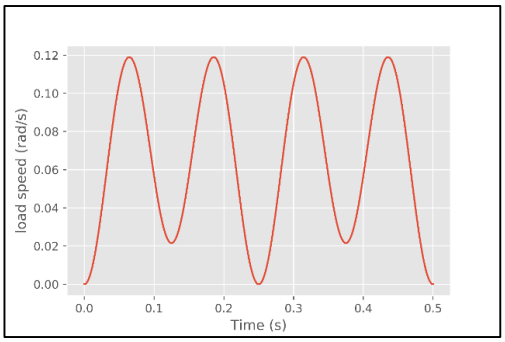
$$y = Cx + DU$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$$

$D = 0$

c. Simulasi menggunakan *Open Loop System*

Hasil simulasi dari sumbu elevasi dari *Gun Turret* pada tank berdasarkan pengambilan model 3 *degree of freedom* menggunakan Python 3.6 Parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 14. *Load Speed vs Time (Low Frequency Excitation)*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

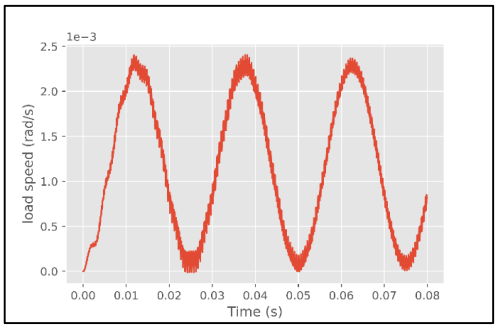
Tabel 3. Parameter *Gun Turret*

No	Parameter	Simbol	Ukuran	Satuan
1	*Motor Inertia* (Iyy)	I_m	32.88419×10^{-4}	kgm^2
2	*Pinion Inertia* (Iyy)	I_1	18.44091×10^{-4}	kgm^2
3	*Gear Inertia* (Ixx)	I_2	$1759.42124 \times 10^{-4}$	kgm^2
4	*Load Inertia* (Ixx)	I_L	$38354172.33827 \times 10^{-4}$	kgm^2
5	*Motor Shaft Stiffness*	K_m	$1.16656759 . 10^4$	Nm /rad
6	*Load SideTorsional Stiffness*	K_L	$11.8056641 . 10^7$	Nm /rad
6	*Motor shaft Viscous damping coefficient*	C_m	0.3	Nms /rad
7	*Trunnion bearings viscous coefficient*	C_L	10	Nms /rad

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

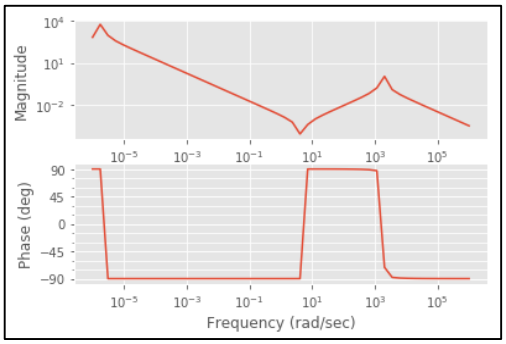
Parameter yang terdapat pada Tabel 3 digunakan untuk menentukan simulasi pada motor yang menjadi *actuator* pada sistem kontrol LQR sumbu elevasi turret menggunakan *software Python* 3.6. Simulasi torsi motor menggunakan dua model, model pertama menggunakan *Low frequency Excitation*, kedua yaitu *High frequency Excitation* yang disimulasikan oleh *Python 3.6*. Torsi motor untuk *Low frequency Excitation* yaitu $Tm(t) = 4000 \sin(8 \times 2\pi t) + 400 \sin(4 \times 2\pi t)$.

Torsi motor untuk *High frequency Excitation* yaitu $Tm(t) = 4000 \sin(4000 \times 2\pi t) + 400 \sin(40 \times 2\pi t)$.

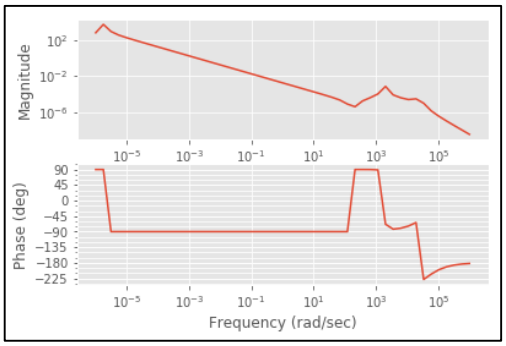


Gambar 15. *Load Speed vs Time (High Frequency Excitation)*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

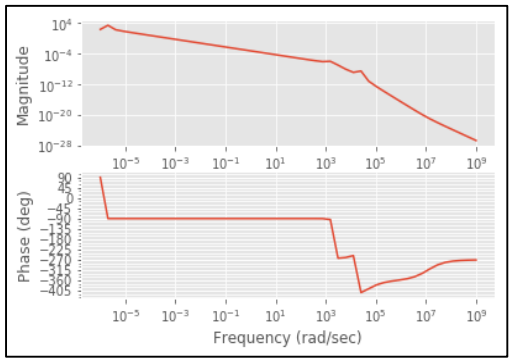
Untuk *meningkatkan* frekuensi eksitasinya, perbedaan tersebut dapat diamati dalam domain frekuensi sehingga jauh lebih mempermudah pengamatan. *Bode plots.*



Gambar 16. *Bode Plot (Input Motor Torque, output motor speed)*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)



Gambar 4.17 *Bode Plot (Input Motor Torque, output pinion speed)*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)



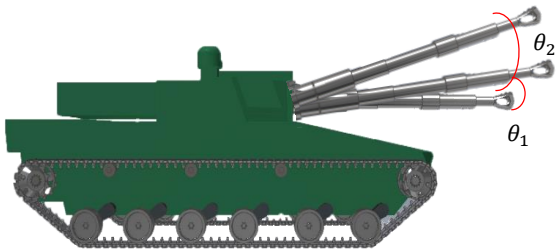
Gambar 18. *Bode Plot (Input Motor Torque, output Load speed)*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Berdasarkan grafik pada Gambar 16, gambar 17 dan gambar 18, dapat dikatakan bahwa :

1) Akan terjadi *Stiffness* yang lebih tinggi pada *motor side* dan *load side,* jika diberikan frekuensi resonansi yang lebih tinggi.
2) *Load inertia* yang lebih tinggi akan memberikan frekuensi resonansi yang lebih rendah.
3) Viscous damping cefficient tidak berpengaruh pada frekuensi resonansi, akan tetapi Viscous damping cefficient yang semakin tinggi menjadikan resonansi semakin halus.
4) Rasio gear memiliki perilaku yang kompleks pada frekuensi resonansi. Walaupun rasio gear akan dapat mengurangi titik ekuivalen stiffness dan mengurangi titik ekuivalen yang tercermin ke motor side.

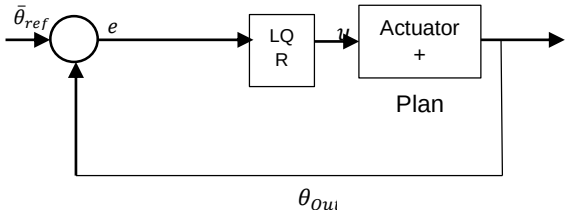
Linier Quadratic Regulator (LQR)* untuk menentukan sudut elevasi pada *Gun Turret

Gun Turret merupakan sebuah sistem yang memiliki ketidaksatabilan pada saat melakukan pengoperasian ke arah sumbu elevasi dan sumbu azimuth untuk penembakan. *Gun Turret* akan mencapai suatu kestabilan jika diberi kontrol pada sistem kontrolnya untuk dapat mempertahankan sudut elevasi atau azimuth dalam kondisi yang tegak lurus dengan arah target penembakan. Tujuan dari kontrol LQR ini pada turret adalah untuk meminimalisasi ganguan yang dialami oleh turret. Misalnya digambarkan pada berikut ini:



Gambar 19. Ilustrasi Pergerakan Sumbu Elevasi Turret
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Kontrol modern. Kontrol optimal dengan menggunakan metode LQR bergantung pada pemilihan matriks Q dan R. pemilihan untuk matriks tersebut bergantung pada seberapa besar pengaruh y dan u yang diinginkan pada *cost function* dan dilakukan dengan *trial* dan *error* (coba-coba) yang sesuai untuk mendapatkan respon yang sesuai. Pada penelitian ini pencarian nilai Q didapat menggunakan perhitungan *Software Python 3.6*. Nilai R yang diambil yaitu 0.5, sedangkan matriks Q yang diambil adalah sebagai berikut:



Gambar 20. Diagram blok kontrol LQR pada Turret

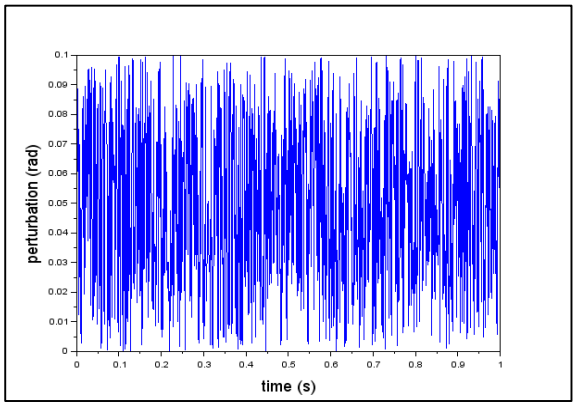
Liniear Quadratc Regulator (LQR) merupakan salah satu metode sistem

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

sedangkan untuk panduan untuk melakukan simulasi penerapan LQR dengan menggunakan diagram blok dari kontrol LQR pada Turret sebagai berikut :

Berdasarkan gambar 20 dijelaskan bahwa $\bar{\theta}$ merupakan sudut elevasi terganggu atau sudut elevasi yang akan diberi kontrol karena adanya gangguan, sedangkan *Plant* terdiri dari *dynamics tank* dan *actuator (motor)*, hal ini dikarenakan *dynamics tank* dan *actuator (motor)* bagian dari sistem peralatan yang bekerjasama dalam ketika melakukann

operasi sudut elevasi. Sedangkan LQR digunakan untuk stabilisasi dan manuver dari *Gun Turret*. Sistem kontrol LQR pada turret berusaha menjaga sudut elevasi tetap konstan pada titik operasi yang diinginkan, walaupun menerima beberapa gangguan. Salah satu bentuk gangguan yaitu gangguan yang bersifat random (*Pertubartion random*). Berikut simulasi dari *perturbation random*:



Gambar 21. Simulasi *Perturbation Random dari Gun Turret*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

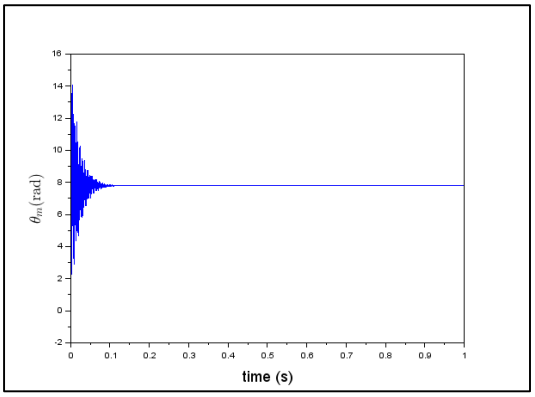
Berdasarkan gambar 21, dapat dilihat bahwa gangguan bersifat sementara *uniform* pada 0 sampai 0.1 radian. Jika dilihat dari nilai gangguan bersifat sementara tersebut, maka untuk memaksimalkan tingkat kestabilan dari *close-loop*, maka yang harus dilakukan adalah dengan nilai *Eigen* pada close-*loop* dengan bagian *real* harus memiliki nilai negatif $(R(\lambda) < 0)$.

$$A = \begin{bmatrix} -31.982317 + 25040.9668i \\ -31.982317 - 25040.968i \\ -45.553813 + 1882.3051i \\ -45.553813 - 1882.3051i \\ -0.0405409 + 0.0405446i \\ -0.0405409 - 0.0405446i \end{bmatrix}$$

Nilai Eigen dari sistem yang sudah didapat memiliki nilai *Real* yang negatif maka dapat disimpulkan bahwa tipe kestabilannya adalah stabil asimtotik.

Simulasi Stabilitas *Locking Target* Pada Gun Turret *Medium Tank* Menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR)

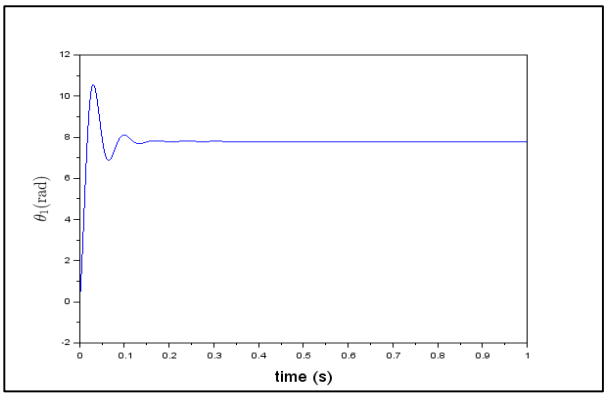
Simulasi stabilitas dalam mengontrol sudut elevasi dari 3 *degree of freedom* menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) disimulasikan dengan menggunakan *Software Python 3.6*. Berikut hasil gambar simulasi yang sudah dikontrol dengan memasukan nilai Eigen yang telah didapatkan.



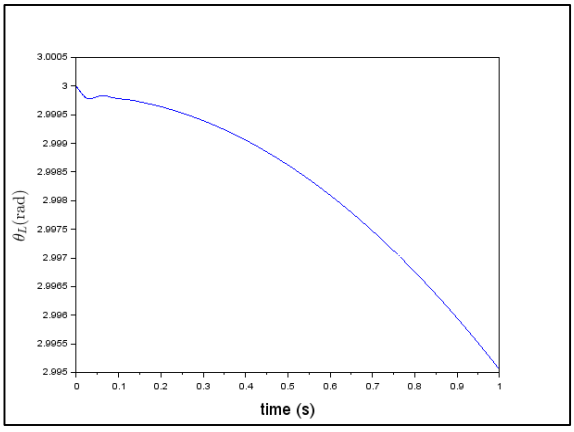
Gambar 22. Hasil Simulasi kestabilan pada Motor
Sumber: Diolah Peneliti, (2019)

Gambar 22, merupakan gambar simulasi kestabilan pada motor. Pada gambar tersebut menunjukan bahwa motor mulai berjalan pada $t = 0$, sampai pada $t$mendekati $t = 0{,}15$ dalam kondisi yang tidak stabil. Sedangkan kestabilan ditunjukan pada saat $t = 0{,}15$. Atau dapat dikatakan bahwa sistem gerak motor mengalami gangguan pada saat kecepatan motor sebesar 12 rad, maka kontrol yang telah diterapkan pada sistem akan menghilangkan gangguan dan mengembalikan kecepatan motor seperti semula pada kecepatan motor sebesar 8 rad, sehingga dapat terlihat untuk nilai t pada saat menuju tak hingga sistem akan stabil.

Gambar 23, merupakan gambar simulasi kestabilan pada pinion. Pada gambar tersebut menunjukan bahwa pinion mulai berjalan pada $t = 0$, sampai pada t mendekati $t = 0{,}1$ dalam kondisi yang tidak stabil. Sedangkan kestabilan ditunjukan pada saat $t = 0{,}15$. Dapat dikatakan bahwa sistem gerak kecepatan dari pinion akan mengalami gangguan sebesar 11 rad. Ketika kontrol telah dipasang maka sistem akan menghilangkan gangguan yang terjadi dan mengembalikan kecepatan pinion ke keadaan yang stabil, yang dapat dilihat dari nilai t yang menuju tak hingga, keadaan yang terlihat stabil pada 8 rad.



Gambar 23. Hasil Simulasi kestabilan pada Pinion
Sumber: Diolah Peneliti (2019)



Gambar 24. Hasil Simulasi kestabilan pada *Load*
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Gambar 24, merupakan gambar simulasi kestabilan pada *Load* atau *Gun*. Pada gambar tersebut menunjukan bahwa *Gun* mulai berjalan pada $t = 0$, sampai pada t mendekati $t = 0{,}05$ dalam kondisi yang tidak stabil. Sedangkan kestabilan ditunjukan pada saat $t = 0{,}05$. Dapat dikatakan bahwa sistem gerak kecepatan dari gun akan mengalami gangguan sebesar 3 rad. Ketika kontrol telah dipasang maka sistem akan menghilangkan gangguan yang terjadi dan mengembalikan kecepatan pinion ke keadaan yang stabil dan kecepatan menurun.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa sistem dinamika gerak *Gun Turret* dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Diperoleh pemodelan dan analisis matematis sistem dinamika gerak *Gun Turret MediumTank* FNSS-Pindad adalah sebagai berikut :

$$M\left[\ddot{\theta}\right] + C\left[\dot{\theta}\right] + K[\theta] = [I_d][u]$$

Dengan mendefinisikan :

$$M = \begin{pmatrix} I_m & 0 & 0 \\ 0 & I_1 + \frac{I_2}{N^2} & 0 \\ 0 & 0 & I_L \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_m & -c_m & 0 \\ -c_m & (c_m + \frac{c_L}{N^2}) & -\frac{c_L}{N} \\ 0 & -\frac{c_L}{N} & c_L \end{pmatrix}$$

$$K = \begin{pmatrix} k_m & -k_m & 0 \\ -k_m & (k_m + \frac{k_L}{N^2}) & \frac{k_L}{N} \\ 0 & -\frac{k_L}{N} & k_L \end{pmatrix}$$

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_m \\ \theta_1 \\ \theta_L \end{pmatrix}$$

$$I_d = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

2. Sistem dinamik gerak dari *Gun Turret* yang telah menggunakan sistem kontrol *Liniear quadratic Regulator* (LQR) seperti *motor, pinion*, dan *load/gun* menunjukan sistem stabil asimtotik dan konvergen untuk menuju titik setimbangnya.
3. Metode sistem kontrol optimal menggunakan LQR dapat mempercepat kestabilan suatu sistem gerak dinamik saat melakukan operasi sudut elevasi dan meminimalisasi gangguan yang terjadi pada suatu sistem.

Implikasi

1. Penelitian ini dapat diimplementasikan sebagai

rekomendasi kepada pihak praktisi industri pertahanan sebagai panduan dalam pengembangan sistem kontrol *Gun Turret* pada *medium tank* sebagai konversi *Gun Turret* dari manual menuju sistem automatis.

2. Cara untuk memanfaatkan dari penelitian ini adalah dengan cara pemodelan matematika yang telah terbentuk dapat digunakan untuk menyusun sistem kontrol LQR dengan menggunakan data yang lebih *real* dengan aslinya

Saran

Pemerintah:

1. Pengembangan teknologi pertahanan khususnya mengenai pengayaan dan kontribusi mengenai senjata pada tank seperti *Gun Turret* seharusnya dapat didukung penuh, sebagai bentuk kritis teknologi.

***User* / Pengguna:**

1. Adanya keterbukaan dengan berbagai sistem senjata yang terbaru.

Industri:

1. Terus melakukan pengembangan sebagai bentuk kritis dengan teknologi pertahanan khususnya dalam konversi *Gun Turret* manual menjadi otomatis yang dapat digunakan untuk pengurangan jumlah korban.

Peneliti Selanjutnya:

1. Dalam pembentukan model gerak dinamis pada turret peneliti menggunakan pendekatan model 3D, bagi peneliti lain yang ingin mengembangkan tesis ini dapat menggunakan pendekatan-pendekatan lain seperti eksperimental sehingga dapat mengkontruksi model gerak dinamis dari tank terlihat lebih real.
2. Dalam pembentukan sistem kontrol dapat dikembangan lagi pada sistem kontrol azimuthnya.
3. Dalam pembentukan sistem kontrol bisa dikembangkan lagi menjadi pada saat target atau sasaran bergerak, atau tanknya dalam keadaan bergerak.
4. Membandingkan metode *Liniear quadratic Regulator* (LQR) dengan menggunakan metode sistem kontrol yang lain seperti *Porpotional, Integral dan Derivatif (PID),* sistem kontrol menggunakan metode *Fuzzy* dan lain sebagainya.

Daftar Pustaka

Astrom, Karl Johan & Murray, Ricard M,. 2008. *Feedback System: An Introduction for Scientist and*

Engineers. ISBN-13: 978-0-691-13576-2. New Jersey: Princeton University Press.

Fernaza. Olivia. 2016. *Studi Metoda Kendali Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Aplikasinya pada Sistem Automatic Voltage Regulator (AVR)*. Terdapat pada http://repo.unand.ac.id/3127/. Diakses pada tanggal 17 Juni 2019.

Gomes Marcio D.S & Ferreira Armando Morado. 2005. *Gun-Turret Modelling and Control*. ABCM Sysmposium Series In Mechatronics- Vol.2-pp.60-67. Tersedia di http://abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol2/Section_I_Advanced_Control_Systems/SSM2_I_08.pdf. Diakses pada tanggal 17 Juli 2018Ru.

Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. 2014. *Peraturan Mentri Pertahanan Republik* Indonesia *Nomor 12 Tahun 2014 tentang Pembinaan MAteriil Peetahanan Negara di Lingkungan* Kementerian *Pertahanan dan Tentara Nasional Indonesia.* Tersedia di https://www.kemhan.go.id/kuathan/wp-content/uploads/2017/02/Peraturan-Menteri-Pertahanan-Nomor-12-Tahun-2014-tentang-Pokok-Pokok-Pembinaan-Materiil-Pertahanan-Negara-di-lingkungan-Kementerian-Pertahanan-dan-Tentara-Nasional-Indonesia.pdf. Diakses pada tanggal 23 Juli 2018.

Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. 2015. *Postur Pertahanan Negara*. ISBN 978-979-8878-03-9. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia.

Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. 2015. *Buku Putih Pertahanan* Indonesia. ISBN 978-979-8878-04-6. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia.

Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. 2015. *Doktrin Pertahanan Negara.* Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia.

Yuliyanto. Toni et al. 2012. *Aplikasi Metode LQR Pada Kendali Attitude Rotor Spacecraft Yang Berada di Sumbu Tetap*. Terdapat di http://digilib.its.ac.id/public/ITS-paper-26608-1208100070-Paper.pdf. Diakses pada tanggal 1 Mei 2019.