



**UNIVERSITAS PERTAHANAN INDONESIA**

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

**PUTRI HERDIYANA WULANUARI  
120170404005**

Tesis yang Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam  
Mendapatkan Gelar Magister Pertahanan

**FAKULTAS TEKNOLOGI PERTAHANAN  
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI DAYA GERAK**

**BOGOR  
2019**



**UNIVERSITAS PERTAHANAN INDONESIA**

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

**PUTRI HERDIYANA WULANUARI  
120170404005**

Tesis yang Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam  
Mendapatkan Gelar Magister Pertahanan

**FAKULTAS TEKNOLOGI PERTAHANAN  
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI DAYA GERAK**

**BOGOR  
2019**

## LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

Nama : Putri Herdiyana Wulanuari  
NIM : 120170404005  
Program Studi : Teknologi Daya Gerak  
Fakultas : Teknologi Pertahanan  
Judul Tesis : Perancangan Sistem Kendali *Gun Turret* Pada *Medium Tank*

Pembimbing I,



Dr. Ir. Edy Saptono, M.M

Kolonel Czi NRP 33670

Tanggal: 30-9-2019

Pembimbing II,



Triwanto Simanjuntak, Ph.D

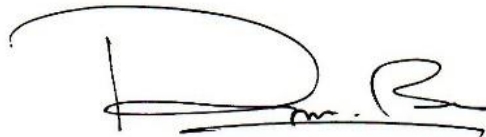
NIDN 0430068004

Tanggal: 28/09/2019

Mengetahui,

Dekan

Fakultas Teknik Pertahanan


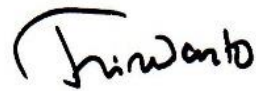




Romie Oktavianus Bura, B.Eng. (Hons)., MRAeS., Ph.D

Penata Tingkat 1 III/d NIP 19731006200641001

Tanggal: 30-9-2019

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

<p>Nama : Putri Herdiyana Wulanuari          NIM : 120170404005          Program Studi : Teknologi Daya Gerak          Fakultas : Teknologi Pertahanan          Judul Tesis : Perancangan Sistem Kendali <i>Gun Turret</i> Pada <i>Medium Tank</i></p>			
No.	Nama	Tanda Tangan	Tanggal
1.	Pembimbing I:  Dr. Ir. Edi Saptono, M.M Kolonel Czi NRP 33670s		30.9/2019 <small>...../...../2019</small>
2.	Pembimbing II:  Triwanto Simanjuntak, Ph.D NIDN 0430068004		28.10/2019 <small>...../...../2019</small>
3.	<i>Reviewer I:</i>  Dr. Jupriyanto, S.T., M.T NIDK 8889250017		3.10/2019 <small>...../...../2019</small>
4.	<i>Reviewer II</i>  Dr. Ir. Rudy A.G. Gultom, M.Sc Kolonel Sus NRP. 520726		30.10/2019 <small>...../...../2019</small>
5.	<i>Reviewer III:</i>  Drs. Khaerudin, MM Kolonel Sus NRP.520732		3.10/2019 <small>...../...../2019</small>

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini tidak terdapat karya atau bagian karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan jenjang apapun di suatu Perguruan Tinggi dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat istilah, frasa, kalimat, paragraf, sub bab, atau bab dari karya yang pernah ditulis atau diterbitkan; kecuali yang secara tertulis diajukan dalam naskah ini dan disebutkan dalam Daftar Referensi.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa terdapat plagiat dalam tesis ini, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan peraturan dan undang-undang yang berlaku.

Rogor, September 2019



( Putri Herdiyana Wulanuari )

## KATA PENGANTAR

Puji syukur peneliti panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulisan tesis dengan judul: “Perancangan Sistem Kendali *Gun Turret* Pada *Medium Tank*” dapat diselesaikan.

Penyusunan tesis ini ditujukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Magister pada Program Studi Teknologi Daya Gerak Fakultas Teknologi Pertahanan Universitas Pertahanan.

Penyusunan tesis dapat diselesaikan berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu, pada kesempatan ini peneliti mengucapkan terima kasih kepada:

1. Letjen TNI (Purn) Dr.I Wayan Midhio, M.Phil, Letjen TNI Dr. Yoedhi Swastanto, M.B.A, Letjen TNI Dr. Tri Legionosuko, SIP, MAP selaku Rektor selama saya menempuh pendidikan di Universitas Pertahanan yang telah memberikan kesempatan untuk menempuh studi di Universitas Pertahanan.
2. Dr. Romie Oktovianus Bura, B.Eng (Hons.), MRAes., Dekan Fakultas Teknologi Pertahanan.
3. Kol. Kes. Dr. Sovian Aritonang, S.Si., M.Si., Sesprodi Teknologi Daya Gerak yang selalu memberikan bimbingan dan semangat dalam penyusunan tesis ini.
4. Kol. Czi. Dr. Ir. Edy Saptono, M.M, Pembimbing I yang telah mengarahkan, memberikan dorongan, bimbingan, dan semangat penulis dalam menyusun tesis ini.
5. Triwanto Simanjuntak, B.Eng., M.Eng., Ph.D., Pembimbing II yang telah mengarahkan, mengarahkan, memberikan dorongan, bimbingan, dan semangat penulis dalam menyusun Tesis ini.

6. Segenap dosen-dosen Universitas Pertahanan, terutama jajaran dosen Fakultas Teknologi Pertahanan yang memberikan waktunya untuk mengajar dan membimbing penulisan.
7. Segenap PT.Pindad, khususnya Bapak Hery Moctadi dan Bapak Windhu Paramarta yang memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian.
8. Letkol Arm. Herman. S. Sos dan Letkol Arm. Tejo Basuki, S.T yang mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian di Dislibang Angkatan Darat.
9. Sertu Johan Wicaksana, S.T yang telah memberikan kesempatan penulis untuk melakukan pengambilan data di Pussenkav.
10. Kepada Papah, dan Mamah yang selalu memberikan dukungan, semangat, mendoakan putrinya agar selalu mendapatkan ridho dan keberkahan dari Allah SWT.
11. Adikku yang selalu memberikan bantuan dan dukungan, serta mendoakan kakaknya agar selalu diberi kemudahan oleh Allah SWT.
12. Seluruh Mahasiswa Teknologi Daya Gerak Cohort 1 yang terus memberikan semangat dan dorongan dalam mengingatkan berbagai hal.
13. Sugeng Heru Prayogo yang selalu memberikan support, semangat, keikhlasan dan kebebasan mengembangkan diri untuk meraih mimpiku.
14. Semua rakyat Indonesia yang patuh membayar pajak, sehingga penulis diberi kesempatan untuk melanjutkan studi melalui Beasiswa, semoga selalau diberi keberkahan dari Allah SWT.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan-kebaikan berbagai pihak atas bantuannya.

Peneliti menyadari bahwa tesis ini masih kurang sempurna, oleh karena itu dengan kerendahan hati mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif demi kesempurnaan tesis ini.

Akhirnya, semoga tesis ini dapat memberikan manfaat terhadap pengembangan pengembangan ilmu pertahanan dan bermanfaat bagi *stakeholder* terkait dalam upaya pengembangan teknologi.

Bogor, 30 September 2019

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Putri Herdiyana Wulanuari', written in a cursive style.

Putri Herdiyana Wulanuari

## ABSTRAK

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

Putri Herdiyana Wulanuari

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 dikembangkan 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 Medium Tank* FNSS-Pindad yaitu  $M[\ddot{\theta}] + C[\dot{\theta}] + K[\theta] = [I_a][u]$ . Kedua, sistem dinamik gerak dari *Gun Turret* yang telah menggunakan sistem kontrol *Linier Quadratic Regulator* (LQR) menunjukkan 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*

## ABSTRACT

### DESIGN OF GUN TURRET CONTROL SYSTEM IN MEDIUM TANK

Putri Herdiyana Wulanuari

*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 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*

## DAFTAR ISI

SAMPUL DEPAN.....	I
HALAMAN JUDUL.....	II
LEMBAR PERSETUJUAN TESIS.....	III
LEMBAR PENGESAHAN TESIS.....	IV
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	V
KATA PENGANTAR.....	VI
ABSTRAK.....	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR.....	XIII
DAFTAR TABEL.....	XV
DAFTAR LAMPIRAN.....	XVI
DAFTAR SINGKATAN.....	XVII
DAFTAR SIMBOL.....	XVIII
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	5
1.3 Pembatasan Masalah.....	5
1.4 Rumusan Masalah.....	6
1.5 Tujuan Penelitian.....	6
1.6 Manfaat Penelitian.....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Landasan Teori.....	9
2.2 Hasil Penelitian Terdahulu.....	28
2.3 Kerangka Berpikir.....	37
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	39
3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian.....	39
3.2 Sumber Data.....	42
3.3 Pendekatan Penelitian.....	42
3.4 Alur Penelitian.....	43

3.5	Alat Penelitian .....	46
3.6	Teknik Analisa Data .....	47
3.7	Teknik Pengolahan Data .....	45
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....		48
4.1	Deskripsi Data.....	48
4.1.1	Pemodelan 3D model <i>Medium Tank FNSS Pindad</i> .....	46
4.1.2	Komponen-komponen Tank.....	57
4.2	Pembahasan .....	58
4.2.1	Pemodelan Matematis Sistem Dinamika gerak <i>Gun Turret</i> .....	58
4.2.2	<i>Linier Quadratic Regulator</i> (LQR) Untuk Menentukan Sudut Elevasi Pada <i>Gun Turret</i> .....	78
4.2.3	Stabilitas <i>Locking Target</i> Pada <i>Gun Turret Medium Tank</i> Menggunakan <i>Linier Quadratic Regulator</i> (LQR) .....	81
BAB 5 KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN.....		84
5.1	Kesimpulan .....	84
5.2	Implikasi.....	85
5.3	Saran .....	85
DAFTAR PUSTAKA.....		87
DAFTAR LAMPIRAN .....		92
RIWAYAT HIDUP PENELITI .....		110

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 105 mm Modern Medium Weight Tank (MMWT).....	2
Gambar 1.2 Konsep <i>Remote Control Weapon System</i> .....	3
Gambar 2.1 Sistem <i>Gun Turret</i> .....	17
Gambar 2.2 Sistem <i>Locking target Gun Turret</i> .....	18
Gambar 2.3 Diagram Blok Kontrol Optimal .....	23
Gambar 2.4 FNSS <i>Medium Calibar One Man Turret SABER</i> .....	26
Gambar 2.5 Komponen <i>Turret Leopard 2A4 ID</i> .....	27
Gambar 2.6 Diagram Kerangka Pikir .....	38
Gambar 3.1 Alur Penelitian.....	43
Gambar 3.2 Diagram Alir perancangan sistem kendali .....	45
Gambar 4.1 FNSS <i>Medium Tank Pindad-Turki Computer model</i> .....	49
Gambar 4.2 Tampak <i>Depan FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	49
Gambar 4.3 Tampak Samping <i>FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	49
Gambar 4.4 Tampak Atas <i>FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	50
Gambar 4.5 <i>Gun Turret FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	50
Gambar 4.6 Tampak Atas <i>Gun Turret FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	51
Gambar 4.7 Tampak Depan <i>Gun Turret FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	51
Gambar 4.8 Tampak Samping <i>Gun Turret FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	51
Gambar 4.9 Komponen <i>FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer Model</i> .....	57

Gambar 4.10 <i>Free Body Diagram FNSS Medium Tank Pindad-Turki</i>	
<i>Computer Model</i> .....	59
Gambar 4.11 Skematik <i>suspension Tank</i> .....	59
Gambar 4.12 <i>Gun Turret FNSS Medium Tank Pindad-Turki Computer</i>	
<i>Model</i> .....	60
Gambar 4.13 Skematik <i>Gun Turret FNSS Medium Tank Pindad-Turki</i>	
<i>Computer Model</i> .....	61
Gambar 4.14 Model <i>Elevasi Turret</i> .....	61
Gambar 4.15 <i>Load Speed vs Time (Low Frequency Excitation)</i> .....	75
Gambar 4.16 <i>Load Speed vs Time (High Frequency Excitation)</i> .....	76
Gambar 4.17 <i>Bode Plot (Input Motor Torque, output motor speed)</i> .....	76
Gambar 4.18 <i>Bode Plot (Input Motor Torque, output pinion speed)</i> .....	77
Gambar 4.19 <i>Bode Plot (Input Motor Torque, output Load speed)</i> .....	77
Gambar 4.20 Ilustrasi <i>Pergerakan Sumbu Elevasi Turret</i> .....	78
Gambar 4.21 Diagram Blok kontrol <i>LQR pada Turret</i> .....	79
Gambar 4.22 Simulasi <i>Perturbation Random</i> dari <i>Gun Turret</i> .....	80
Gambar 4.23 Hasil Simulasi kestabilan pada <i>Motor</i> .....	81
Gambar 4.24 Hasil Simulasi kestabilan pada <i>Pinion</i> .....	82
Gambar 4.25 Hasil Simulasi kestabilan pada <i>Load</i> .....	83

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Arah Penelitian dan Pengembangan Teknologi pertahanan dan Keamanan hingga Tahun 2025 .....	13
Tabel 2.2 Daftar Penelitian Terdahulu.....	30
Tabel 3.1 Waktu Penelitian .....	40
Tabel 4.1 Spesifikasi Tank dalam Model 3D .....	52
Tabel 4.2 Spesifikasi Gun Turret dalam Model 3D .....	52
Tabel 4.3 Inertia Properties Komponen Gun Turret.....	54
Tabel 4.4 Kelengkapan Komponen Gun Turret .....	56
Tabel 4.1 Spesifikasi Tank dalam Model 3D .....	55
Tabel 4.5 Parameter Gun Turret .....	72

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Keterangan Penelitian Dari Universitas Pertahanan ....	93
Lampiran 2 Surat Keterangan Penelitian Dari Pindad .....	94
Lampiran 3 Surat Keterangan Penelitian Dari Dislitbang AD.....	95
Lampiran 4 <i>3 d.o.f Load Speed vs Time (High Frequency Excitation)</i> .....	96
Lampiran 5 <i>3 d.o.f Load Speed vs Time (Low Frequency Excitation)</i> .....	97
Lampiran 6 <i>Bode Plot (Input Motor Torque, output Load speed)</i> .....	98
Lampiran 7 Sistem kontrol LQR .....	100
Lampiran 8 Tank FNSS Pindad .....	102
Lampiran 9 <i>Motor</i> .....	103
Lampiran 10 <i>Gear</i> .....	104
Lampiran 11 <i>Pinion</i> .....	105
Lampiran 12 <i>Load/Gun</i> .....	106
Lampiran 13 Model Elevasi Turret .....	107
Lampiran 14 <i>Shaft Motor</i> .....	108
Lampiran 15 Dokumentasi .....	109

## DAFTAR SINGKATAN

AD	: Angkatan Darat
Alutsista	: Alat Utama Sistem Senjata
BMS	: <i>Battlefield Management System</i>
MBT	: <i>Main Battle Tank</i>
ODE	: <i>Ordinary Differential Equations</i>
LQR	: <i>Linier Quadratic Regulator</i>
RCWS	: <i>Remote Control Weapon System</i>
SMB	: Senapan Mesin Besar
SMS	: Senapan Mesin Sedang
TNI	: Tentara Nasional Indonesia

## DAFTAR SIMBOL

$C_L$	: <i>Load side viscous damping coefficient</i>
$C_m$	: <i>Motor side viscous damping coefficient</i>
$I_1$	: <i>Inersia motor pinion</i>
$I_2$	: <i>Inersia sector gear</i>
$I_L$	: <i>Inersia beban</i>
$I_d$	: <i>Matriks identitas</i>
$I_m$	: <i>Inersia motor</i>
$K_L$	: <i>Load side torsional stiffness</i>
$K_m$	: <i>Motor side torsional stiffness</i>
$M^{-1}$	: <i>Invers matriks massa</i>
$Q_k$	: <i>Koordinat umum</i>
$\theta_1$	: <i>Kecepatan posisi dari pinion gear</i>
$\theta_2$	: <i>Kecepatan posisi dari sector gear</i>
$\theta_L$	: <i>Kecepatan posisi dari beban</i>
$\theta_m$	: <i>Kecepatan posisi dari motor shaft</i>
$C$	: <i>Matriks damping</i>
$D$	: <i>Energi disipasi</i>
$G$	: <i>Modulus of rigidity</i>
$K$	: <i>Matriks stiffness</i>
$M$	: <i>Matriks massa</i>
$T$	: <i>Energi kinetik</i>
$U$	: <i>Energi potensial</i>

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

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.

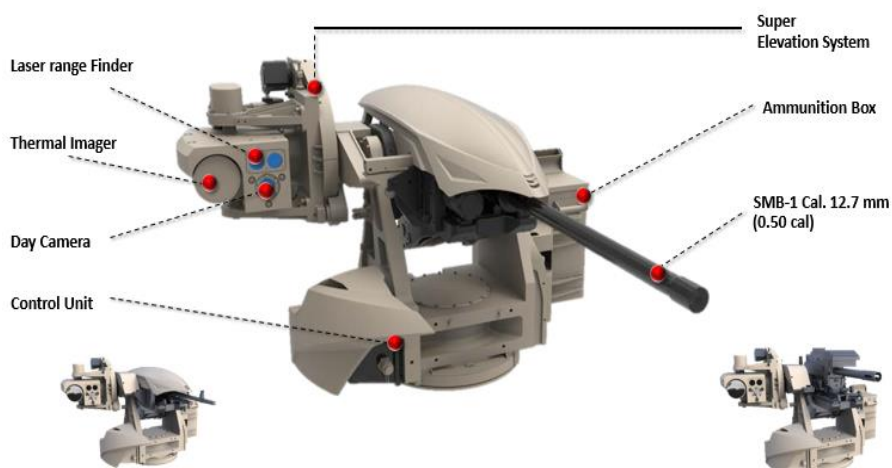
Salah satu bidang pertahanan yang dapat mengoptimalkan pertahanan Indonesia adalah Alat Utama Sistem Persenjataan (Alutsista). Alutsista masuk dalam agenda utama pembinaan pertahanan Indonesia, hal tersebut dikarenakan terkait dengan adanya tujuan prioritas penyempurnaan Alutsista Tentara Nasional Indonesia (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 sukses 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 Kementerian 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 1.2. 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 1.1 didukung dengan berbagai kecanggihan sarana dan prasarananya.



**Gambar 1.1 105 mm *Modern Medium Weight Tank* (MMWT)**

Sumber : Kumludere, Oğulbey Mahallesi (2016)



**Gambar 1.2 Konsep *Remote Control Weapon System***

Sumber : PT.Pindad (2018)

Bentuk pengembangan modernisasi dari kecanggihan pada kendaraan tank yang sedang dikembangkan adalah *Gun Turret*. *Gun Turret* 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  $360^{\circ}$  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 penggerak listrik menyediakan platform khusus operasi

yang lancar menggunakan bantuan sistem kontrol pada senjata, sehingga akan menghasilkan penembak dengan kemampuan dan mendapatkan probabilitas yang sangat tinggi 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 strategis 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 dikembangkan 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 *Linear 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 *Linear Quadratic Regulator* (LQR) memiliki kemampuan yang dapat mengatasi berbagai gangguan besar yang terjadi pada sistem kestabilan tanpa harus mengurangi performansi kinerja sistem.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut:

- 1.2.1 Tank di Indonesia masih konvensional sehingga kemandirian penggunaan *automatic control* belum ada dan Indonesia perlu menguasai teknologi kontrol *Gun Turret*.
- 1.2.2 Merumuskan persamaan gerak dari sistem dinamika dari *Gun Turret*. Pemodelan dan analisis sistem kendali dari *Gun Turret* merupakan komponen vital dalam merancang sistem kendali gerak dari *Gun Turret*
- 1.2.3 Ukuran peluru menjadi faktor yang mempengaruhi dimensi dan inersia dari laras *canon*
- 1.2.4 Sistem Kendali dapat diterapkan pada dua sudut yaitu elevasi dan azimuth.
- 1.2.5 kendaraan tempur militer modern menggunakan sistem penggerak dengan listrik untuk mengoperasikan *turret* dalam menentukan sumbu azimuth dan elevasinya
- 1.2.6 Mobilitas *Gun Turret* dalam ruang terbatas oleh volumenya
- 1.2.7 Merancang sistem kontrol otomatis menggunakan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk pengontrol *Gun Turret* untuk *Locking target*.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah diuraikan di atas, dapat menggambarkan bahwa permodelan dan analisis sistem kendali *Gun Turret Medium Tank* merupakan permasalahan yang kompleks dengan banyaknya faktor yang dapat mempengaruhi gerak *Gun Turret* tersebut. Oleh sebab itu, permasalahan pada penelitian ini dibatasi pada:

- 1.3.1 Penelitian ini hanya menggunakan satu model *Gun Turret* saja pada *Medium Tank*.
- 1.3.2 Pengendalian hanya dilakukan ketika posisi *Gun Turret* untuk *Locking target* pada medan bidang datar dengan target diasumsikan memiliki posisi statis.
- 1.3.3 Sistem kontrol menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR)
- 1.3.4 *Locking target* didefinisikan ketika *Gun Turret* dan target tetap berada dalam garis lurus yang sama.
- 1.3.5 Sistem kontrol yang didesain tidak memperhitungkan *time-delay* dan *disturbance*.
- 1.3.6 Tank yang digunakan adalah model *Medium Tank* FNSS Pindad yang dimodelkan sendiri dalam 3D CAD, dengan menggunakan beberapa asumsi karena keterbatasan informasi mengenai data *Medium Tank* FNSS Pindad.
- 1.3.7 Sistem kendali hanya diterapkan pada sudut elevasi *Gun Turret*, sedangkan sudut azimuth dapat dikembangkan pada penelitian selanjutnya dengan menggunakan prinsip yang sama digunakan pada saat menentukan sudut elevasi atau sedang dikembangkan pada tesis ini.

### 1.4 Rumusan Masalah

Mengacu pada batasan permasalahan, maka permasalahan penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

- 1.4.1 Bagaimana pemodelan matematis sistem dinamika gerak dari *Gun Turret*?

- 1.4.2 Bagaimana menerapkan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) untuk mengontrol sudut elevasi pada *Gun Turret*?
- 1.4.3 Bagaimana stabilitas *Locking target* pada *Gun Turret Medium Tank* menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR)?

### 1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1.5.1 Menganalisis dan memodelkan matematis sistem dinamika gerak dari *Gun Turret*.
- 1.5.2 Menerapkan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) sebagai sistem kontrol dalam menentukan sudut elevasi *Gun Turret*.
- 1.5.3 Menganalisis stabilitas *locking target* pada *Gun Turret Medium Tank* menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR).

### 1.6 Manfaat Penelitian

#### 1.6.1 Manfaat Teoritik

Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi, pengayaan dan kontribusi yang besar bagi perkembangan ilmu pengetahuan dalam bidang Teknologi Pertahanan khususnya mengenai pemodelan sistem kendali pada kendaraan khusus yaitu pada *Gun Turret*. Artinya, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dan hasil analisis sistem kendali pada *Gun Turret*.

#### 1.6.2 Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi kepentingan praktis terhadap pihak-pihak yang terkait dengan industri pertahanan, antara lain:

- 1.6.2.1 Sebagai panduan atau rekomendasi bagi para praktisi di industri pertahanan dalam melakukan konversi *Gun Turret* dari manual menjadi otomatis.

- 1.6.2.2 Menjadi panduan bagi pengembangan sistem kendali Gun-turret *Medium Tank* milik PT.Pindad.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

##### **2.1.1 Pertahanan**

Pertahanan merupakan sebuah kondisi, situasi atau objek yang secara nyata untuk menentukan kedaulatan dan keselamatan sebuah bangsa dan negara (Tippe. Syarifuddin, 2016). Pertahanan negara adalah segala upaya dalam rangka untuk mempertahankan kedaulatan rakyat, keutuhan wilayah, dan keselamatan segenap bangsa dari berbagai ancaman dan gangguan terhadap keutuhan bangsa dan negara. Esensi dari pertahanan negara dapat menjadi penuntun bagi setiap warga negara dalam memahami pertahanan semesta yang meliputi tujuan nasional bangsa Indonesia, kepentingan nasional, prinsip dasar penyelenggaraan negara, fungsi pertahanan negara dan hakikat pertahanan negara. Tanggung jawab dan kewajiban setiap warga negara Indonesia dalam mempertahankan negara diselenggarakan melalui fungsi pemerintah (Kementerian Pertahanan Republik Indonesia, 2015). Hal ini sudah tercantum dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2002 tentang Pertahanan negara yaitu suatu sistem yang melibatkan seluruh warga negara, wilayah, dan segenap sumber daya nasional yang telah dipersiapkan secara dini oleh pemerintah dan dilaksanakan secara total atau menyeluruh, terpadu, terarah dan berkelanjutan.

Kesemestaan yang dalam pertahanan negara memiliki makna yang melibatkan seluruh rakyat dan sumber daya nasional, sarana dan prasarana nasional, serta seluruh wilayah negara sebagai satu kesatuan pertahanan negara yang berbentuk utuh dan terintegrasi. Undang-undang yang mengatur sistem pertahanan dan keamanan rakyat semesta, diatur dalam UUD Negara Republik Indonesia tahun 1945 Pasal 30 Ayat (2). Dalam Undang-Undang tersebut dibahas

mengenai pertahanan dan keamanan negara dilaksanakan oleh Tentara Nasional Indonesia sebagai Komponen utama dan rakyat atau seluruh warga negara sebagai komponen pendukung.

Upaya mewujudkan dan mempertahankan dicantumkan dalam Kementrian Pertahanan Republik Indonesia (2015), bahwa seluruh wilayah NKRI sebagai suatu kesatuan pertahanan terdapat dalam fungsi perintahan negara yaitu sebagai suatu kesatuan pertahanan yang mampu melindungi kedaulatan negara, keutuhan wilayah, serta keselamatan bangsa dari ancaman yang bersifat nasional (dalam negeri) maupun internasional (luar negeri). Pertahanan negara terbagi menjadi dua yaitu pertahanan nir-militer dan perintahan militer. Pertahanan nirmiliter adalah pertahanan berdimensi politik, ekonomi, sosial dan budaya, sedangkan pertahanan militer berbasis Alutsista yang dikembangkan dengan kekuatan 3 matra terpadu yaitu Angkatan Udara, Angkatan Laut, dan Angkatan Darat. Pertahanan militer dalam Undang-undang Republik Indonesia nomor 34 Tahun 2004 Pasal 6 tentang Tentara Nasional Indonesia, dijelaskan bahwa TNI merupakan garda utama untuk melindungi negara. Oleh karena itu, TNI dapat dikatakan sebagai alat pertahanan negara berfungsi sebagai alat untuk penangkal segala bentuk ancaman militer dan berbagai ancaman senjata baik dari dalam ataupun luar negeri dan bertindak juga sebagai pemulih pada setiap kondisi keamanan negara yang terganggu akibat terjadinya sebuah kekacauan.

Salah satu faktor penting dalam membangun kekuatan dan kemampuan pertahanan adalah dengan memberdayakan industri pertahanan yang dilaksanakan melalui pemanfaatan produk alphanakam. Hal ini dilakukan sebagai langkah pengembangan kekuatan persenjataan sesuai kebutuhan yang memadai. Oleh karena itu dibutuhkan juga kemajuan iptek dapat dimanfaatkan untuk pembangunan industri pertahanan. Hal ini sesuai dengan Undang-undang Republik Indonesia nomor 16 tahun 2012 tentang Industri

Pertahanan Pasal 4, yang menyatakan bahwa penyelenggaraan industri pertahanan berfungsi sebagai wadah untuk mengembangkan teknologi yang memiliki manfaat bagi pertahanan, keamanan, dan kepentingan rakyat, serta menjadikan kemandirian dalam sistem pertahanan dan keamanan negara.

**a. Konsep Ilmu Pertahanan**

Ilmu pertahanan merupakan suatu objek yang mencerminkan perilaku negara dalam menjaga dan mengembangkan kelanjutan dari negara yang bersangkutan. Selain itu Tippe (2016) mengemukakan bahwa ilmu pertahanan merupakan segala aspek atau bidang yang berhubungan dengan keamanan secara nasional serta melekat dengan tujuan penyelenggaraan pertahanan negara. Ilmu pertahanan pada dasarnya adalah membahas mengenai strategi dan ilmu militer, penggunaan sarana dari angkatan bersenjata dalam memperjuangkan dan mempertahankan kepentingan politik dari suatu negara ataupun ilmu perang dan seni peperangan. Akan tetapi ilmu pertahanan itu merupakan suatu ilmu yang mempelajari bagaimana untuk pengelolaan sumber daya an kekuatan nasional ketika masa damai, perang dan pasca perang yang berupa ancaman militer, ancaman non militer yang mengancam keutuhan wilayah, kedaulatan negara dan keselamatan jiwa bangsa dalam mewujudkan keamanan nasional (Supriyatno. Makmur, 2014).

Oleh karena itu, ilmu pertahanan akan membahas berbagai hal yang berkaitan dengan manajemen sumber daya nasional pada masa perang dan damai. Selain itu, juga mempelajari dan mengkaji secara mendalam mengenai bagaimana membuat dan mengimplementasikan kebijakan pertahanan menjadi sebuah strategi pertahanan, atau menjadi kampanye dan operasi militer serta untuk menjadi pengerahan seluruh sumber daya kekuatan nasional. Terlihat dari ilmu pertahanan tercipta karena adanya

ncaman yang datang dari suatu negara atau organisasi tertentu kepada eksistensinya sebuah negara, kedaulatan territorial dan keselamatan bangsanya. Dapat dikatakan pula bahwa ilmu pertahanan sebagai ilmu terapan. Menurut Supriyatno (2014) hal tersebut dikarenakan ilmu pertahanan dapat menerapkan ilmu psikologi untuk perang psikologi, hokum dalam hokum peperangan, terlihat juga sebagai ilmu teknologi dalam pembuatan Alutsista.

Ilmu pertahanan dapat menggabungkan berbagai disiplin ilmu atau bisa dikatakan sebagai multidisiplin baik dari sejarah, ekonomi, politik, antropologi, kedokteran, seni, bahasa, sosiologi, teknologi dan lain sebagainya. Teknologi dalam ilmu pertahan yaitu tentang bagaimana merancang, membuat dan mengimplementasikan Alutsista yang digunakan dalam ilmu pertahanan untuk mempertahankan sebuah negara.

#### **b. Teknologi Pertahanan**

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di dunia semakin cepat. Dan perkembangan yang terjadi tersebut akan berpengaruh terhadap lingkungan startegis nasional. Ilmu pengetahuan dan teknologi merupakan bagian terpenting dari sebuah dasar dalam *knowledge based society*. Hal tersebut juga terdapat dalam Kementrian Pertahanan Republik Indonesia (2006) dikarenakan iptek menjadi sebuah unsur tolak ukur dalam kemajuan peradaban manusia.

Dengan mempertimbangkan dan mengantisipasi perubahan lingkungan startegis yang dinamis, diperlukan sebuah modal dasar untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas dalam penelitian dan pengembangan teknologi pertahanan dan keamanan yang meliputi potensi sumber daya manusia dan alam, kebutuhan dan penggunaan produk dalam negeri, dan kemampuan dunia usaha. Ketergantungan kepada peralatan yang disediakan oleh negara lain dapat dikurangi dengan penguasaan dan penguatan terhadap

teknologi. Penguatan dapat dilakukan dengan cara memberikan ruang bagi penelitian dan pengembangan, perguruan tinggi, dan industri menjadi sebuah unsur terpenting dalam mendukung menuju kemandirian industri pertahanan.

Industri pertahanan memiliki peran yang cukup strategis dalam berperan terhadap pengembangan teknologi pertahanan dan keamanan nasional. Dalam pelaksanaan pengembangan teknologi pertahanan teknologi dan keamanan diperlukan adanya kemitraan yang sinergis antara pengguna teknologi, lembaga penelitian dan pengembangan, perguruan tinggi dan industri dan pemerintah. Kemitraan sinergis tersebut tentu akan mendorong percepatan untuk menuju kemandirian nasional dalam bidang dan pengembangan teknologi pertahanan dan keamanan.

Arah penelitian dan pengembangan teknologi pertahanan dan keamanan dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian yaitu kelompok daya gerak, daya gempur dan Komando, Kendali, Komunikasi, Komputer, dan Informasi (K4I), perlengkapan, peralatan dan perlengkapan khusus. Rencana dalam pengembangan teknologi pertahanan yaitu meliputi penguasaan teknologi rancang bangun, dan rekayasa teknologi.

**Tabel 2.1 Arah Penelitian dan Pengembangan Teknologi pertahanan dan Keamanan hingga Tahun 2025**

No	Kebutuhan Peralatan Pertahanan dan Keamanan	Rencana Agenda Pengembangan	Teknologi terkait Yang Harus dikuasai
<b>A</b>	<b>Daya Gerak</b>		
1	Alat Transportasi Darat	Rancang bangun dan rekayasa kendaraan ranmim, kendaraan taktis dan kendaraan tempur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi Otomotif</li> <li>• Teknologi Material</li> </ul>
2	Alat Transportasi Laut ( <i>surface/ sub-surfaces</i> )	Rancang bangun dan rekayasa kapal <i>corvette</i> ,	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi Propulsi</li> <li>• Teknologi Navigasi</li> </ul>

		kapal LCU, tank amfibi dan kapal selam mini	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi Instrumen</li> <li>• Teknologi kontrol</li> </ul>
3	Alat Transportasi Udara	Rancanag bangun dan rekayasa pesawat terbang tanpa awak (PUNA), pesawat latih, pesawat angkut, dan pesawat tempur ringan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi kontrol jarak jauh</li> <li>• Teknologi Telemetry</li> </ul>
<b>B</b>	<b>Daya Gempur</b>		
1	Senjata	Rancang bangun dan rekayasa meriam, stabilisator meriam kapal dan sistem PSU.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi material logam</li> <li>• Teknologi manufaktur presisi</li> </ul>
2	Munisi Kaliber Besar dan Bahan Peledak	Rancang bangun dan rekayasa munisi besar, produksi propellan, ranjau laut pintar, <i>smart bomb</i> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi bahan baku peledak dan pendorong</li> <li>• Teknologi material</li> </ul>
3	Roket dan Peluru Kendali	Rancang bangun dan rekayasa kendali sistem roket	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknogi Motor roket</li> <li>• Teknologi Kendali</li> <li>• Teknologi Material</li> </ul>
<b>C</b>	<b>K4I</b>		
1	Alat komunikasi	Rancang bangun dan rekayasa alat komunikasi umum dan khusus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi elektronika</li> <li>• Teknologi informatika</li> </ul>
2	<i>Surveillance</i> , penginderaan, navigasi	Rancang bangun dan rekayasa optronic, <i>data Streaming</i> , satelit dan sistem radar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi satelit</li> <li>• Teknologi sensor</li> </ul>
<b>D</b>	<b>Perlengkapan /Bekal Prajurit</b>		
1	Perlengkapan operasi personel	Rancang bangun an rekayasa bahan tahan peluru, makanan lapangan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teknologi Tekstil</li> <li>• Teknologi Pangan</li> <li>• Teknologi Farmasi</li> <li>• Ilmu Kedokteran</li> <li>• Ilmu gizi</li> </ul>

Sumber: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia (2006)

### c. **Remote Control Weapon System (RCWS)**

*Remote Control Weapon System* merupakan sebuah alat sistem persenjataan yang canggih yang terdapat dalam kendaraan tempur baik darat, laut, maupun udara yang mempunyai senjata dengan kaliber besar, sedang dan kecil. Biasanya RCWS yang merupakan stasiun senjata yang bisa mengendalikan dari jarak jauh dan dapat di pasang pada semua jenis kendaraan ataupun *platform* yang lain. Sistem alat persenjataan tersebut digunakan pada kendaraan tempur modern dengan tujuan untuk memungkinkan penembak tetap berada pada perlindungan relative pada kendaraannya (Telen M.A.E & Guinaldo S.A , 2017).

Di sisi lain, penggunaan dari RCWS ini dapat memberikan sebuah dimensi terbaru dalam taktik peperangan yang memungkinkan menjadi elemen integral dalam *platform* alat tempur modern. RCWS dirancang untuk operasi yang bergerak dinamis ataupun bisa juga digunakan untuk operasi statis, yaitu penggunaannya adalah menggunakan konfigurasi dari sumbu ganda yang sepenuhnya harus stabil dengan pemberian kecepatan.

#### **2.1.2 Perancangan**

Perancangan merupakan sebuah tahapan kegiatan yang memiliki tujuan dalam mendesain sebuah sistem berisi hal yang baru dalam menyelesaikan berbagai permasalahan yang dihadapi dan diperoleh dari pemilihan alternatif-alternatif terbaik (Ladjamudin.A, 2005). Sependapat dengan hal tersebut, menurut Suyuti dan Nur (2018) bahwa perancangan merupakan sebuah proses yang memiliki tujuan untuk menganalisis, dalam memperbaiki dan menyusun suatu sistem baru baik secara fisik maupun non fisik secara optimal untuk jangka panjang atau lebih ke arah masa depan dengan memanfaatkan informasi yang tersedia.

Berdasarkan hal tersebut dapat ditarik sebuah kesimpulan bahwa perancangan adalah sebuah pola yang dibuat untuk mengatasi permasalahan yang ada dengan cara menganalisis, memperbaiki serta menyusun suatu sistem dalam struktur yang baru.

### **2.1.3 Pemodelan**

Menurut Astorm & Murray (2008), model adalah sebuah representasi yang tepat digunakan untuk menjawab pertanyaan atau berbagai permasalahan melalui analisa dan dapat disimulasikan dengan dinamika sistem. Dapat diartikan bahwa model merupakan suatu bentuk representasi sederhana dari sebuah sistem yang kompleks. Model berupa representasi matematika didasarkan pada fisika, biologi ataupun sistem informasi. Selain itu, model dapat memungkinkan seseorang untuk memprediksi tentang bagaimana perilaku pada sistem. Model yang memiliki kualitas terbaik adalah model sederhana yang masih mengarahkan pada tujuan, atau dengan kata lain dapat membantu kita dengan mudah memahami sebuah sistem dan membantu dalam memecahkan masalah (Velten. Kai, 2009). Model terbagi menjadi 3 bagian yaitu:

- a. Model ikonik memiliki karakteristik yang sama dengan suatu hal yang diwakilinya dan ini sangat sesuai jika digunakan pada waktu yang spesifik.
- b. Model analog atau model diagramatik yaitu suatu model yang dapat digunakan atau yang mengikuti keadaan yang mengalami perubahan terhadap waktu, sehingga seringkali mewakili situasi yang dinamik.
- c. Model simbolik atau model matematis adalah bentuk model yang paling banyak digunakan model matematika merupakan mengubah sesuatu yang abstrak menjadi hal yang sederhana dari bagian suatu realitas untuk tujuan tertentu.

Model matematika dalam proses fisika merupakan dasar dalam pembentukan dari teori kontrol atau sistem kendali. Hal tersebut diuraikan dengan menganalisis dan mensistesis komponen-komponen (McGraw-Hill, 2005). Hal ini diperkuat oleh Astrom & Murray (2008) yaitu bahwa secara umum model matematis untuk sistem dinamik menggunakan *Ordinary Differential Equations* (ODEs) yaitu salah satu persamaan diferensial sederhana contohnya adalah pada *spring-mass system* dengan direpresentasikan sebagai berikut:

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq \quad (2.1)$$

Dimana:

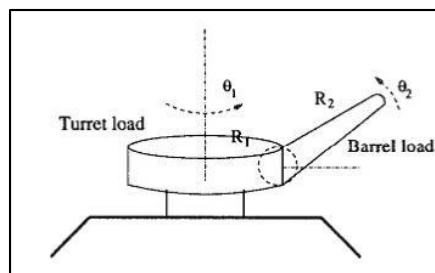
- $\dot{q}$  menunjukkan turunan  $q$  terhadap waktu (kecepatan massa)
- $\ddot{q}$  menunjukkan turunan kedua (percepatan)
- $q$  menunjukkan posisi

Memodelkan *Gun Turret* secara matematis berdasarkan persamaan dasar untuk gerak dinamis adalah sebagai berikut:

$$D\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + G = \tau \quad (2.2)$$

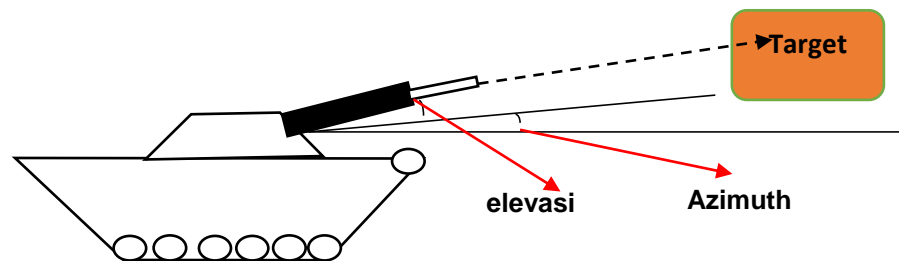
Dimana:

- D merupakan momen inersia
- C merupakan efek gerak *coriolis* (gerak yang membelokan arah arus yang berasal dari tenaga rotasi bumi) dan gaya sentrifugal
- G adalah adanya pengaruh gravitasi.



**Gambar 2.1 Sistem Gun Turret**

Sumber: Kunto D. & Nurhadi (2016)



**Gambar 2.2 Sistem Locking**

Sumber: Diolah Peneliti (2018)

Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 menunjukkan bahwa sistem *Gun Turret* dua sumbu gerak yaitu pergerakan secara rotasi atau yang biasa disebut dengan sudut azimuth dan sumbu pergerakan rotasi secara elevasi.

#### **2.1.4 Sistem Kendali**

Menurut Katsuhikoogata (1984), sistem memegang peranan penting dari sebuah sistem kontrol. Kemajuan teknologi dalam praktek dan teori memberikan kemudahan untuk mendapatkan sebuah performansi dari sebuah sistem dinamik, mempertinggi kualitas, dan menghemat biaya produksi sebuah produk yang memberikan dampak positif yaitu mempertinggi laju produksi. Pengertian sistem juga cakupannya terlalu luas dan dapat merambah pada semua aspek kehidupan. Sehingga menurut Purnama Chandra (2016), sistem sangat diperlukan alam melakukan berbagai pekerjaan untuk menghasilkan kinerja yang baik, terstruktur dan sistematis agar menghasilkan keterpaduan yang dapat menciptakan kerjasama dalam menghasilkan informasi yang cepat, akurat dan tepat dalam mendukung kinerja untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas. Untuk meningkatkan semua hal tersebut diperlukan sebuah sistem.

Sistem adalah sebuah kombinasi antara beberapa komponen-komponen yang dikerjakan bersama-sama untuk melakukan suatu tujuan atau fungsi tertentu (Stuck, 2013). Dapat diartikan bahwa sistem

merupakan sekelompok elemen yang terintegrasi dengan maksud yang sama dan berinteraksi dalam mencapai suatu tujuan tertentu. Tak berbeda jauh dengan membuat sebuah sistem kendali.

Sistem kendali merupakan penggunaan algoritma dan umpan balik (*feedback*) dalam sistem *Engineering*. Inti dari sistem kendali adalah informasi saintis dan termasuk penggunaan informasi secara algoritma dan representasi digital (Astorm & Murray, 2008). Keberadaan sistem kendali juga memiliki peranan yang besar terhadap perilaku sistem. Hal ini dikarenakan peran dari teori kontrol membuat sistem berperilaku dalam cara yang diinginkan. Selain itu menurut McGraw-Hill (2005), peran dari teori kontrol juga dapat membantu dalam memperoleh wawasan tentang bagaimana dan mengapa sebuah sistem kontrol umpan balik bekerja, serta bagaimana mendesain dan menganalisis masalah secara sistematis. Dalam sistem kendali modern juga menggunakan pengoperasian sistem, membandingkan terhadap perilaku yang diinginkan, menghitung tindakan korektif yang didasarkan pada model dalam menanggapi eksternal input dan aktuator terhadap efek perubahan yang diinginkan. Teknik kendali juga mengandalkan dari alat-alat dalam fisika (dinamika dan pemodelan), ilmu komputer (informasi dan *software*) dan penelitian mengenai operasi (optimasi, teori probabilitas, dan teori permainan).

#### **2.1.5 LINEAR, QUADRATIC, AND REGULATOR (LQR)**

Metode atau teknik yang digunakan untuk perancangan kontrol biasanya mempertimbangkan penggunaan metode *Classical Control*, dimana metode tersebut liner, *time invariant*, dan memiliki *input* dan *output* tunggal. Hal ini dikarenakan menurut Anderson & Moore (1969) mengatakan bahwa tujuan utama dalam perancangan sistem kontrol klasik adalah untuk menstabilkan sistem, sedangkan tujuan secara sekundernya yaitu untuk mendapatkan respons terhadap waktu tertentu, penolakan atas gangguan, kesalahan output, dan ketahanan

variasi atau ketidakpastian pada *plant*. Metode perancangan pada dasarnya adalah mengkombinasikan beberapa analitik (misalnya transformasi Laplace, metode Lagrange), beberapa grafis (Plot, grafik), dan beberapa pengetahuan bersifat empiris. Akan tetapi, untuk sistem tingkat tinggi, sistem banyak input, atau sistem yang tidak bisa dilakukan menggunakan kontrol klasik, pada akhirnya menggunakan sistem kontrol modern.

Kontrol modern memiliki tujuan yang berlawanan dengan kontrol klasik. Tujuan kontrol modern yaitu mendesentralisasi desain dari sistem kontrol dengan menghadirkan solusi untuk masalah pada sistem kontrol klasik yang jauh lebih banyak dan luas daripada yang dapat ditangani oleh kontrol klasik, yaitu dengan cara menyediakan berbagai prosedur desain analitis yang dapat memfasilitasi dari tugas desain yang diinginkan (Kastuhioogata, 1984). Tahap awal dari desain perancangan sistem kontrol itu harus menggunakan pendekatan dan pemahaman fisika sebagai dasar pengetahuan untuk merumuskan berbagai permasalahan matematika yang masuk akal. Kemudian untuk memulai prosedur desain analitis, seringkali menggunakan dengan perangkat lunak untuk menghasilkan solusi yang berfungsi sebagai potongan pertama dalam sebuah proses *trial* dan *error*. Salah satu cabang dari kontrol modern yang dapat menetapkan untuk menyediakan berbagai desain analitis yang menarik yaitu adalah optimal kontrol.

Kontrol optimal merupakan sistem kontrol yang memiliki hasil akhir yang seharusnya sistem terbaik yang mungkin dimiliki oleh sebuah sistem. Salah satu jenis kontrol optimal khusus yaitu kontrol optimal linier. Sistem ini dikendalikan dengan mengansumsikan linier pada pengontrol serta perangkat untuk menghasilkan kontrol optimal dengan membatasi menjadi linier. Pengontrol optimal akan lebih baik lagi untuk dicapai jika berkerja secara kuadratik. Kuadratik yang dimaksud merupakan variabel dalam kontrol dan regulasi dalam pelacakan

kesalahan. Metode yang dapat mencapai kontrol optimal tersebut yaitu metode *Linear Quadratic (LQ)*. Keuntungan menggunakan kontrol optimal adalah sebagai berikut (Anderson & Moore, 1969):

- a. Banyak masalah yang tidak mendapatkan solusi yang dapat dihitung, hal ini dikarenakan memiliki solusi yang hanya dapat diselesaikan dengan cara komputasi. Sedangkan, semua masalah kontrol optimal linier memiliki solusi yang siap untuk dihitung.
- b. Hasil dari kontrol optimal linier dapat digunakan pada sistem yang *non-linear* yang beroperasi pada sinyal-sinyal kecil.
- c. Kontrol optimal linier memberikan kerangka kerja yang rinci untuk mengatasi masalah kontrol secara terpadu yang dapat dipelajari melalui metode klasik.

*Linear Quadratic Regulator* merupakan sebuah metode yang terdapat dalam kontrol optimal. *Plant* yang digunakan diasumsikan memiliki sifat linier yang terbentuk persamaan keadaan (*state space*), sedangkan fungsi objektif merupakan fungsi kuadratik dari keadaan sebuah *plant* dan sinyal yang berasal dari masukan. *Linear Quadratic Regulator (LQR)* memiliki kelebihan yaitu dapat memudahkan analisa dan implementasi. Masalah yang dapat diselesaikan yaitu contohnya meminimalkan waktu, bahan bakar, dan lain sebagainya.

metode optimalisasi menggunakan *Linear Quadratic Regulator (LQR)* yaitu dengan cara menentukan sinyal masukan yang dapat memindahkan suatu *state space* sistem linier dari sebuah kondisi awal ( $x(t_0)$ ) menuju ke suatu kondisi akhir ( $x(t)$ ), yang nantinya akan meminimasi suatu indeks kinerja kuadratik. Waktu integral yang terbentuk dari kuadratis pada vektor keadaan (*vector state*)  $x$  dan vektor masukan  $u$  disebut dengan *cost function*. Hal ini sama halnya pada persamaan :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T q x + u^T r u] dt \quad (2.3)$$

Dimana:

- a.  $q$  merupakan matriks semi definit positif
- b.  $r$  merupakan matriks dengan definit positif.

Oleh karena itu variasi parameter dari setiap masalah perancangan *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan kondisi akhir dapat ditentukan, yang mungkin dapat dikatakan akan berpengaruh pada *cost function*. Prinsip dalam penggunaan metode LQR yaitu harus memperoleh sinyal kendali optimal dari umpan balik keadaan dengan  $u = -[k]. [x]$ . Matrik *state space*  $k$ , dapat diperoleh dengan cara memecahkan persamaan riccati. Salah satu kendala dalam menggunakan metode ini adalah memecahkan persamaan riccati yang tidak mudah untuk diselesaikan secara manual. Oleh karena itu, untuk memecahkan persamaan tersebut menggunakan bantuan komputasi yaitu *python 3.6*.

Penurunan persamaan Riccati sebagai solusi optimal dalam sistem linier dengan *time-invariant*, yaitu sebagai berikut :

- a.  $J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T qx + u^T ru] dt$
- b.  $H(x, u, \lambda, t) = g(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, \lambda, t)$
- c.  $H(x, \lambda, t) = \frac{1}{2} (x^T qx + u^T ru) + \lambda^T (Ax + Bu)$
- d. Kondisi optimal  $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$
- e. Persamaan keadaan  $\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda}$
- f. Persamaan *costate*  $\dot{\lambda} = \frac{\partial H}{\partial \lambda}$

Menggunakan aturan dari diferensiasi dari matriks dan vector maka persamaan berikut menjadi :

$$\begin{array}{l} \dot{x} = Ax + Bu \\ -\dot{\lambda} = Qx + A^T \lambda \end{array} \quad (2.4)$$

Dengan  $\dot{u} = -R^{-1} B^T \lambda$  , sebagai vektor kontrol optimal. Persamaan tersebut hanya dapat diselesaikan secara numerik

yaitu dengan cara mensubstitusikan persamaan kontrol optimal ke dalam persamaan *state space*, sehingga didapatkan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{\lambda}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -R^{-1}B^T \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

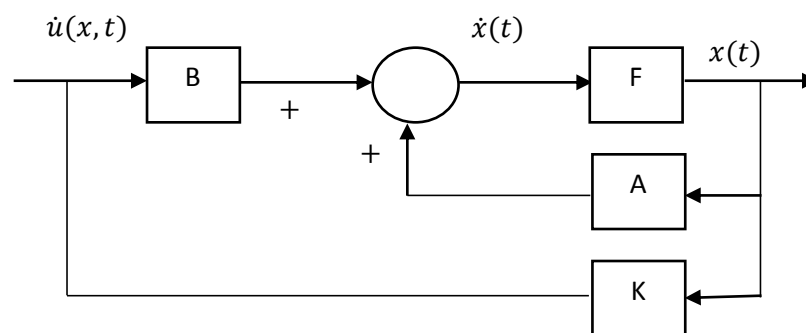
Matriks H merupakan matriks Hamilton yang memiliki peran yang sangat penting dalam LQR. Jika mensubstitusi  $\lambda = Px$  pada kedua ruas, akan diperoleh:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dp}{dt}x + P\frac{dx}{dt} = \frac{dP}{dt}x + PAx - R^{-1}B^T Px = -Qx - A^T Px \quad (2.6)$$

Sedangkan formulasi dari solusi LQR yang digunakan pada waktu berhingga (*Finite*) yaitu:

$$\begin{aligned} u(t) &= -[k].x(t) \\ k(t) &= R^{-1}B^T P \end{aligned} \quad (2.7)$$

Dengan syarat yang harus dipenuhi adalah matriks *A* dan *B* yaitu *controllable* dan *observable*. Berikut blok diagram optimal kontrol dengan umpan balik keadaan (*feedback*).



**Gambar 2.3 Blok Diagram Kontrol Optimal**

Sumber: Houpis, D'Azzo (1988)

### 2.1.6 Kendaraan Tempur Lapis Baja

Menjaga pertahanan negara, TNI Angkatan Darat memerlukan berbagai senjata dan kendaraan yang digunakan dalam mengamankan

wilayah. Salah satunya adalah kendaraan tempur lapis baja (tank) merupakan kendaraan yang dipakai oleh TNI Angkatan Darat. Hal ini diperkuat dalam salah satu tugas TNI AD yang tercantum pada Doktrin Angkatan Darat “Kartika Eka Paksi” menyatakan bahwa TNI memiliki tugas untuk membangun dan mengembangkan kekuatan matra darat dengan mewujudkan TNI AD yang tercermin dari adanya keterpaduan berbagai kekuatan, kemampuan, serta gelar TNI AD. Untuk mengembangkan kekuatan matra darat, maka sudah seharusnya lebih menguasai ilmu tentang alutsista yang digunakan oleh Angkatan Darat salah satunya yaitu tank.

Menurut Narashiman & Slvapard (1989), Tank merupakan kendaraan tempur lapis baja yang memiliki karakteristik mobilitas yang sangat tinggi serta dilindungi senjata. Mobilitas yang dimaksud menurut *Departement Of The Army Field Manual (2018)* adalah memiliki kemampuan dalam menghadapi berbagai medan dan bergerak cepat dari tempat yang satu dan tempat yang lain di medan pertempuran. Kendaraan tempur lapis baja ini terdiri dari 3 kategori yaitu *Main Battle Tank (MBT)*, *Medium Tank*, dan *Light Tank* (tank ringan). Semua dibentuk untuk memenuhi peran tertentu.

Perbedaan kategori tank ini dibedakan oleh ukuran senjata dan berat kendaraan. Dilihat dari fungsi ketiga kategori tank tersebut menurut Mizokami Kyle (2016) yaitu MBT digunakan untuk melawan *bunker* dan benteng. *Medium Tank* adalah tank yang paling sering digunakan atau sebagai andalan untuk pertempuran karena memiliki kekuatan yang paling bagus untuk kompromi menengah antara senjata, perlindungan, dan mobilitas. Sedangkan Tank ringan (*light Tank*) digunakan untuk sebagai pemandu dan dimanfaatkan sebagai terobosan dalam menangani infanteri dan kendaraan lapis baja ringan. Perbedaan dari ketiga kategori tank juga dikemukakan dalam paparan Kodiklat TNI AD (2013) adalah sebagai berikut:

- a. *Main Battle Tank* (MBT) merupakan jenis kendaraan tempur Penggempur yang memiliki klasifikasi kelas berat (*Heavy Tank*) atau kelas Medium (*Medium Tank*) dengan kapabilitas menghasilkan daya kejut, daya tembak dan daya gempur yang dasyat.
- b. *Heavy Tank* (Tank Kelas Berat) adalah Kendaraan tempur Penggempur (*Main Battle Tank*) dengan klasifikasi kelas berat (*Heavy Tank*) dengan berat Kendaraan tempur di atas 40 ton, dipersenjatai Kanon kaliber 120 mm atau 125 mm, memiliki sistem perlindungan yang tangguh, serta dilengkapi dengan sistem komunikasi, sistem navigasi dan sistem Komando pengendalian (*Battlefield Management System*) sehingga menghasilkan daya kejut, daya tembak dan daya gempur yang dahsyat.
- c. *Medium Tank* (Tank Kelas Sedang) merupakan Kendaraan tempur Penggempur (*Main Battle Tank*) dengan klasifikasi kelas Medium (*Medium Tank*) dengan berat Kendaraan tempur antara 15 – 40 ton, dipersenjatai Kanon kaliber 90 mm atau 100 mm atau 105mm, memiliki sistem perlindungan yang tangguh, serta dilengkapi dengan sistem komunikasi, sistem navigasi dan sistem Komando pengendalian (BMS) sehingga menghasilkan daya kejut, daya tembak dan daya gempur yang dahsyat.
- d. *Light Tank* (Tank Kelas Ringan) adalah Kendaraan tempur fungsi Pengamanan atau Angkut Personel atau Logistik/Administrasi dengan klasifikasi kelas ringan (*Light Tank*) dengan berat Kendaraan tempur maksimal 15 ton, dipersenjatai dengan senjata Senapan Mesin Sedang (SMS) atau Senapan Mesin Besar (BMS) atau Kanon kaliber kecil (maksimal kanon 30 mm), serta dilengkapi dengan sistem komunikasi sistem navigasi dan sistem Komando pengendalian (BMS) sehingga memiliki kecepatan dan kelincahan.

Kendaraan tempur lapis baja menurut Paplinski Krzystof (2009) memiliki beberapa bagian utama yaitu *hull*, *turret*, dan *main gun*. *Hull* adalah badan dari *Medium Tank*, sedangkan *turret* dan *gun* adalah sebagai senjatanya. Salah satu pengembangan *Medium Tank* adalah masalah *Remote Control Weapon System* (RCWS) sebagai bagian dari *fire Power and Protection* sebuah tank.

#### **2.1.6.1 Turret**

*Gun Turret* yang digunakan dalam kendaraan militer harus memiliki beberapa elemen yang sama agar dapat memenuhi persyaratan mobilitas di lingkungan militer. Elemen-elemen tersebut adalah sistem penggerak (motor), *Gears Pair*, *trunnions*, pistol tunggangan, struktur rotor, *turret Hull*, bantalan yang memungkinkan rotasi di ketinggian sumbu, dan senjata (Çağil. Çğloğlu, 2016).



**Gambar 2.4 FNSS Medium Caliber One Man Turret SABER**

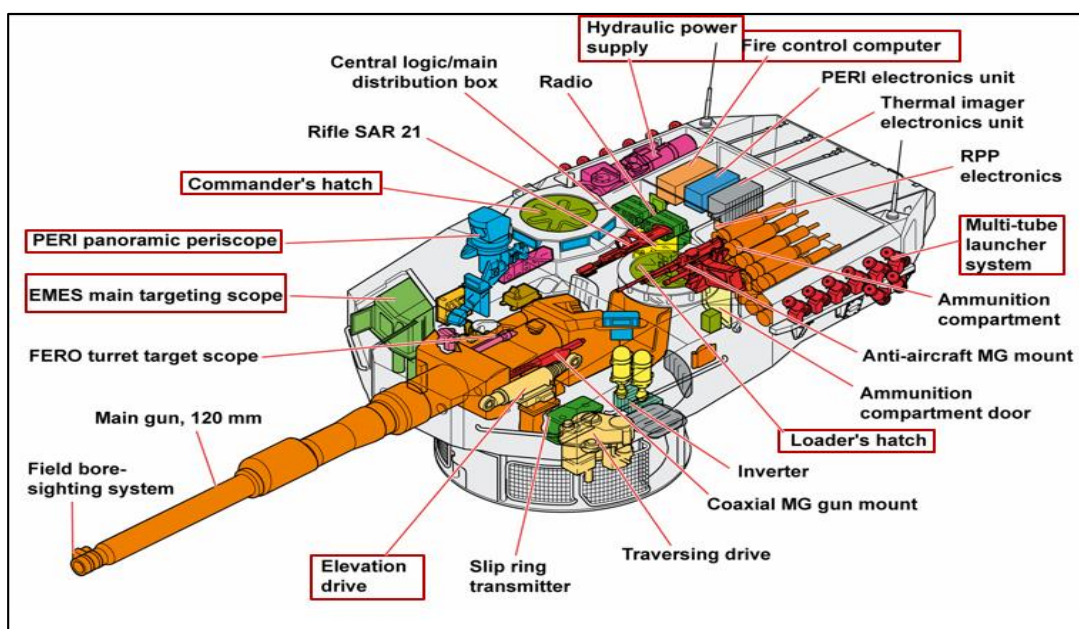
Sumber : Çağil. Çğloğlu (2016)

Penjelasan mengenai bagian-bagian pada *Gun Turret* adalah sebagai berikut (Çağil. Çğloğlu, 2016):

- a. *Turret Hull* yaitu komponen sasis tetap pada kendaraan yang bertindak sebagai bingkai utama dalam komponen mengangkat secara bebas.

- b. Rotor yaitu komponen penghubung antara turret *Hull* dengan bantalan, sehingga putaran yang dihasilkan sama besar. selain itu rotor juga bertindak sebagai bingkai utama dalam komponen pengangkatan.
- c. Poros Pinion yaitu bagian elevasi dari gear motor, dimana torsi pada motor di transmisikan ke sisi beban. Poros pinion dihubungkan ke turret *Hull* oleh bantalan sehingga putaranyang dihasilkan sama.
- d. *Gear sector* yaitu gigi pinion yang digunakan untuk meningkatkan torsi ke sisi beban. Hal ini dikarenakan gear sector telah dihubungkan dengan rotor oleh pegas torsional.
- e. *Gun barrel* (senjata) yaitu pengeluaran senjata diaman keluarannya amunisi berbentuk tabung

Secara detail dapat di lihat pada di bawah ini :



**Gambar 2.5** komponen *Turret Leopard 2A4 ID*

Sumber: Kodiklat TNI AD (2013)

## 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Humaidi, Dwi Arman Prasetya, dan Jeki Saputra (2017) dalam penelitiannya yang berjudul Optimasi Penentuan Elevasi dan Azimuth Peluncuran roket Menggunakan PID menyimpulkan bahwa dari hasil pengujian alat pengendali launcher roket kecepatan pergerakan sudut Azimuth  $0^\circ$  sampai  $360^\circ$  dan sudut Elevasi  $0^\circ$  sampai  $60^\circ$ , akurasi ketelitian posisi launcher sudah sesuai dengan yang diharapkan. Kedua, sistem transmisi kendali launcher roket dari manual ke otomatis menggunakan kontrol PID telah dapat mengolah data masukan yang diberikan melalui keypad, dimana keluarannya dapat menggerakkan launcher ke posisi elevasi maupun azimuth. Ketiga, dari hasil pengujian alat perbandingan kecepatan respon terhadap perintah, Nilai *output* sudut elevasi dan azimuth yang dihasilkan sama dengan 2%. Metodologi yang digunakan adalah perancangan perangkat keras. Persamaan penelitian terletak pada penentuan elevasi dan azimuth dari sebuah objek. Sedangkan untuk perbedaaan terletak pada objek penelitiannya yaitu roket.

Dimas Kunto, Arif Wahjudi, dan Hendro Nurhadi (2016) dengan penelitian berjudul Perancangan Sistem Kontrol PID untuk Pengendali Sumbu Elevasi Gun pada Turret-gun Kaliber 20 Milimeter menyimpulkan bahwa menunjukkan metode Root Locus yang menghasilkan konstanta  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  dengan transient response yang belum memenuhi kriteria desain, sedangkan desain PID dengan metode Ziegler-Nichols yang menghasilkan konstanta  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  dengan *transient response* yang telah memenuhi kriteria desain. Dan jika ditinjau dari segi kestabilannya, kedua metode telah menghasilkan sistem kontrol elevasi *Gun Turret* yang stabil. Persamaan pada penelitian ini adalah menggunakan PID untuk merancang kendali *Gun Turret*. Perbedaannya terletak pada besar kaliber yang digunakan dan terletak pada keadaan tank yaitu hanya pada saat diam.

Ian Hardianto Siahaan dengan penelitian yang berjudul Simulasi Model Matematis Kontrol Sistem Kontrol Traksi menyimpulkan bahwa hasil analisa dengan *PID Fuzzy* tidak jauh berbeda dengan PID kontroler karena hasilnya merupakan hasil perbaikan respon kontroler utama. Metodologi yang digunakan adalah simulasi. Persamaan terletak pada simulasi model matematis kontrol. Dan perbedaan terletak pada mencari model matematis kontrol traksi.

Marcio dos Santos Gomes Dan Armando Morado Ferreira (2006) dalam penelitiannya yang berjudul *Gun-Turret Modelling And Control*, menggunakan metodologi model ekperimental menyimpulkan bahwa model realistik di Tank Leopard 1A1 yaitu perspektif dari kontrol *Gun Turret* dan terdapat indikasi pada hukum kontrol non-linier seperti pada kasifikasi sistem, karena hal tersebut dapat meningkatkan presisi. Perbedaan terletak pada objek penelitiannya yaitu menggunakan Menggunakan tank MBT leopard 1A1 menggunakan tujuh derajat kebebasan pada saat kondisi diam.

Çağil Çğloğlu (2016) dalam penelitiannya yang berjudul *Dynamic Modelling And Analysis Of Gun Turret Elevation Drive System* menggunakan permodelan dan analisis menyimpulkan bahwa efek dinamis mekanisme penyesuaian sesuai jenis anti-reaksi, yang umumnya digunakan dalam senjata *turret drive*, ini diselidiki dengan model dikembangkan dinamika *multibody*. Berbagai sasaran pelacakan skenario yang dibangun dan simulasi berbeda dilakukan di MSC-Adams. Perbedaan terletak pada model matematis dilakukan di bantalan *gear*.

Tabel 2.2 Daftar Penelitian Terdahulu

NO	Penulis	Judul	Metodologi	Permasalahan yang sedang diteliti	Hasil Penelitian	Perbedaan Penelitian
1.	Humaidi, Dwi Arman Prasetya, dan Jeki Saputra	Optimasi Penentuan Elevasi dan Azimuth Peluncuran roket Menggunakan PID (2017), Prosiding SNATIF dengan ISBN:978-602- 1180-50-1	Perancangan Perangkat Keras ( <i>hardware</i> )	Perangkat / sistem yang dapat membantu tugas komponen kontroler saat mengarahkan kedudukan launcher pada sudut elevasi dan azimuth yang diinginkan	1. Dari hasil pengujian alat pengendali launcher roket kecepatan pergerakan sudut Azimuth 0° sampai 360° dan sudut Elevasi 0° sampai 60°, akurasi ketelitian posisi launcher sudah sesuai dengan yang diharapkan, <5% atau =0%.  2. Sistem transmisi kendali launcher roket dari manual ke otomatis menggunakan kontrol PID telah dapat mengolah data masukan	Objek yang diteliti berupa roket

					<p>yang diberikan melalui keypad, dimana keluarannya dapat mennggerakkan launcher ke posisi elevasi maupun azimuth</p> <p>3. Dari hasil pengujian alat perbandingan kecepatan respon terhadap perintah, Nilai <i>output</i> sudut elevasi dan azimuth yang dihasilkan sama dengan 2%.</p>	
2.	Dimas Kunto, Arif Wahjudi,dan Hendro Nurhadi	Perancangan Sistem Kontrol PID untuk Pengendali Sumbu Elevasi Gun pada Turret-	Studi Literatur, Numerical eksperimen, Simulasi	Perancangan kendali pada gerak elevasi laras senjata. Hal yang turut dipertimbangkan dalam perancangan kendali gerak elevasi turret-gun ini salah	Penelitian ini menunjukkan metode Root Locus yang menghasilkan konstanta $K_p$ , $K_I$ dan $K_d$ berturut-turut sebesar 4132.045, 375.638 dan 811 mempunyai transient response yang	Perancangan sistem kendali hanya dilakuakn pada saat kendaraan dalam keadaan

		gun Kaliber 20 Milimeter (2016),  Jurnal Teknik ITS Volume 5 N.2  ISSN: 2337-3539(2301-9271 print)		satunya adalah ukuran peluru, karena ukuran peluru menjadi faktor yang mempengaruhi dimensi dan inersia dari laras senapan. Inersia yang besar membuat sistem sulit bergerak dengan akurat dan presisi	belum memenuhi kriteria desain, sedangkan desain PID dengan metode Ziegler-Nichols yang menghasilkan konstanta KP, KI dan KD berturut-turut sebesar 23061.024, 37820.07 dan 3515.4 telah menghasilkan transient response yang telah memenuhi kriteria desain. Apabila ditinjau dari kestabilannya, kedua metode telah menghasilkan sistem kontrol elevasi <i>Gun Turret</i> yang stabil	tidak bergerak atau diam.
3	Ian Hardianto Siahaan	Simulasi Model Matematis Kontrol Sistem Kontrol Traksi (2005),	Simulasi dengan cara mengintegrasikan penelitian-penelitian	mengintegrasikan penelitian-penelitian dibidang kontrol traksi yang sudah pernah dilakukan peneliti lain,	1. PID, dengan menggunakan PID kontroler bahwa kendaraan tersebut dapat dituning dengan Kp, Kd,	

		Jurnal Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra Volume 7, Nomor 1	dibidang kontrol traksi yang sudah pernah dilakukan peneliti lain, kemudian menganalisis terhadap hasil permodelan yang dilakukan yaitu dengan simulasi <i>Hybrid PID Fuzzy</i>	kemudian menganalisis terhadap hasil permodelan yang dilakukan yaitu dengan simulasi <i>Hybrid PID Fuzzy</i>	<p>Ki yang maksimum dan minimum. Disini kontroler utamanya adalah PID konvensional. Dari hasil PID roda kiri dan kanan terlihat bahwa keduanya dapat dituning pada respon <i>output</i> yang sesuai dengan setting point.</p> <p>2. PID Fuzzy, hasil analisa dengan PID Fuzzy tidak jauh berbeda dengan PID kontroler karena hasilnya merupakan hasil perbaikan respon kontroler utama.</p> <p>3. Dari penelitian yang dilakukan dapat dikembangkan trend</p>	
--	--	--	---	--	---	--

					<p>peneliti terdahulu untuk analisa performansi kontroler sistem kontrol traksi tersebut.</p> <p>4. Dengan bantuan kontroler PID dan PID Fuzzy sebagai kriteria penentu keputusan yang mengontrol respon <i>output</i> pada daerah steady state <i>error</i> yang diharapkan</p>	
4	Marcio dos Santos Gomes Dan Armando Morado Ferreira	Gun-Turret Modelling And Control (2006)  Proseding COBEM ABCM Symposium	Eksperimental model	Mengembangkan model dinamis yang lengkap dan ditambah dengan tujuh derajat kebebasan yang berkaitan dengan kendala nonholonomic. Parameter untuk simulasi berdasarkan Leopard	Hasil utama pada model realistic di Tank Leopard 1A1 yaitu perspektif dari kontrol <i>Gun Turret</i> dan terdapat indikasi pada hukum kontrol non-linier seperti pada kasifikasi sistem, karena hal tersebut dapat meningkatkan presisi.	Menggunakan tank MBT leopard 1A1 menggunakan tujuh derajat kebebasan pada saat kondisi diam.

		<p><i>Series In Mechatronics</i></p> <p>Volume 2 – pp,60-67</p>		<p>1A1 tangki dan diperoleh oleh pemodelan 3-dimensi dan eksperimental metode. Skema kontrol linearization umpan balik yang diterapkan, dengan keuntungan yang diperoleh dengan pendekatan optimal kontrol.</p>		
5	Çağıl Çğloğlu	<p>Dynamic Modelling And Analysis Of <i>Gun Turret</i> Elevation Drive System (2016),</p>	Permodelan dan analisis	<p>model yang dinamis untuk sumbu elevasi meriam dikembangkan dengan menggunakan MATLAB Simulink dan dinamika multi tubuh perangkat lunak MSC-Adams. Model yang dikembangkan</p>	<p>efek dinamis mekanisme penyesuaian sesuai jenis anti-reaksi, yang umumnya digunakan dalam senjata turet drive, ini diselidiki dengan model dikembangkan dinamika multibody. Berbagai sasaran pelacakan skenario yang</p>	<p>Permodelan dilakukan dikaitkan dengan bantalan gear</p>

		Tesis <i>MiddleOf Technical University</i>		termasuk <i>stiffnesses driveline</i> komponen individu serta redaman kental bantalan di <i>drivetrain elevasi</i> .	dibangun dan simulasi berbeda dilakukan di MSC-Adams.	
--	--	--	--	--	---	--

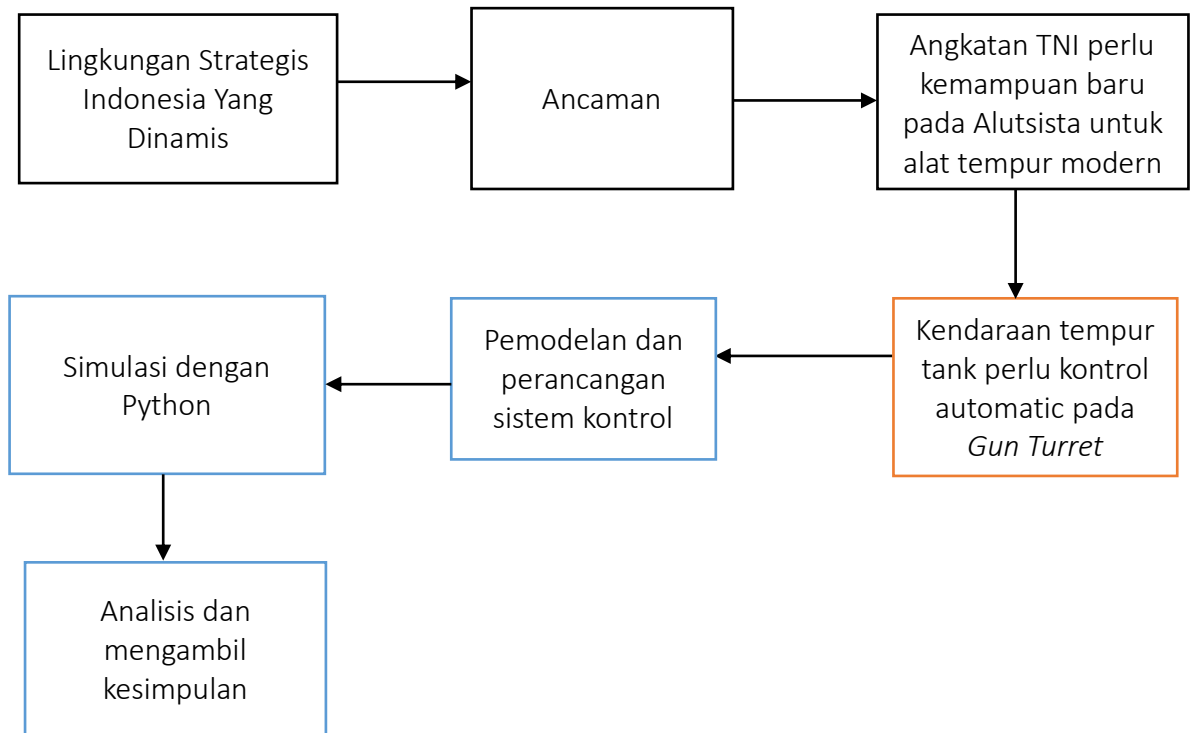
Dari Tabel 2.3, penelitian yang paling relevan adalah penelitian dari Çağıl Çoğulu (2016), akan tetapi terdapat perbedaan yaitu pada model yang dikembangkan yaitu menggunakan *stiffnesses driveline* komponen individu serta redaman kental bantalan di *drivetrain elevasi* *stiffnesses driveline* komponen individu serta redaman kental bantalan di *drivetrain elevasi*. Kedua perbedaan terletak pada simulasi yang digunakan yaitu menggunakan MSC-Adams. Sedangkan kebaruan yang terdapat pada penelitian ini adalah pemodelan matematis pada sudut elevasi *Gun Turret* serta penggunaan simulasi menggunakan metode kontrol Optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) pada *Medium Tank*.

### 2.3 Kerangka Berpikir

Perkembangan lingkungan strategis Indonesia yang dinamis berbagai sistem penyelenggaraan pertahanan negara sehingga menimbulkan adanya ketidakpastian ancaman baik secara nasional maupun internasional. Oleh karena itu Angkatan bersenjata di Indonesia perlu kemampuan baru yang untuk menjamin sukses dalam situasi tempur modern pada Alat Utama Sistem Persenjataan (Alutsista). Senjata yang dibutuhkan lebih kepada senjata yang bergerak mobile dan dirancang yang dapat untuk *Survavibility* kendaraan di medan tempur.

Salah satu senjata yang terdapat pada kendaraan tempur adalah *Gun Turret*. *Gun Turret* suatu sistem dalam konsep *Medium Tank* yaitu *Fire power and Protection*. Selain itu *Gun Turret* pada *Medium Tank* termasuk dalam *Remote control Weapon system* (RCWS). Akan tetapi pada *Gun Turret Medium Tank*, terdapat hal yang mempengaruhi, salah satunya adalah ukuran dari peluru, karena ukuran peluru menjadi faktor yang mempengaruhi dimensi dan inersia dari laras senapan. Inersia yang besar membuat sistem sulit bergerak dengan akurat dan presisi, sehingga dibutuhkan sistem kendali yang sesuai untuk menyelesaikan masalah tersebut. Oleh karena itu agar *Gun Turret* dapat meningkatkan efektivitas tempur pada kendaraan serta meningkatkan *Gun Turret* untuk perlindungan keselamatan pasukan dan kompartemen tempur lapis baja, maka diperlukan sebuah sistem kendali yang sesuai untuk membantu tugas komponen kontroler saat mengarahkan kedudukan *Gun Turretnya* pada sudut elevasi dan azimuth yang diinginkan terhadap musuhnya.

Teknik kontrol yang digunakan dalam menentukan sudut elevasi adalah menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) yang kemudian di simulasikan dalam *Python 3.6*.



**Gambar 2.6 Diagram Kerangka Pikir**

Sumber: Diolah Peneliti (2018)

## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bagian ini bertujuan untuk menjelaskan mengenai tahapan dalam peningkatan akurasi pada data yang diperoleh. Metode penelitian merupakan sebuah cara ilmiah yang digunakan untuk memperoleh data dengan tujuan dan fungsi tertentu.

#### **3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

##### **3.1.1 Tempat Penelitian**

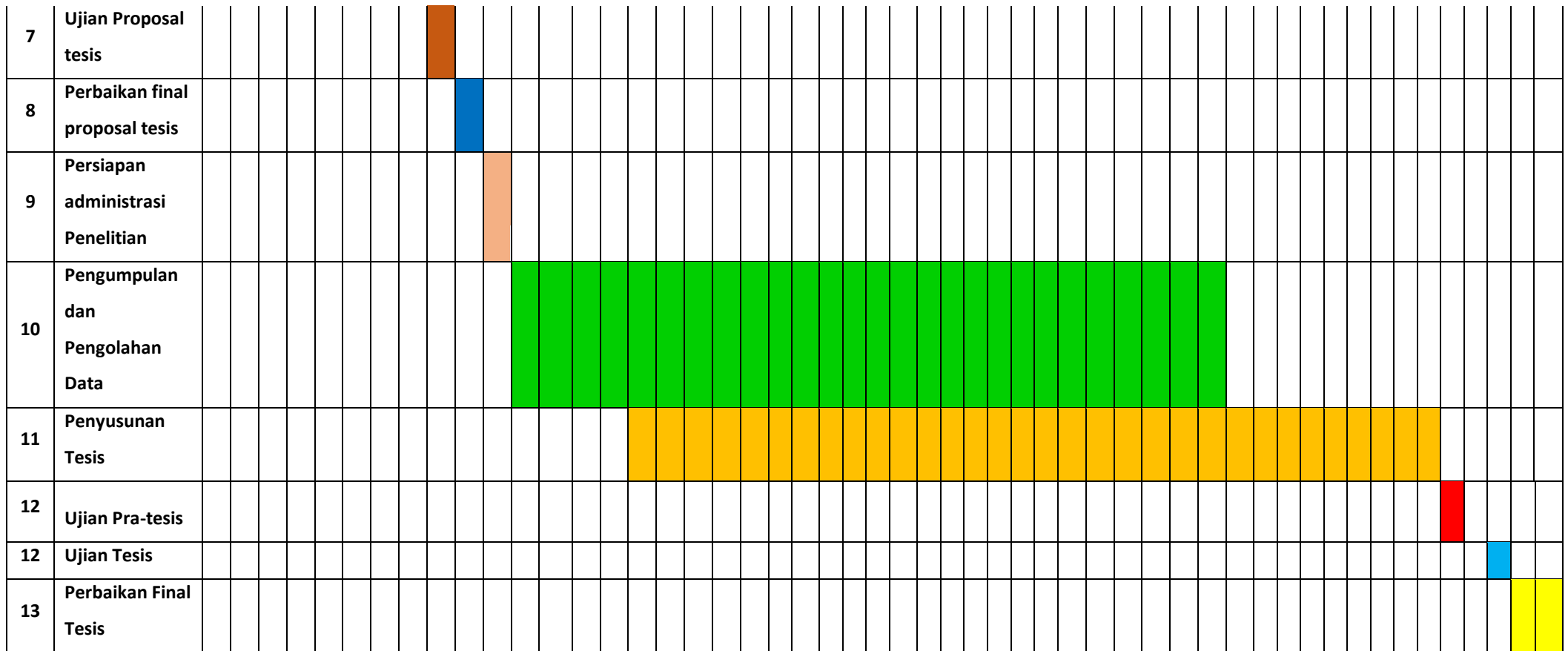
Tempat penelitian dilaksanakan di tiga tempat yang menyangkut secara langsung tentang kendaraan tempur, yaitu sebagai berikut:

1. PT.Pindad yang beralamat di Jalan Gatot Subroto, No 517, Bandung, Indonesia, 40285. Persiapan dan implementasi desain simulasi serta pemodelan dilakukan di Universitas Pertahanan.
2. Pusenkav yang beralamat di Jalan Ceremai No. 9, Lingkar Selatan, Lengkong.
3. Dislitbang AD yang beralamat di Jalan Matraman Raya No.147, RW.9, Palmeriam, Kec. Matraman, Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13140.

##### **3.1.2 Waktu Penelitian**

Penelitian ini dimulai pada bulan Agustus 2018 hingga Agustus 2019. Berikut ini merupakan jadwal penelitian dari peneliti dimulai dari pemilihan dosen pembimbing hingga pelaksanaan sidang tesis.





Sumber: Diolah Peneliti (2019)

### 3.2 Sumber Data

Sumber data merupakan segala sesuatu yang dapat memberikan serta menghasilkan informasi mengenai data yang dibutuhkan. Berdasarkan sumbernya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu:

#### 3.2.1 Data Primer

Data primer merupakan data yang disusun oleh peneliti dengan tujuan untuk menyelesaikan permasalahan yang sedang dihadapinya dengan diperoleh atau dikumpulkan secara langsung dari lapangan sumber utama atau tempat objek penelitian dilakukan yaitu PT. Pindad. Pengambilan data primer dari PT.Pindad adalah mengenai data *Medium Tank*, gerak mekanisme dari *Gun Turret*, dimensi *Gun Turret*, spesifikasi *Gun Turret*, ataupun model 3D *Gun Turret Medium Tank* PT.Pindad.

#### 3.2.2 Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang diperoleh dan dikumpulkan oleh peneliti dengan tujuan mendukung informasi yang telah diperoleh atau memperkuat data primer dari data-data yang telah ada. Dalam penelitian ini yang menjadi sumber data sekunder yaitu studi pustaka, artikel, jurnal, buku, studi kasus, penelitian terdahulu dan lain sebagainya.

### 3.3 Pendekatan Penelitian

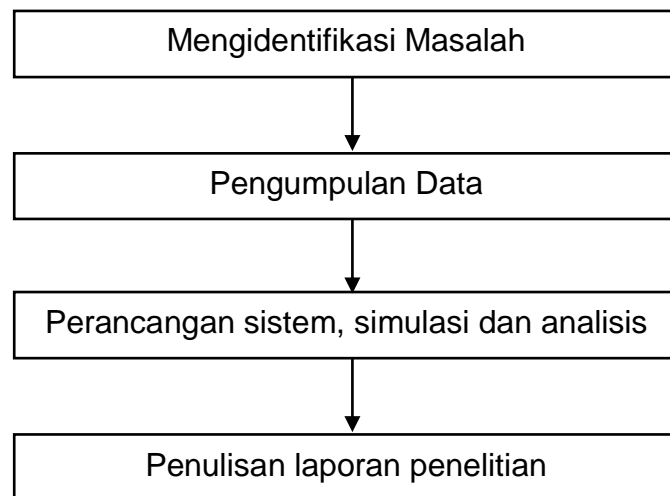
Pendekatan dilaksanakan dengan menggunakan metode komputasi berbasis simulasi dari persamaan dinamika gerak benda. Pendekatan simulasi dilakukan dengan asumsi dinamika gerak titik bermasa dengan solusi persamaan diferensial (*ordinary diferensial equation-ODE*). Tahapan-tahapan pendekatan yang dilakukan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

3.3.1 Studi konsep dasar mengenai mekanisme gerak *Gun Turret*, meliputi dinamika gerak *Gun Turret*, dan kendali *Gun Turret*.

- 3.3.2 Studi perkembangan dan kondisi kekinian mengenai teknologi *Gun Turret*.
- 3.3.3 Penurunan konsep dan persamaan sistem gerak dinamis.
- 3.3.4 Perancangan sistem kontrol
- 3.3.5 Simulasi numerik dan analisis

### 3.4 Alur Penelitian

Dalam menyelesaikan penelitian ini dapat dilakukan dengan beberapa tahapan, melalui kerangka kerja penelitian, yaitu dengan menggunakan:



**Gambar 3.1. Alur Penelitian**

Sumber: Diolah Peneliti (2018)

Pada penelitian ini peneliti menggunakan tahapan kegiatan penelitian sebagai berikut:

#### 3.4.1 Mengidentifikasi Masalah

Peneliti mengidentifikasi permasalahan yang ada yaitu merumuskan masalah yang akan diteliti. Hal ini dikarenakan dengan adanya perumusan masalah, maka penelitian akan menjadi jelas dan terarah.

#### 3.4.2 Pengumpulan data

Tahap ini merupakan tahap dimana peneliti melakukan studi literature dan studi lapangan terhadap mekanisme kinematik gerak *Gun Turret*.

Selain itu juga mengenai penelitian terdahulu dari penelitian *Gun Turret*. Literatur yang digunakan berupa buku, jurnal ilmiah, dan tesis mengenai topik yang sedang diteliti.

a. Dokumentasi

Dokumentasi adalah suatu teknik dalam mengumpulkan data dari dokumen-dokumen yang ada pada benda-benda tertulis seperti buku-buku, notulensi, peraturan-peraturan, dan sebagainya.

b. Wawancara

Wawancara membantu memperkuat argument yang terdapat dalam mencari data peneliti dalam mengetahui hal-hal yang diperlukan dalam penelitian secara mendalam yaitu di PT.Pindad (*Vice President* Pengembangan Produk dan Proses, serta Kepala program *Medium Tank*), Pusat Kesenjataan Kavaleri (Kepala Pusenkav), dan Dislitbang AD (Kepala Dislitbang AD).

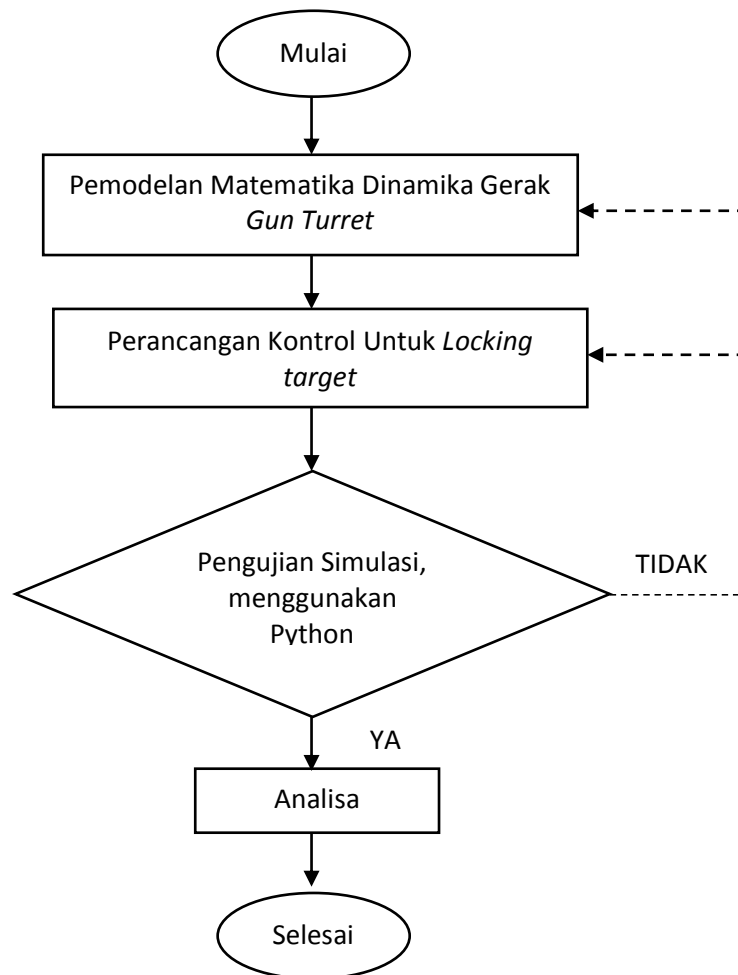
c. Dokumentasi

Dokumentasi adalah suatu teknik dimana data diperoleh dari dokumen-dokumen yang ada pada benda-benda tertulis seperti buku-buku notulensi, makalah, peraturan-peraturan, buletin-buletin, catatan harian dan sebagainya

### 3.4.3 Perancangan sistem


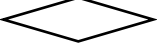
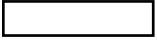
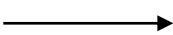
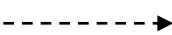
Pada tahap ini dilakukan pengambilan data masukan dan keluaran sistem. Sistem *Gun Turret* yang telah dimodelkan sehingga pengambilan data dilakukan dengan mensimulasikannya di *software* Matlab Simulink.

- a. Memodelkan persamaan gerak *Gun Turret* secara analitik simulasi
- b. Merancang dan sistem kontrol untuk *Gun Turret*
- c. Optimal kontrol *Gun Turret*
- d. *Vector stabilization*



**Gambar 3.2 Diagram Alir perancangan sistem Kendali**  
Sumber : Diolah Peneliti

Keterangan :

-  : Kegiatan awal dan akhir
-  : Keputusan
-  : Kegiatan
-  : Urutan
-  : Siklus jika diperlukan

#### 3.4.4 Penulisan Laporan Penelitian

Pada tahap ini telah dilakukan pengolahan data yang selanjutnya pengambilan kesimpulan dilakukan dari setiap analisa yang dilakukan

dari awal sampai proses akhir dari perancangan sistem kontrol. Dari hasil kesimpulan yang didapat akan dibuat saran yang akan mendukung untuk perancangan sistem kontrol Turret-gun dengan kaliber yang lebih besar.

### 3.5 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.5.1 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

3.5.2 Perangkat lunak

Hadirnya *software* komputer sangat membantu perhitungan dan proses analisis tanggapan sistem terhadap sinyal masukan dan aksi pengontrolan. Berbeda dengan perhitungan manual yang rumit dan lama, perhitungan dengan bantuan *software* komputer jauh lebih mudah dan cepat dan hasilnya tepat. Spesifikasi dari *software* yang digunakan adalah Python 3.6. Sedangkan untuk penggambaran 3D menggunakan *software Autodesk inventor* 2018. Inventor yang digunakan menggunakan metode ISO ANSI dan metode 3D *projection* menggunakan sistem Amerika.

### 3.6 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*

### **3.7 Teknik Pengolahan Data**

Dengan menggunakan perhitungan numerik untuk memformulasikan masalah sistem kendali *Gun Turret* agar dapat dipecahkan dengan operasi perhitungan dengan tujuan agar memperoleh metode terbaik yang efisien dan akurat (memperkecil kesalahan), dalam hal ini akan dibantu dengan *software* Python.

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

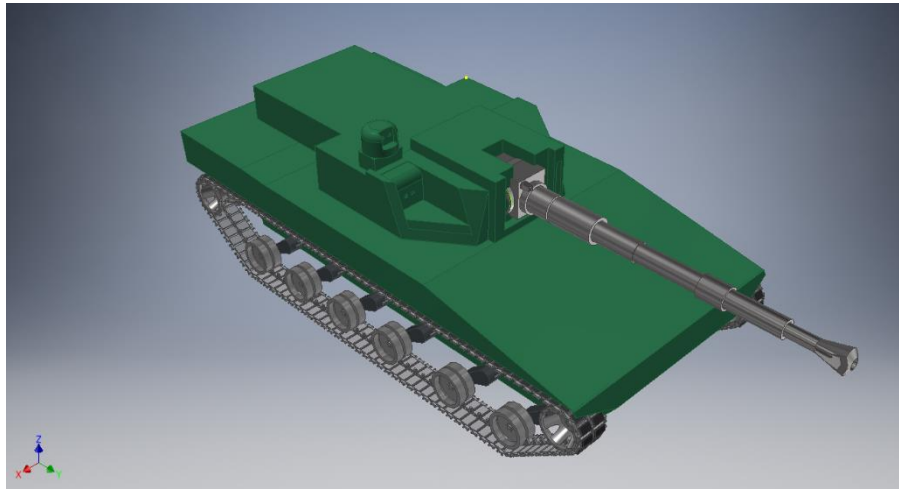
#### 4.1 Deskripsi Data

##### 4.1.1 Pemodelan 3D Model *Medium Tank FNSS Pindad*

*Medium Tank FNSS Pindad* merupakan *Medium Tank* terbaru yang dimiliki oleh Indonesia. 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.

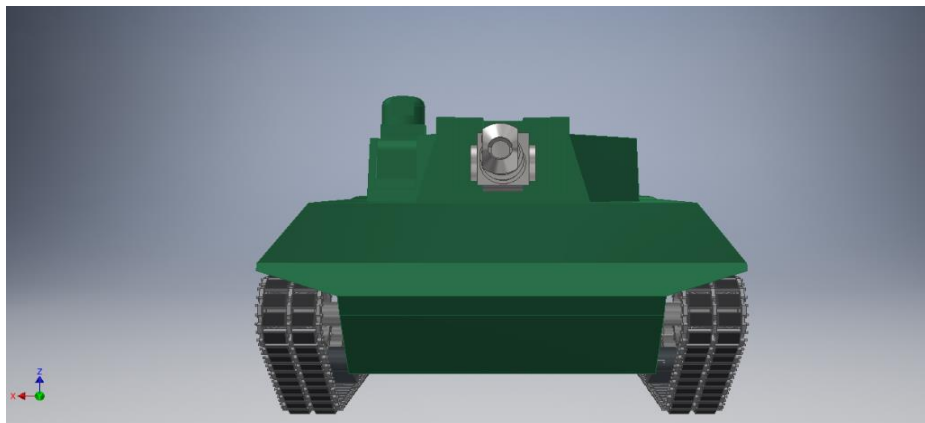
Keterbatasan informasi mengenai data fisik juga berimbas pada penentuan material pada *Medium Tank FNSS Pindad*. Penentuan material pada tank tidak bisa dilakukan pada setiap bagian. Oleh karena itu, penentuan material setiap bagian model 3D CAD dari *Medium Tank FNSS Pindad* memilih untuk penggunaan material yang dapat merepresentasikan gambaran model fisik dari wujud aslinya dengan menggunakan 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.



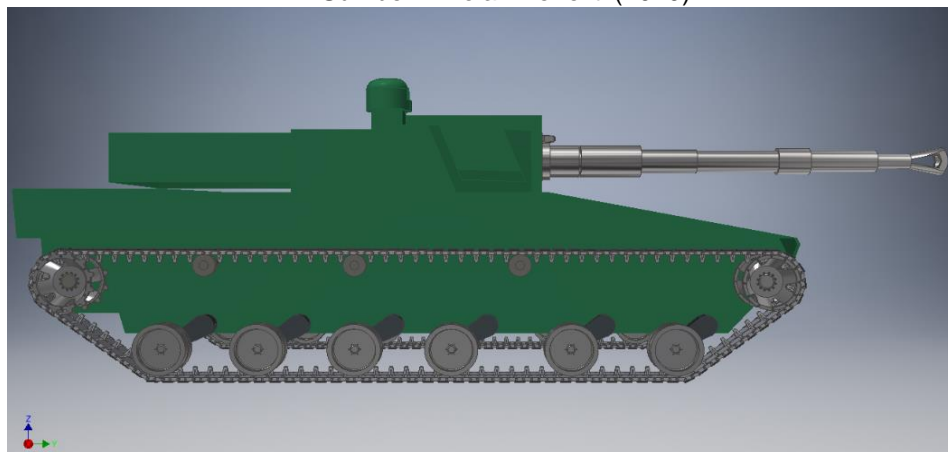
**Gambar 4.1 FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)



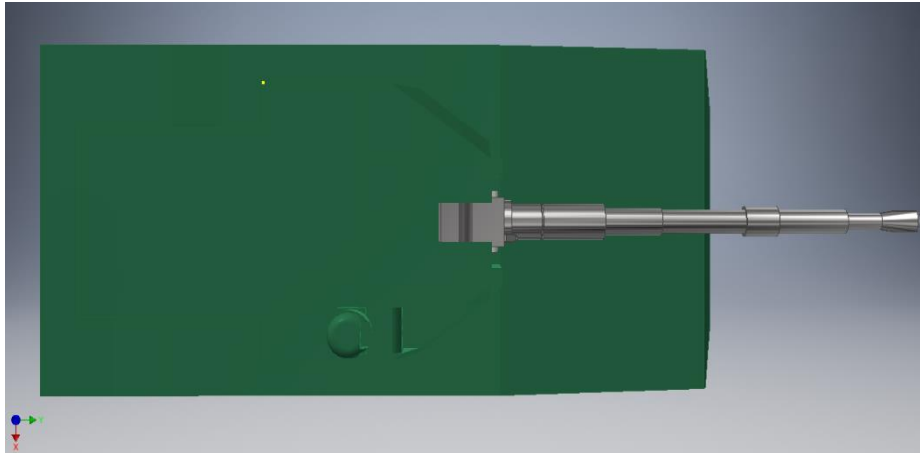
**Gambar 4.2 Tampak Depan FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)



**Gambar 4.3 Tampak Samping FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

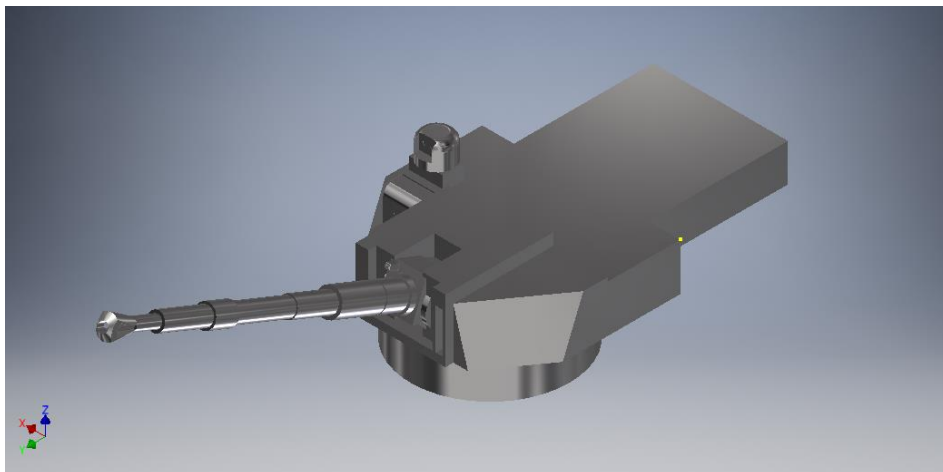
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



**Gambar 4.4 Tampak Atas FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

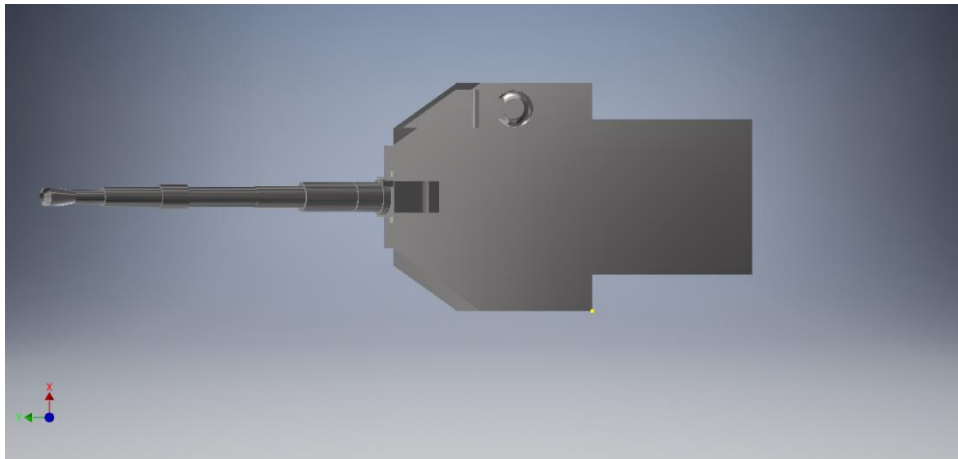
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

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*:

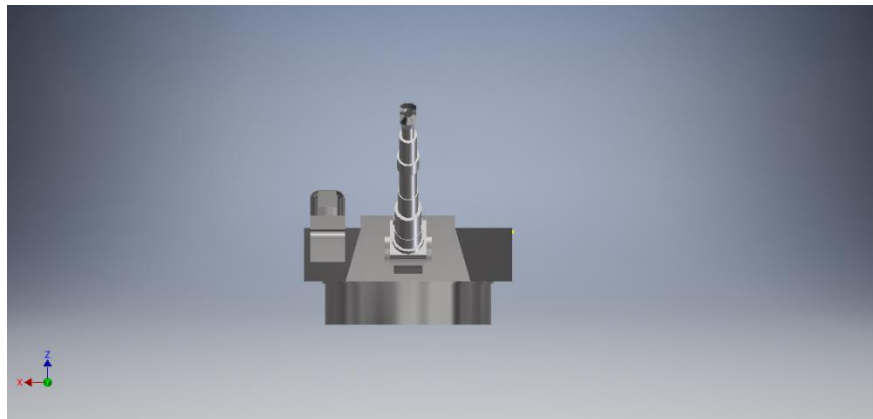


**Gambar 4.5 Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

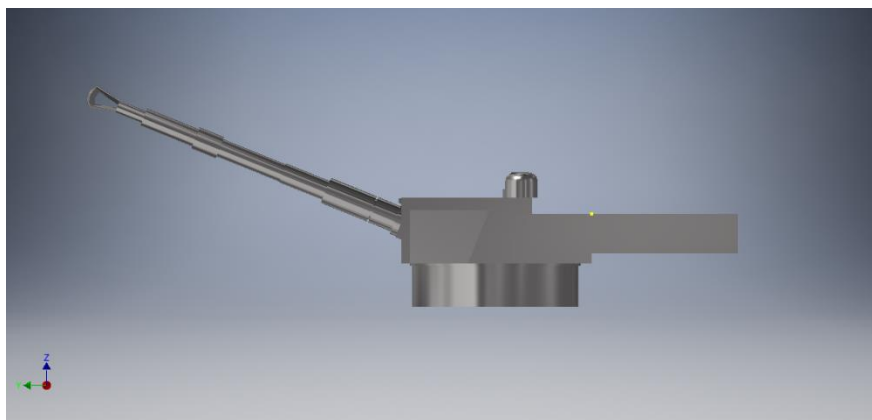
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



**Gambar 4.6 Tampak Atas Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**  
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



**Gambar 4.7 Tampak Depan Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**  
Sumber : Diolah Peneliti (2019)



**Gambar 4.8 Tampak Samping Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**  
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Pembuatan model 3D yang telah terbentuk pada Gambar 4.1 hingga Gambar 4.8 dibuat menggunakan ukuran-ukuran pada Tabel 4.1 yang dibentuk semirip mungkin dengan aslinya. Berikut spesifikasi tank secara umum untuk digunakan dalam pembuatan 3D CAD menggunakan *Inventor*:

**Tabel 4.1 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	<i>Mild Steel</i>	<i>Armox500T</i>

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

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

**Tabel 4.2 Spesifikasi *Gun Turret* dalam Model 3D**

No	Specification	Value
1	Panjang Turret	4 m
2	Lebar Turret	2 m
3	Panjang <i>Gun</i>	4 m
4	Dimeter <i>Gun</i>	105 mm
5	Massa Turret	5.5 ton
6	Massa <i>Gun</i>	2.5 ton
7	<i>Motor Inertia</i>	3288.419 $kgmm^2$
8	<i>Pinion Inertia</i>	1844.091 $kgmm^2$
9	<i>Gear Inertia</i>	175942.124 $kgmm^2$
10	<i>Load Inertia</i>	3835417233.827 $kgmm^2$
11	<i>Motor Shaft Stiffness</i>	1.16656759 $\cdot 10^4 Nm$
12	<i>Load side Torsional stiffness</i>	11.8056641 $\cdot 10^7 Nm$

13	<i>Motor shaft viscous dumping coefficient</i>	3.0
14	<i>Turnion bearings viscous coefficient</i>	10
15	Jumlah gigi pinion <i>Gun Turret</i>	25
16	Jumlah gigi gear <i>Gun Turret</i>	65
17	<i>Ratio Gear (N)</i>	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 ada tabel 4.2, 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*.

Tabel 4.3 dan tabel 4.4 merupakan data *inertia properties* yang telah didapatkan dari *software 3D Inventor* terdapat tiga kelompok data *inertia properties* yaitu *Inertial Properties Principal Moment*, *Inertial Properties global (mass moment)*, dan *Inertial Properties CG (mass moment)*. Pada kelompok data tersebut yang kita pakai adalah kelompok *Inertial Properties CG (mass moment)*, hal ini dikarenakan pada *Inertial Properties CG (mass moment)* merupakan inertia yang didapat dari bendanya secara langsung. Berikut ini adalah tabel *inertia properties* dari *Inventor*.

Tabel 4.3 *Inertia Properties* Komponen Gun Turret

NO	komponen	Keterangan					
		I1	I2	I3	Rx	Ry	Rz
1	<b><i>Inertial Properties Principal Moment</i></b>						
a	<i>Shaft Motor</i>	19491.115 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	3288.417 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1949.456 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-0.01 deg	-0.03 deg	0 deg
b	<i>gear</i>	28779.479 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	175942.124 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	148544.284 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 deg	0 deg	0 deg
c	<i>pinion</i>	1844.091 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1086.841 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1086.508 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 deg	-0.01 deg	0 deg
d	<i>Load</i>	3.835735726544E+09 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	70207091.989 kg mm <sup>2</sup>	3.834915308847E+09 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-0.07 deg	-37.13 deg	0.16 deg
2	<b><i>Inertial Properties global (mass moment)</i></b>						
a	<i>shaft motor</i>	423943.679 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	- 259128.750 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	129511.461 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	291618.709 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	161737.230 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	550589.991 <i>kgmm<sup>2</sup></i>

b	<i>gear</i>	779592.802 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-486410.938 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	97207.729 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	532481.620 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	144285.157 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1198227.214 <i>kgmm<sup>2</sup></i>
c	<i>pinion</i>	80863.586 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-20557.719 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	17205.889 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	42732.907 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	38892.153 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	56649.557 <i>kgmm<sup>2</sup></i>
d	<i>Load</i>	3.881064185682E+09 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-305259129.288 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	- 4657126.232 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1998718001.667 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1447488.150 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	5.809331212204E+09 <i>kgmm<sup>2</sup></i>
3	<b><i>Inertial Properties CG (mass moment)</i></b>	<b><i>Ixx</i></b>	<b><i>Ixy</i></b>	<b><i>Ixz</i></b>	<b><i>Iyy</i></b>	<b><i>Iyz</i></b>	<b><i>Izz</i></b>
a	<i>shaft motor</i>	19491.115 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-0.002 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	3288.419 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-4.142 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	19491.455 <i>kgmm<sup>2</sup></i>
b	<i>gear</i>	28779.479 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	175942.124 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	148544.284 <i>kgmm<sup>2</sup></i>
c	<i>pinion</i>	1844.091 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-0.142 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1086.841 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	0 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	1086.508 <i>kgmm<sup>2</sup></i>
d	<i>Load</i>	3835417233.827 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-8592554.330 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	-390013.656 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	70227875.677 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	2103916.644 <i>kgmm<sup>2</sup></i>	3.835213017877E+09 <i>kgmm<sup>2</sup></i>

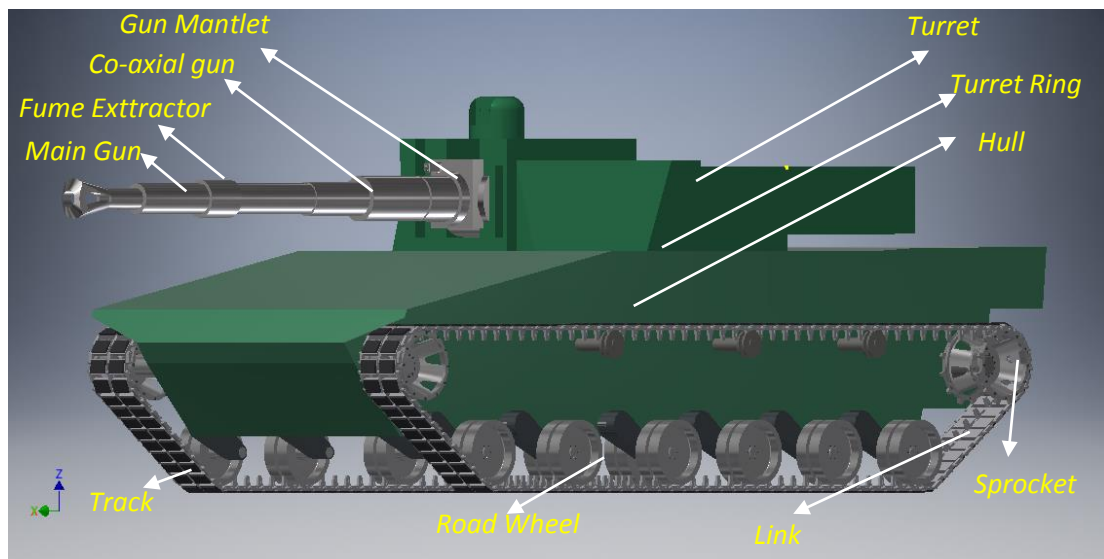
Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Tabel 4.4 Kelengkapan Komponen *Gun Turret*

Komponen	material	Shear modulus	Inertial polar moment	stiffness	Volume	Luas Area	Panjang	center of gravity			massa
								x	y	z	
<i>shaft motor</i>	<i>steel, mild</i>	77 Gpa	3.8330078 $\cdot 10^{-8} m^4$	1.16656759 $\cdot 10^4 Nm$	71628.508 $mm^3$	52495.127 $mm^2$	253 mm	-192.089 <i>mm</i>	-239.903 <i>mm</i>	119.902 <i>mm</i>	5.623 kg
<i>gear</i>	<i>steel, mild</i>	77 Gpa	-	-	660018.574 $mm^3$	123932.786 $mm^2$		-251.494 <i>mm</i>	-373.292 <i>mm</i>	74.601 <i>mm</i>	5.181 kg
<i>pinion</i>	<i>steel, mild</i>	77 Gpa	-	-	206903.667 $mm^3$	35146.346 $mm^2$		-74.830 <i>mm</i>	-169.145 <i>mm</i>	141.568 <i>mm</i>	1.624 kg
<i>Load</i>	<i>steel, mild</i>	77 Gpa	0.0061328125 $m^4$	11.8056641 $\cdot 10^7 Nm$	327557040 $mm^3$	7623014.196 $mm^2$	4 m	866.023 <i>mm</i>	133.224 <i>mm</i>	1.916 mm	2571.323 kg

Sumber : Diolah Peneliti (2019)

#### 4.1.2 Komponen-komponen *Tank*



**Gambar 4.9** 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. *Hull* memiliki pelat baja dengan ketebalan yang berbeda disetiap sisi. Biasanya pengemudi duduk dalam bagian dalam *Hull* bersamaan dengan operator radio. Sedangkan bagian belakang dari *Hull* digunakan untuk menyimpan mesin, bahan bakar, dan transmisi.

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. Di dalam keranjang turret sebagian besar digunakan untuk tempat duduk *crew* (komandan, penembak dan pemuat).

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. Selain itu tank juga memiliki senapan koaksial atau yang biasa disebut dengan senapan mesin yang terpasang pada *turret*.

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.

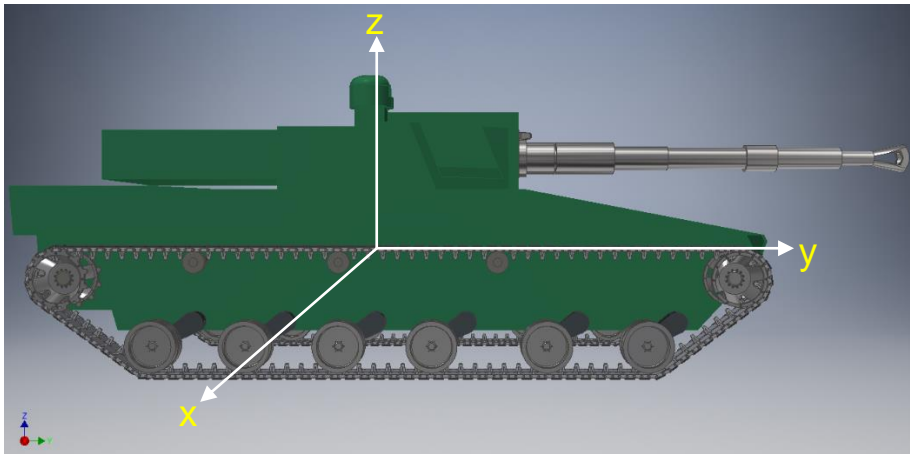
## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 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 menggerakkan *elevating mass (Gun assy)*, dan satu motor lagi digunakan untuk menggerakkan 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

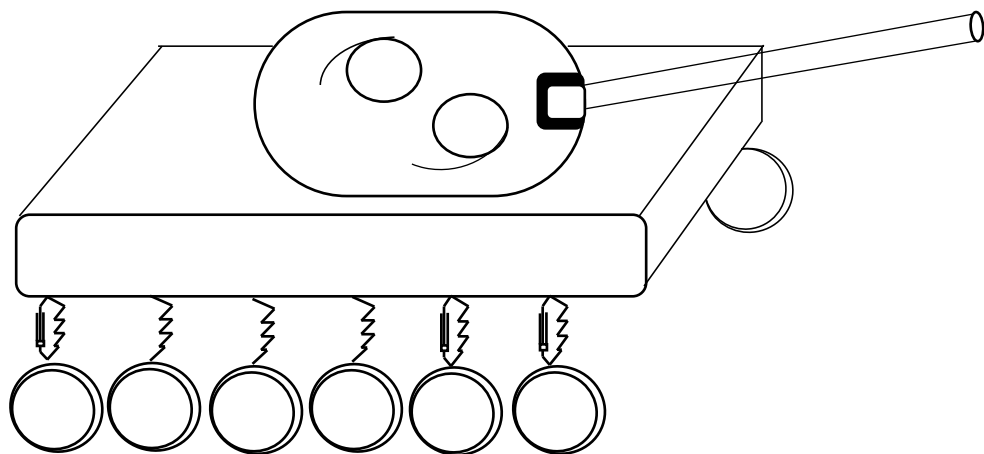
Harimau Pindad (FNSS Pindad). Persamaan gerak yang dihasilkan yaitu diturunkan dari persamaan Lagrange.



**Gambar 4.10 Free Body Diagram FNSS Medium Tank Pindad-Turki Model CAD**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Gerakan dinamis yang dari suspensi platform menghasilkan tiga gerakan yaitu *pitch*, *bouncing*, dan *roll*.



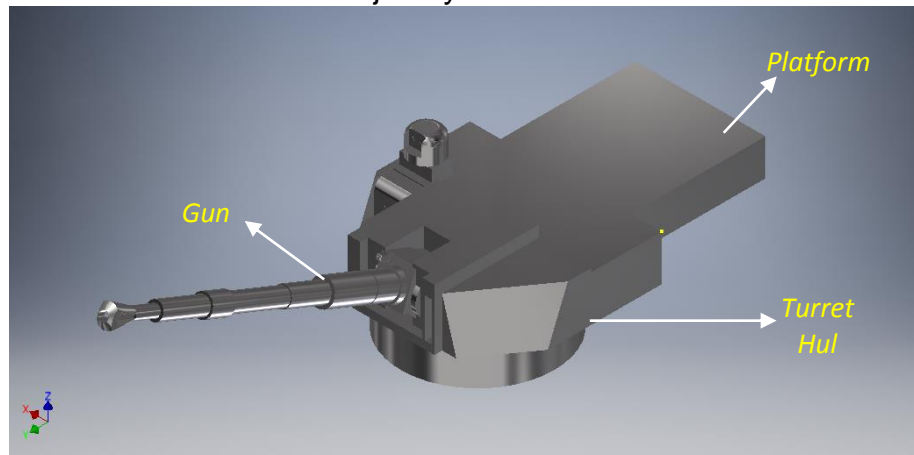
**Gambar 4.11 Skematik suspensi Tank**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)

a. Permodelan *dinamis*

Secara umum *Gun Turret* yang digunakan pada kendaraan militer 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.

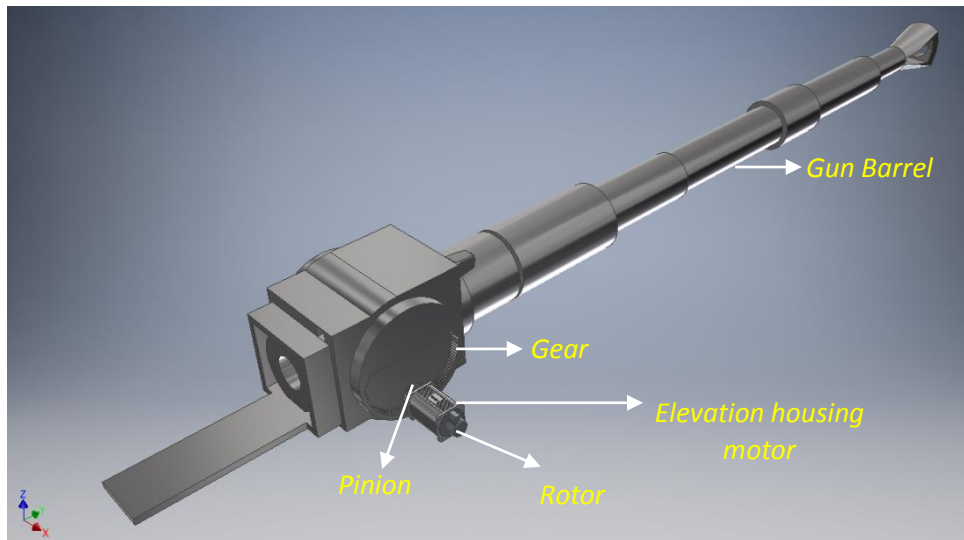


**Gambar 4.12 Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Fungsi dari komponen-komponen tersebut yang terdapat pada Gambar 4.12, seperti contohnya *Turret Hull* memiliki fungsi sebagai bingkai turret yang tidak bisa terangkat atau *Fixed components*. *Turret Hull* biasanya di pasang pada *chassis* kendaraan. Selain itu, terdapat rotor yang berfungsi sebagai komponen utama untuk menggerakkan sumbu elevasi pada komponen. Letak posisi dari rotor terhubung dengan *Turret Hull* yang disambungkan oleh bantalan. Komponen berikutnya terdapat poros pinion atau bagian terkecil dari komponen *gear* dalam motor untuk sumbu elevasi. Fungsi dari poros pinion di *Gun Turret* adalah untuk mentransmisikan torsi motor ke sisi beban yang melalui *sector gear*. *Sector gear* yang saling terkait dengan pinion dapat meningkatkan torsi yang akan tersalurkan ke sisi beban. Dalam komponen *Gun Turret* terdapat laras senjata yang berbentuk tabung dimana tempat keluarnya sebuah amunisi dari senjata.

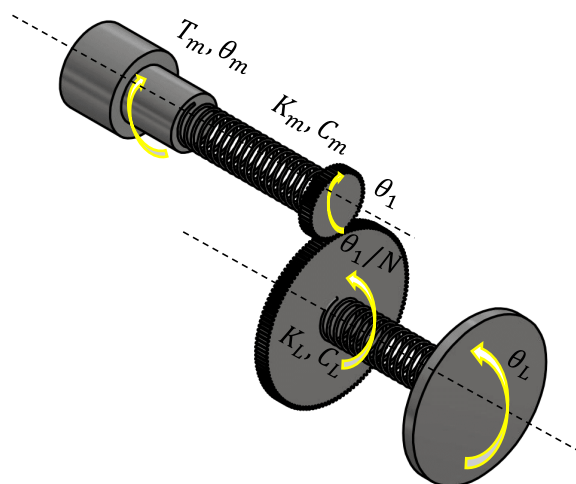
Dalam memodelkan dinamik gerak *Gun Turret* untuk sumbu elevasi secara *3 degree of freedom*, maka untuk memudahkan pengamatan bagian dalam dari *Gun Turret*, kemudian dibedah menjadi tampilan skematik secara sederhana mengenai *Gun Turret* seperti pada gambar di bawah ini:



**Gambar 4.13 Skematik Gun Turret FNSS *Medium Tank* Pindad-Turki Model CAD**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Gambar 4.13 menjelaskan bahwa untuk *Gun Turret* bergerak dalam operasi sumbu elevasi maka digerakan oleh motor (*shaft motor* berputar), kemudian menggerakkan *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 4.14 Model CAD Elevasi Turret**

Sumber : Diolah Peneliti (2019)

Gambar 4.14 merupakan ilustrasi yang menggunakan notasi ilmiah dengan massa yang digabungkan (beban). Notasi ilmiah yang terdapat pada gambar 4.14, 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:

$$K_m = \frac{GJ}{L} \quad (4.1)$$

Dimana :

- $G$  adalah *shear modulus of rigidity*
- $J$  adalah *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 :

$$N = \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\dot{\theta}_1}{\dot{\theta}_2} = \frac{\ddot{\theta}_1}{\ddot{\theta}_2} \quad (4.2)$$

b. Persamaan Gerak *Lagrange*

Secara umum 'persamaan Lagrange dapat didefinisikan dengan

$$L = T - U \quad (4.3)$$

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

$$P_k - \frac{\partial T}{\partial q_k} + \frac{\partial U}{\partial q_k} + \frac{\partial D}{\partial q_k} = \overline{Q_k} \quad (4.4)$$

Dengan adanya pemilihan koordinat umum sebagai  $\theta_m, \theta_1, \theta_L$ , maka energi kinetik dari sistem yaitu sebagai berikut :

$$T = \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \quad (4.5)$$

energi potensial yang terbentuk adalah sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{2} k_m (\theta_m - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)^2 \quad (4.6)$$

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

$$D = \frac{1}{2} c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right)^2 \quad (4.7)$$

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

1. Energi Kinetik (T)

a) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan

(4.5), jika  $q_k = \theta_m$ , maka dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_m} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_m} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} &= I_m \dot{\theta}_m + 0 + 0 + 0 \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} &= I_m \dot{\theta}_m \end{aligned} \quad (4.8)$$

Kemudian persamaan (4.8) diturunkan terhadap waktu, menghasilkan :

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} (I_m \dot{\theta}_m) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_m} \right) &= I_m \ddot{\theta}_m\end{aligned}\quad (4.9)$$

b) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.6), jika  $q_k = \theta_1$ , maka dapat dirumuskan

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_1} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_1} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} &= 0 + I_1 \dot{\theta}_1 + I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} \right) + 0 \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} &= I_1 \dot{\theta}_1 + I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} &= \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) \dot{\theta}_1\end{aligned}\quad (4.10)$$

Kemudian persamaan (4.10) diturunkan terhadap waktu, menghasilkan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} \left( \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) \dot{\theta}_1 \right) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) \ddot{\theta}_1\end{aligned}\quad (4.11)$$

c) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.6), jika  $q_k = \theta_L$ , maka dapat dirumuskan

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_L} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} I_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} \right)^2 + \frac{1}{2} I_L \dot{\theta}_L^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_L} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} &= 0 + 0 + 0 + I_L \dot{\theta}_L \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} &= I_L \dot{\theta}_L\end{aligned}\quad (4.12)$$

Kemudian persamaan (412) diturunkan terhadap waktu, menghasilkan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} \right) &= \frac{\partial}{\partial t} (I_L \dot{\theta}_L) \\ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_L} \right) &= I_L \ddot{\theta}_L\end{aligned}\quad (4.13)$$

## 2. Energi Potensial (U)

a) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.7), jika  $q_k = \theta_m$ , maka dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} k_m (\theta_m - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)^2 \right)}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} k_m (\theta_m^2 - 2\theta_m \theta_1 + \theta_1^2) + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1^2}{N^2} - 2 \frac{\theta_1}{N} \theta_L + \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} k_m \theta_m^2 - \frac{1}{2} k_m \cdot 2 \theta_m \theta_1 + \frac{1}{2} k_m \theta_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} k_L \frac{\theta_1^2}{N^2} - \frac{1}{2} k_L \cdot 2 \frac{\theta_1}{N} \theta_L + \frac{1}{2} k_L \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} k_m \theta_m^2 - k_m \theta_m \theta_1 + \frac{1}{2} k_m \theta_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} k_L \frac{\theta_1^2}{N^2} - k_L \frac{\theta_1}{N} \theta_L + \frac{1}{2} k_L \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= \left( \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot k_m \theta_m - k_m \theta_1 \cdot 1 + 0 \right) + (0 - 0 + 0) \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= k_m \theta_m - k_m \theta_1 \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_m} &= k_m (\theta_m - \theta_1)\end{aligned}\quad (4.14)$$

b) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.7), jika  $q_k = \theta_1$ , maka dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} k_m (\theta_m - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)^2 \right)}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} k_m (\theta_m^2 - 2\theta_m \theta_1 + \theta_1^2) + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1^2}{N^2} - 2 \frac{\theta_1}{N} \theta_L + \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} k_m \theta_m^2 - \frac{1}{2} k_m \cdot 2 \theta_m \theta_1 + \frac{1}{2} k_m \theta_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} k_L \frac{\theta_1^2}{N^2} - \frac{1}{2} k_L \cdot 2 \frac{\theta_1}{N} \theta_L + \frac{1}{2} k_L \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} k_m \theta_m^2 - k_m \theta_m \theta_1 + \frac{1}{2} k_m \theta_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} k_L \frac{\theta_1^2}{N^2} - k_L \frac{\theta_1}{N} \cdot \theta_L + \frac{1}{2} k_L \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= \left( 0 - k_m \theta_m \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot k_m \theta_1 \right) + \left( \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot k_L \frac{\theta_1}{N^2} - k_L \frac{1}{N} \cdot \theta_L + 0 \right) \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= (-k_m \theta_m + k_m \theta_1) + \left( k_L \frac{\theta_1}{N^2} - k_L \frac{1}{N} \cdot \theta_L \right) \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_1} &= -k_m \theta_m + \theta_1 \left( k_m + \frac{k_L}{N^2} \right) - \frac{k_L}{N} \cdot \theta_L\end{aligned}$$

- c) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.7), jika  $q_k = \theta_L$ , maka dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} k_m (\theta_m - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)^2 \right)}{\partial \theta_L} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} k_m (\theta_m^2 - 2\theta_m \theta_1 + \theta_1^2) + \frac{1}{2} k_L \left( \frac{\theta_1^2}{N^2} - 2 \cdot \frac{\theta_1}{N} \cdot \theta_L + \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_L} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} k_m \theta_m^2 - \frac{1}{2} k_m \cdot 2 \cdot \theta_m \theta_1 + \frac{1}{2} k_m \theta_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} k_L \frac{\theta_1^2}{N^2} - \frac{1}{2} k_L \cdot 2 \cdot \frac{\theta_1}{N} \cdot \theta_L + \frac{1}{2} k_L \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_L} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} k_m \theta_m^2 - k_m \theta_m \theta_1 + \frac{1}{2} k_m \theta_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} k_L \frac{\theta_1^2}{N^2} - k_L \frac{\theta_1}{N} \cdot \theta_L + \frac{1}{2} k_L \theta_L^2 \right) \right)}{\partial \theta_L} \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= 0 = 0 + 0 + 0 - k_L \frac{\theta_1}{N} + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot k_L \theta_L \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= -k_L \frac{\theta_1}{N} + k_L \theta_L \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_L} &= -k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)\end{aligned} \tag{4.16}$$

### 3. Energi Disipasi (D)

- a) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.8), jika  $q_k = \theta_m$ , maka dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}\frac{\partial D}{\partial \theta_m} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} c_m (\theta_m - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)^2 \right)}{\partial \theta_m} \\ \frac{\partial D}{\partial \theta_m} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m (\theta_m^2 - 2\theta_m \theta_1 + \theta_1^2) + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\theta_1^2}{N^2} - 2 \cdot \frac{\theta_1}{N} \cdot \theta_L + \theta_L^2 \right) \right) \right)}{\partial \theta_m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_m} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_m^2 - \frac{1}{2} c_m \cdot 2 \cdot \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} c_L \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - \frac{1}{2} c_L \cdot 2 \cdot \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_m} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_m} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_m^2 - c_m \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} c_L \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_m} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_m} &= \left( \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot c_m \dot{\theta}_m - c_m \cdot 1 \cdot \dot{\theta}_1 + 0 \right) + (0 - 0 + 0) \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_m} &= c_m \dot{\theta}_m - c_m \dot{\theta}_1 \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_m} &= c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) \tag{4.17}
\end{aligned}$$

- b) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.8), jika  $q_k = \theta_1$ , maka dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right)^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_1} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m (\dot{\theta}_m^2 - 2 \cdot \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1^2) \right) + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - 2 \cdot \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_1} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_m^2 - \frac{1}{2} c_m \cdot 2 \cdot \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} c_L \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - \frac{1}{2} c_L \cdot 2 \cdot \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_1} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_m^2 - c_m \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} c_L \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_1} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= \left( 0 - c_m \dot{\theta}_m \cdot 1 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot c_m \dot{\theta}_1 \right) + \left( \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} - c_L \frac{1}{N} \dot{\theta}_L + 0 \right) \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= -c_m \dot{\theta}_m + c_m \dot{\theta}_1 + c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N^2} - c_L \frac{1}{N} \dot{\theta}_L \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= -c_m \dot{\theta}_m + \left( c_m + \frac{c_L}{N^2} \right) \dot{\theta}_1 - \frac{c_L}{N} \dot{\theta}_L \tag{4.18}
\end{aligned}$$

- c) Berdasarkan persamaan energi kinetik pada persamaan (4.8), jika  $q_k = \theta_L$ , maka dapat dirumuskan:

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} = \frac{\partial \left( \frac{1}{2} c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right)^2 \right)}{\partial \dot{\theta}_L}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{2} c_m (\dot{\theta}_m^2 - 2 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1^2) + \frac{1}{2} c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - 2 \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_L} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_m^2 - \frac{1}{2} c_m \cdot 2 \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} c_L \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - \frac{1}{2} c_L \cdot 2 \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_L} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_m^2 - c_m \dot{\theta}_m \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} c_m \dot{\theta}_1^2 \right) + \left( \frac{1}{2} c_L \frac{\dot{\theta}_1^2}{N^2} - c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N} \dot{\theta}_L + \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L^2 \right) \right)}{\partial \dot{\theta}_L} \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} &= (0 - 0 + 0) + \left( 0 - c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N} \cdot 1 + 2 \cdot \frac{1}{2} c_L \dot{\theta}_L \right) \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} &= -c_L \frac{\dot{\theta}_1}{N} + c_L \dot{\theta}_L \\
\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_L} &= -c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right) \tag{4.19}
\end{aligned}$$

4. Mengasumsikan bahwa

$$\overline{Q}_k = T_m \tag{4.20}$$

Persamaan-persamaan di atas merupakan penerapan persamaan Lagrange untuk setiap koordinat umum yang dipilih, dan kemudian akan dibentuk dalam sebuah matriks. Akan tetapi untuk mempermudah penyusunan matriks persamaan gerak dinamis. Hal pertama yang dilakukan adalah menyusun setiap elemen matriksnya, yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan baris pertama matriks adalah dari persamaan (4.8), (4.14), (4.17) substitusi ke persamaan (4.20)

$$\begin{aligned}
\text{➤ } & (I_m \ddot{\theta}_m) + c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) + k_m (\theta_m - \theta_1) = T_m \\
\text{➤ } & (I_m \ddot{\theta}_m + 0 \cdot \ddot{\theta}_1 + 0 \cdot \ddot{\theta}_L) + (c_m \dot{\theta}_m - c_m \dot{\theta}_1 + 0 \cdot \dot{\theta}_L) + (k_m \theta_m - \\
& k_m \theta_1 + 0 \cdot \theta_L) = T_m \tag{4.21}
\end{aligned}$$

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
I_m \ddot{\theta}_m &= T_m - c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) - k_m (\theta_m - \theta_1) \\
\dot{\theta}_m &= \frac{T_m - c_m (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) - k_m (\theta_m - \theta_1)}{I_m}
\end{aligned}$$

$$\ddot{\theta}_m = \frac{1}{I_m} (T_m - c_m(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_1) - k_m(\theta_m - \theta_1)) \quad (4.22)$$

2. Menentukan baris kedua matriks adalah dari persamaan (4.10), (4.15), (4.18) substitusi ke persamaan (4.20)

$$\begin{aligned} &\triangleright \left( \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) \ddot{\theta}_1 \right) + (-c_m \dot{\theta}_m + (c_m + \frac{c_L}{N^2}) \dot{\theta}_1 - \frac{c_L}{N} \dot{\theta}_L) + (-k_m \theta_m + \\ &\quad \theta_1 (k_m + \frac{k_L}{N^2}) - \frac{k_L}{N} \cdot \theta_L) = 0 \\ &\triangleright \left( 0 \cdot \ddot{\theta}_m + \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) \ddot{\theta}_1 + 0 \cdot \ddot{\theta}_L \right) + (-c_m \dot{\theta}_m + (c_m + \frac{c_L}{N^2}) \dot{\theta}_1 - \frac{c_L}{N} \dot{\theta}_L) + \\ &\quad (-k_m \theta_m + \theta_1 (k_m + \frac{k_L}{N^2}) - \frac{k_L}{N} \cdot \theta_L) = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Maka diperoleh

$$\begin{aligned} \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) \ddot{\theta}_1 &= c_m \dot{\theta}_m - (c_m + \frac{c_L}{N^2}) \dot{\theta}_1 + \frac{c_L}{N} \dot{\theta}_L + k_m \theta_m - \theta_1 (k_m + \frac{k_L}{N^2}) + \\ &\quad \frac{k_L}{N} \cdot \theta_L \\ \ddot{\theta}_1 &= \frac{c_m \dot{\theta}_m - (c_m + \frac{c_L}{N^2}) \dot{\theta}_1 + \frac{c_L}{N} \dot{\theta}_L + k_m \theta_m - \theta_1 (k_m + \frac{k_L}{N^2}) + \frac{k_L}{N} \cdot \theta_L}{I_1 + \frac{I_2}{N^2}} \end{aligned} \quad (4.24)$$

3. Menentukan baris ketiga matriks adalah dari persamaan (4.12), (4.16), (4.19) substitusi ke persamaan (4.20)

$$\begin{aligned} &\triangleright (I_L \ddot{\theta}_L) + \left( -c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right) \right) + \left( -k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right) \right) = 0 \\ &\triangleright \left( 0 \cdot \ddot{\theta}_m + 0 \cdot \ddot{\theta}_1 + I_L \ddot{\theta}_L \right) + \left( 0 \cdot \dot{\theta}_m - \frac{c_L}{N} \dot{\theta}_1 + c_L \dot{\theta}_L \right) + \left( 0 \cdot \theta_m - \frac{k_L}{N} \theta_1 + \right. \\ &\quad \left. k_L \theta_L \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Maka diperoleh

$$\begin{aligned} I_L \ddot{\theta}_L &= c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right) + k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right) \\ \ddot{\theta}_L &= \frac{c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right) + k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right)}{I_L} \\ \ddot{\theta}_L &= \frac{1}{I_L} \left( c_L \left( \frac{\dot{\theta}_1}{N} - \dot{\theta}_L \right) + k_L \left( \frac{\theta_1}{N} - \theta_L \right) \right) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Ketika semua elemen matriks tersusun, maka dari persamaan (4.21), (4.23), (4.25), diperoleh matriks persamaan gerak dinamis adalah sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} I_m & 0 & 0 \\ 0 & I_1 + \frac{I_2}{N^2} & 0 \\ 0 & 0 & I_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_m \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_m & -c_m & 0 \\ -c_m & (c_m + \frac{c_L}{N^2}) & -\frac{c_L}{N} \\ 0 & -\frac{c_L}{N} & c_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_m & -k_m & 0 \\ -k_m & (k_m + \frac{k_L}{N^2}) & \frac{k_L}{N} \\ 0 & -\frac{k_L}{N} & k_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_m \\ \theta_1 \\ \theta_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} T_m \quad (4.27)$$

Dengan mendefinisikan :

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

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

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

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

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

Secara umum persamaan (4.27), dapat ditulis menjadi

$$M[\ddot{\theta}] + C[\dot{\theta}] + K[\theta] = [I_d][u] \quad (4.28)$$

Kemudian, dari persamaan (4.28) 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:

$$\dot{x} = Ax + BU \quad (4.29)$$

$$y = Cx + DU \quad (4.30)$$

Untuk mendapatkan persamaan *State Space* dari persamaan gerak dinamis turret pada tank, maka dari persamaan (4.28) disimpulkan bahwa :

- $x_1 = \theta_m$
- $x_2 = \theta_1$
- $x_3 = \theta_L$
- $x_4 = \dot{\theta}_m$
- $x_5 = \dot{\theta}_1$
- $x_6 = \dot{\theta}_L$
- $\dot{x}_1 = \dot{\theta}_m = x_4$
- $\dot{x}_2 = \dot{\theta}_1 = x_5$
- $\dot{x}_3 = \dot{\theta}_L = x_6$
- $\dot{x}_4 = \ddot{\theta}_m = -Cx_4.M^{-1} - Kx_1.M^{-1} + I_d(U).M^{-1}$
- $\dot{x}_5 = \ddot{\theta}_1 = -Cx_5.M^{-1} - Kx_2.M^{-1} + I_d(U).M^{-1}$
- $\dot{x}_6 = \ddot{\theta}_L = -Cx_6.M^{-1} - Kx_3.M^{-1} + I_d(U).M^{-1}$

Output yang ingin dihasilkan dari persamaan *state space* adalah sebagai berikut:

$$y = x_6 \quad (4.31)$$

Sehingga dapat dituliskan ke dalam format matriks yaitu sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + BU \quad (4.32)$$

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

atau dapat disederhanakan menjadi seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0]_{3 \times 3} & [I]_{3 \times 3} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0]_{3 \times 1} \\ M^{-1}.I_d \end{bmatrix} U \quad (4.33)$$

Dengan mendefinisikan

a) Determinan dari matriks M

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

$$\det M = I_m \left( I_1 + \frac{I_2}{N^2} \right) I_L$$

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

b) Matriks A

$$A = \begin{bmatrix} [0]_{3 \times 3} & [I]_{3 \times 3} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

c) Matriks B

$$B = \begin{bmatrix} [0]_{3 \times 1} \\ M^{-1} \cdot I_d \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

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

$$x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \theta_1 \\ \theta_L \\ \dot{\theta}_m \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_L \end{bmatrix} \text{ atau } x = [\theta_m \quad \theta_1 \quad \theta_L \quad \dot{\theta}_m \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_L]^T \quad (4.38)$$

*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 :

$$y = Cx + DU \quad (4.39)$$

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

$$D = 0$$

c. Simulasi menggunakan *Open Loop System*

Hasil simulasi 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 :

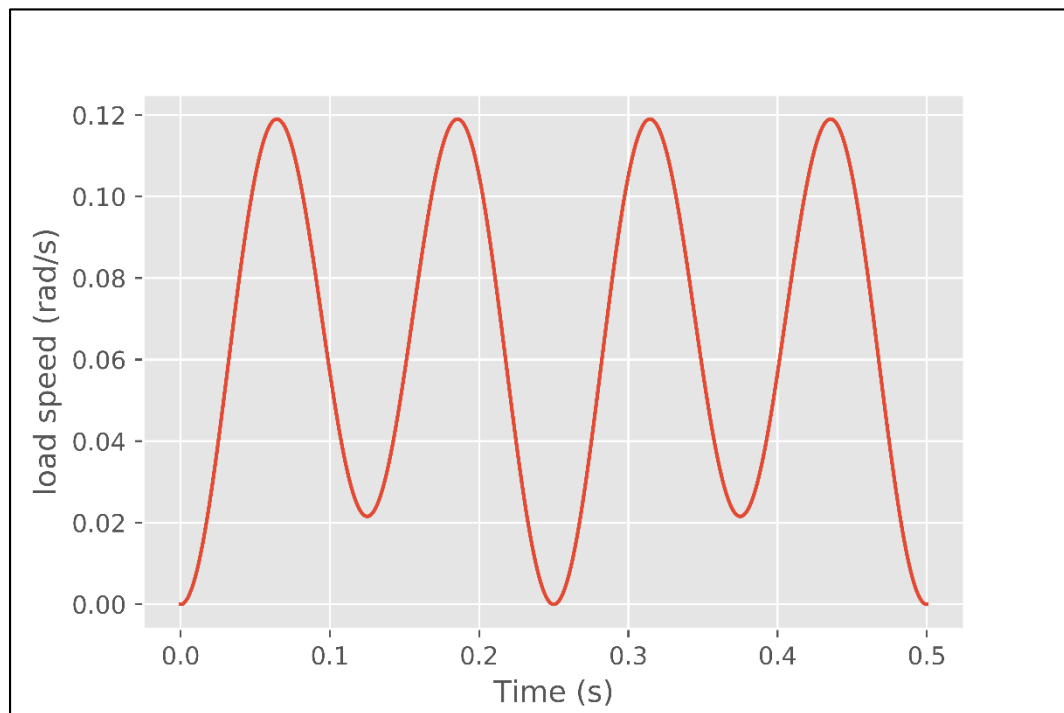
**Tabel 4.5 Parameter *Gun Turret***

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

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Parameter yang terdapat pada tabel 4.5 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* (Lampiran 4 dan 5). Torsi

motor untuk *Low frequency Excitation* yaitu  $T_m(t) = 4000 \sin(8 \times 2\pi t) + 400 \sin(4 \times 2\pi t)$ .

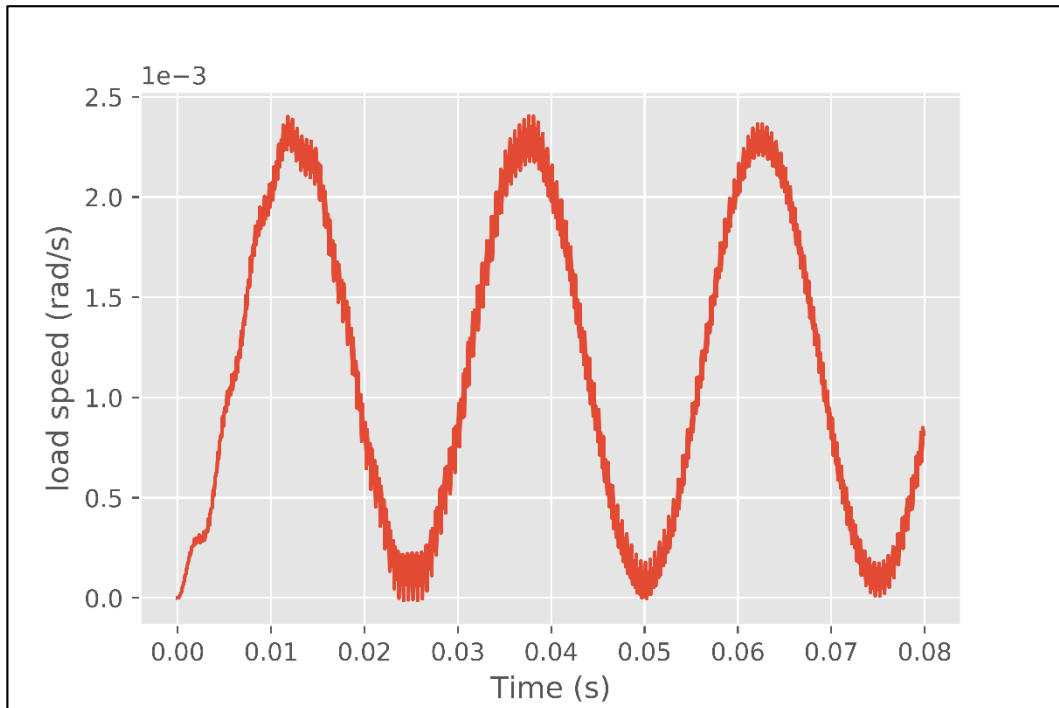


**Gambar 4.15 Load Speed vs Time (Low Frequency Excitation)**

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Torsi motor pada *low frequency Excitation* yang terdapat pada gambar 4.15 maka dapat dikatakan bahwa dengan frekuensi torsi motor yang kecil maka kecepatan yang dihasilkan lambat dan waktu yang diperlukan lambat.

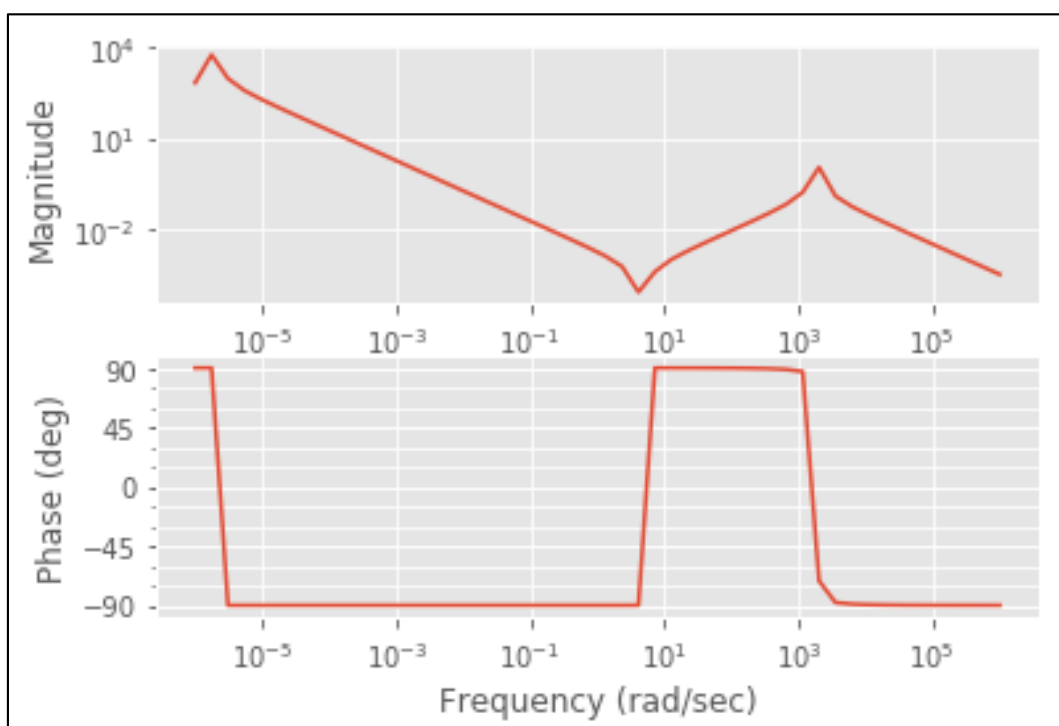
Torsi motor juga disimulasikan pada frekuensi tinggi. Hal ini memiliki tujuan untuk melihat kecepatan dan waktu yang diperlukan pada saat torsi motor saat berada frekuensi tertinggi. Terlihat pada gambar 4.16, jika diberikan torsi motor dengan frekuensi tinggi maka kecepatan yang dihasilkan akan sangat cepat dan waktu juga semakin mengecil, artinya pemberian frekuensi tinggi akan memberikan adanya percepatan dan hal ini dapat berakibat membuat adanya ketidakstabilan pada saat melakukan operasi secara elevasi. Berikut ini torsi motor untuk *High frequency Excitation* yaitu  $T_m(t) = 4000 \sin(4000 \times 2\pi t) + 400 \sin(40 \times 2\pi t)$ .



**Gambar 4.16 Load Speed vs Time (High Frequency Excitation)**

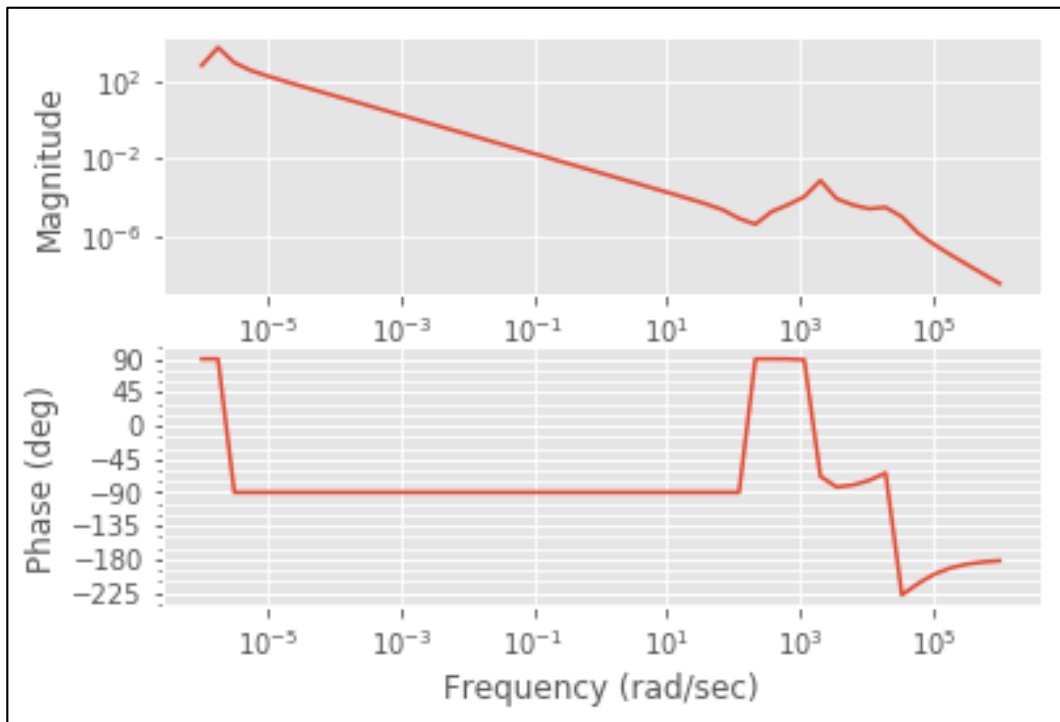
Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Untuk *meningkatkan* frekuensi eksitasinya, perbedaan tersebut dapat diamati dalam domain frekuensi sehingga jauh lebih mempermudah pengamatan. *Bode plots* akan sangat memungkinkan untuk menampilkan *transfers function* dari masing-masing keluaran yang diinginkan.

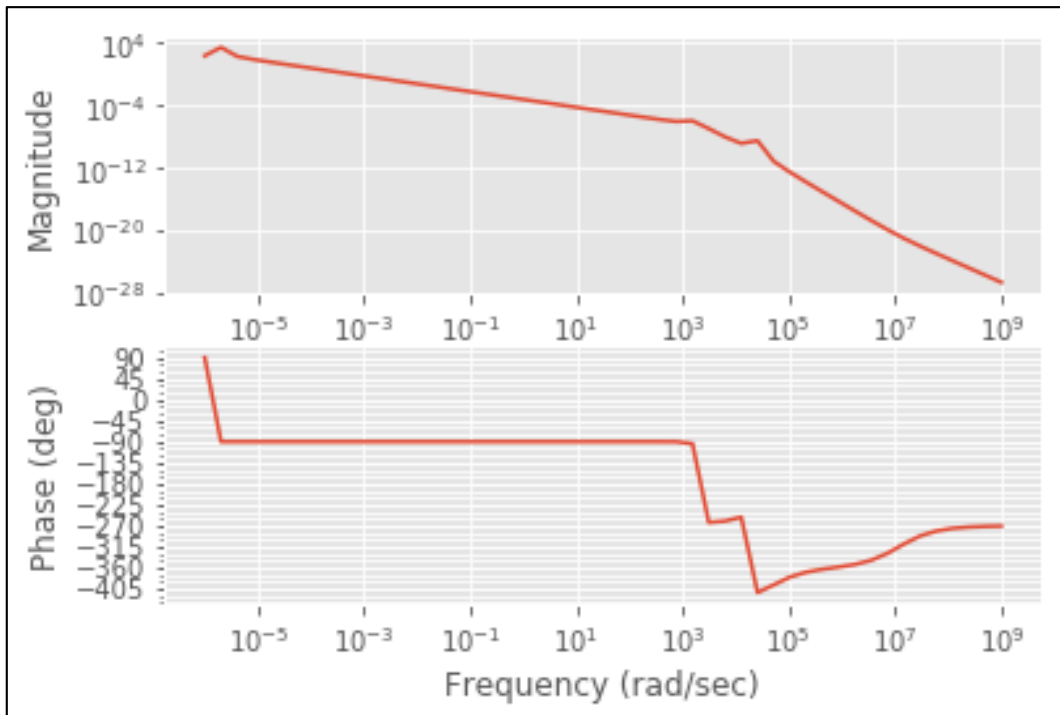


**Gambar 4.17 Bode Plot (Input Motor Torque, output motor speed)**

Sumber: Diolah Peneliti (2019)



**Gambar 4.18 Bode Plot (Input Motor Torque, output pinion speed)**  
 Sumber: Diolah Peneliti (2019)



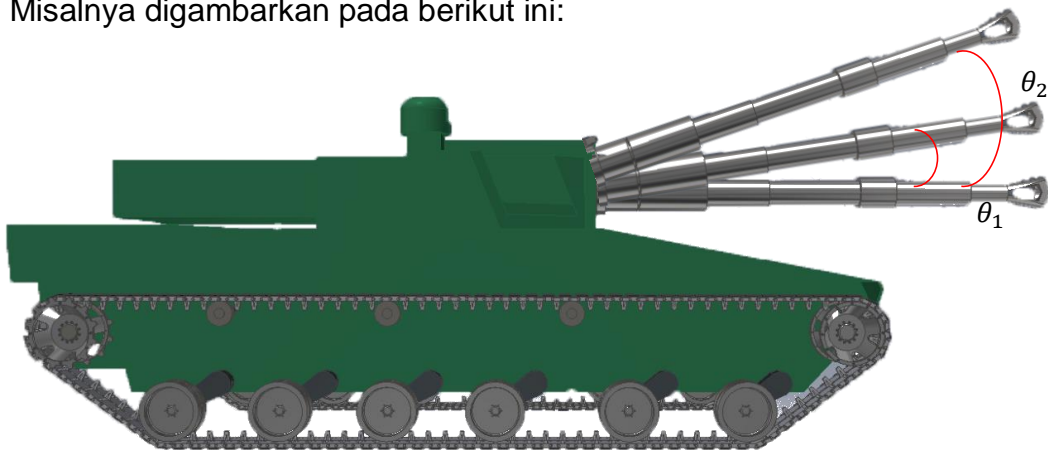
**Gambar 4.19 Bode Plot (Input Motor Torque, output Load speed)**  
 Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.17, gambar 4.18 dan gambar 4.19, 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 coefficient* tidak berpengaruh pada frekuensi resonansi, akan tetapi *Viscous damping coefficient* 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*.

#### 4.2.2 *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 gangguan yang dialami oleh turret. Misalnya digambarkan pada berikut ini:



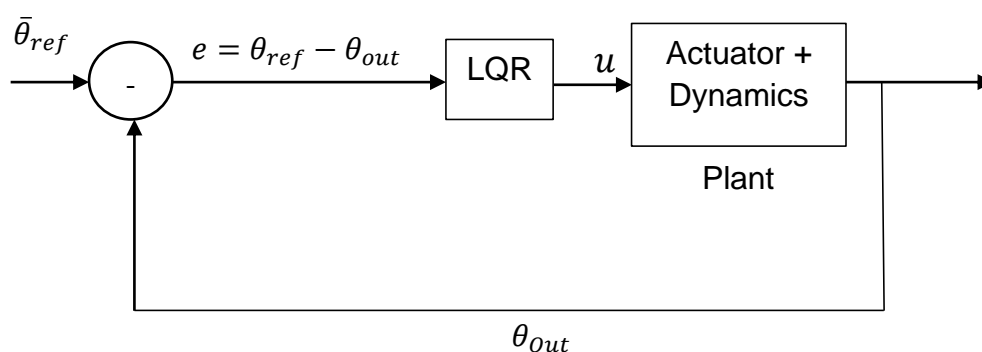
**Gambar 4.20 Ilustrasi Pergerakan Sumbu Elevasi Turret**

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

*Linear Quadratic Regulator (LQR)* merupakan salah satu metode sistem 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* (Lampiran 7). Nilai R yang diambil yaitu 0.5, sedangkan matriks Q yang diambil adalah sebagai berikut:

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

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

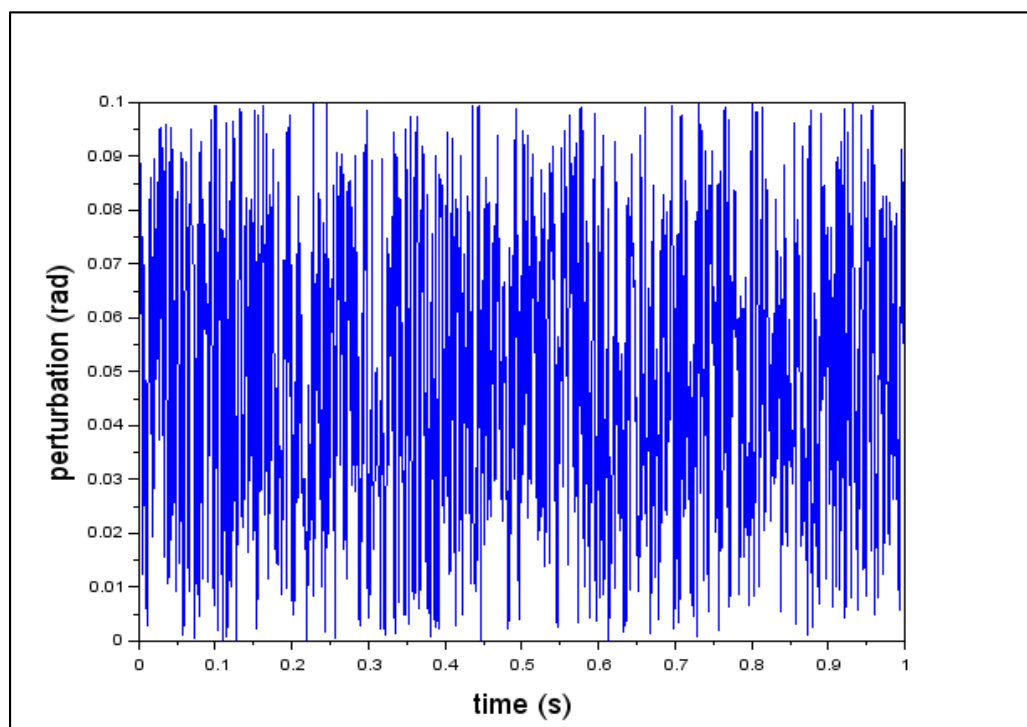


**Gambar 4.21 Diagram blok kontrol LQR pada Turret**

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Berdasarkan gambar 4.21 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 (*Perturbation random*). Berikut simulasi dari *perturbation random*:



**Gambar 4.22 Simulasi *Perturbation Random* dari *Gun Turret***

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

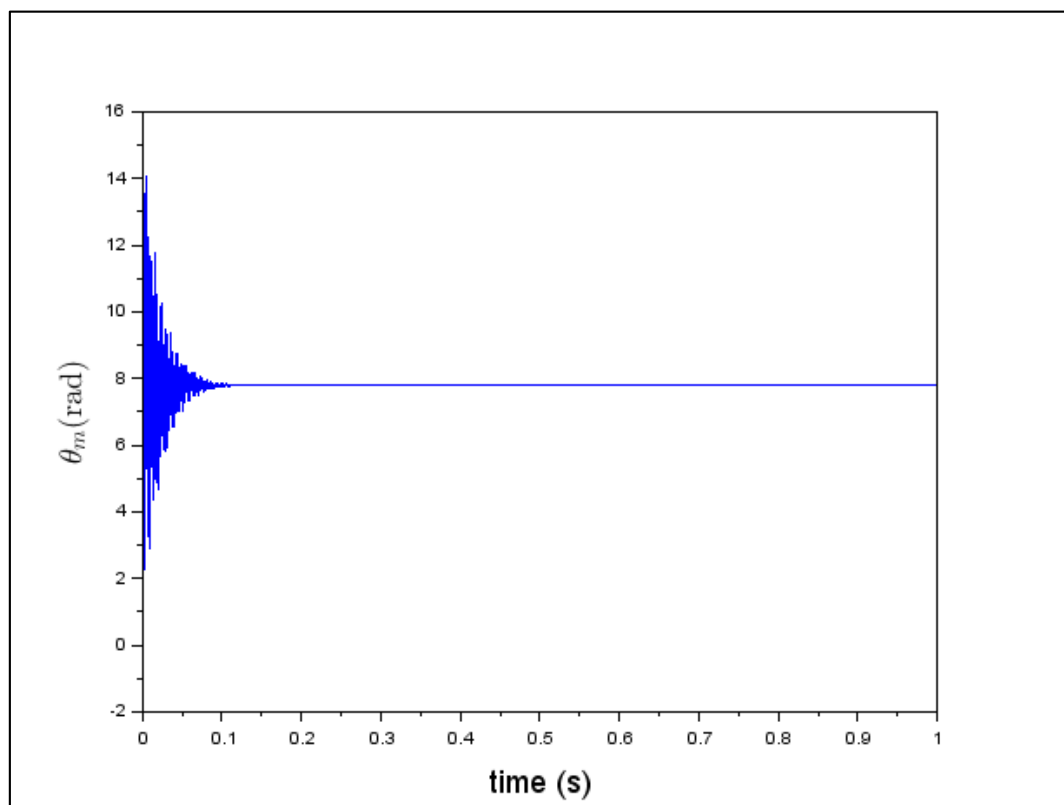
Berdasarkan gambar 4.22, dapat dilihat bahwa gangguan bersifat sementara *uniform* pada 0 sampai 0.1 radian. Jika dilihat dari nilai gangguan bersifat sementara tersebut, maka untuk memaksimalkan tingkat kestabilan dari *close-loop*, maka yang harus dilakukan adalah dengan nilai *Eigen* pada *close-loop* dengan bagian *real*/harus memiliki nilai negatif ( $R(\lambda) < 0$ ). Dari parameter-parameter yang digunakan, maka didapatkan nilai *Eigen* ( $A$ ) menggunakan bantuan *Scilab 6.0.2* (Lampiran 7) adalah sebagai berikut:

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

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

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

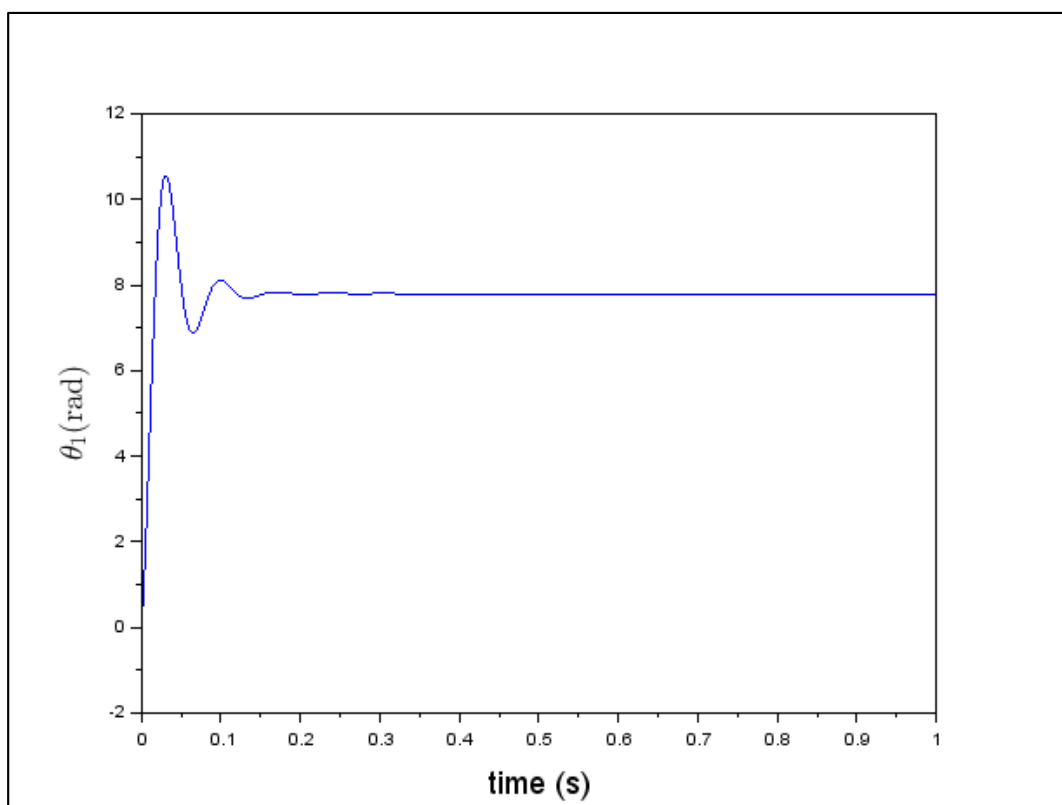
Simulasi stabilitas dalam mengontrol sudut elevasi dari 3 *degree of freedom* menggunakan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) disimulasikan dengan menggunakan *Software Python 3.6* (Lampiran 7). Berikut hasil gambar simulasi yang sudah dikontrol dengan memasukkan nilai Eigen yang telah didapatkan.



**Gambar 4.23 Hasil Simulasi kestabilan pada Motor**

Sumber: Diolah Peneliti, (2019)

Gambar 4.23 merupakan gambar simulasi kestabilan pada motor. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa motor mulai berjalan pada  $t = 0$ , sampai pada  $t$  mendekati  $t = 0,15$  dalam kondisi yang tidak stabil. Sedangkan kestabilan ditunjukkan 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.

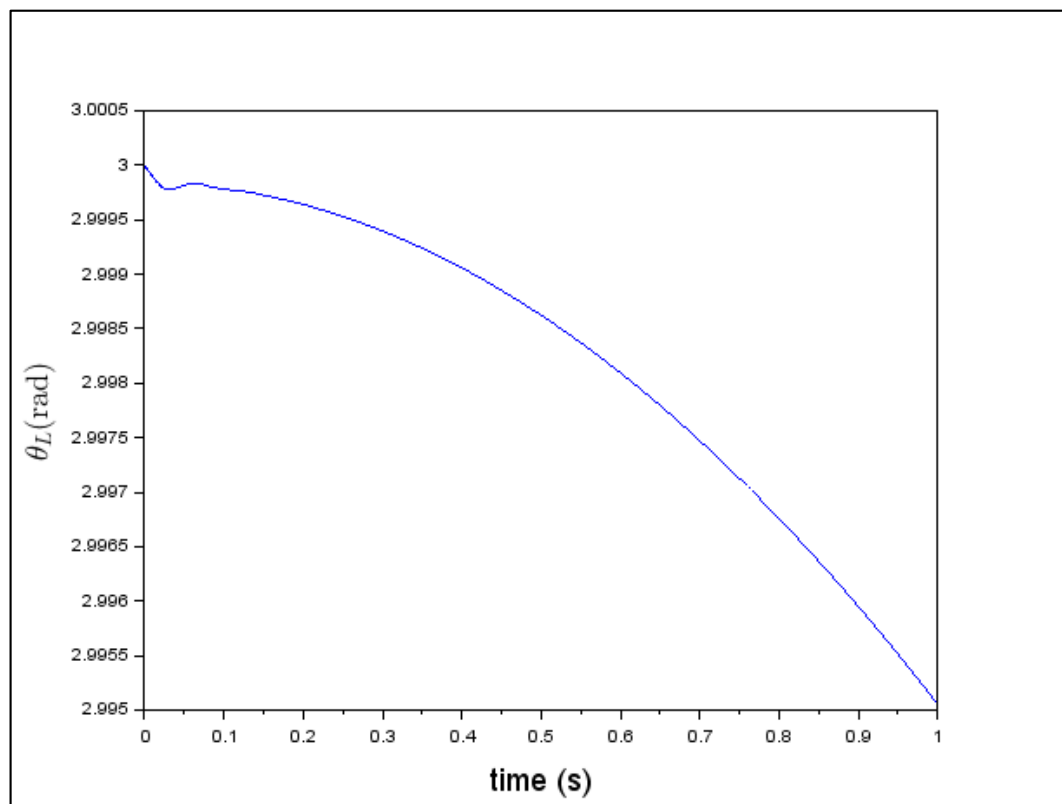


**Gambar 4.24 Hasil Simulasi kestabilan pada Pinion**

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Gambar 4.24 merupakan gambar simulasi kestabilan pada pinion. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa pinion mulai berjalan pada  $t = 0$ , sampai pada  $t$  mendekati  $t = 0,1$  dalam kondisi yang tidak stabil. Sedangkan kestabilan ditunjukkan 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 4.25 Hasil Simulasi kestabilan pada *Load***

Sumber: Diolah Peneliti (2019)

Gambar 4.25 merupakan gambar simulasi kestabilan pada *Load* atau *Gun*. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa *Gun* mulai berjalan pada  $t = 0$ , sampai pada  $t$  mendekati  $t = 0,05$  dalam kondisi yang tidak stabil. Sedangkan kestabilan ditunjukkan 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.

## BAB 5

### KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN

#### 5.1 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 Medium Tank FNSS-Pindad* adalah sebagai berikut :

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

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 *Linier quadratic Regulator* (LQR) seperti *motor*, *pinion*, dan *load/gun* menunjukkan 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.

## 5.2 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 otomatis.
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.

## 5.3 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 dikembangkan 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

- Anderson. D.O dan Moore. John B. 1969. *Optimal Control Linear Quadratic Methods*. United State Of America : Prentice-Hall, Inc.
- 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.
- Houpis, D’Azzo. 1988. *Linier Control System Analysis and Desaign*. USA: McGraw-Hill
- Katsuhikoogata. 1984. *Teknik Kontrol Automatik (sistem Pengaturan)*. Jakarta: Erlangga. Tersedia di <https://elektrofaw.blogspot.com/2017/10/teknik-kontrol-automatik-sistem.html>. Diakses pada tanggal 20 Juni 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
- Kementrian Pertahanan Republik Indonesia. 2006. *Indonesia 2005-2025 Buku Putih : Penellitian,Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Pertahanan dan Keamanan*. Jakarta : Kemenhan RI.
- Ladjamudin, Al-Bahra bin. 2005. *Analisis dan Desain Sistem Informasi*. Graha Ilmu : Yogyakarta.
- McGraw-Hill. 2005. *The Electronics Engineers’ Handbook, 5<sup>th</sup> Edition*. Tersedia di <https://www3.nd.edu/~pantsakl/Publications/348A-EEHandbook05.pdf>. Diakses pada tanggal 22 Juli 2018.

- Purnama, Chandra. 2016. *Sistem Informasi Manajemen*. Jakarta: Insan Global. ISBN: 978-602-8313-24-0. Tersedia di [http://dosen.stie-alanwar.ac.id/file/content/2018/04/chamdan\\_Purnama\\_sistem\\_informasi\\_manajemen\\_isbn\\_978-602-8313-24-0\\_chamdan.pdf](http://dosen.stie-alanwar.ac.id/file/content/2018/04/chamdan_Purnama_sistem_informasi_manajemen_isbn_978-602-8313-24-0_chamdan.pdf). Diakses pada tanggal 10 Agustus 2018.
- Suyuti, Muhammad Arsyad & Nur, Rusdi. 2018. *Perancangan Mesin-mesin Industri*. ISBN: 6024537271, 9786024537272. Deepublish: Jakarta. Tersedia di <https://books.google.co.id/books?id=SJ1LDwAAQBAJ&pg=PA5&pg=PA5&dq>. Diakses pada tanggal 10 Agustus 2018.
- Tippe, Syarifuddin. 2016. *Ilmu Pertahanan Sejarah, Konsep, Teori dan Implementasi*. Jakarta Selatan : Salemba Humanika.
- Velten, kai. 2009. *Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientist And Engineers*. ISBN: 978-3-527-40758-8. Germany : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Tersedia di <https://mcdu.files.wordpress.com/2017/03/velten-mathematical-modeling-and-simulation.pdf>. Diakses pada tanggal 20 Juli 2018. Halaman 5.
- Supriyatno, Makmur. 2014. *Ilmu Pertahanan*. Jakarta: Yayasan Pustaka Obor Indonesia

## TESIS

- Çğlođlu, Çađil. 2016. *Dynamic Modelling And Analysis Of Gun Turret Elevation Drive System*. Tersedia di <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12620067/index.pdf>. Diakses pada tanggal 2 Mei 2018.

## JURNAL

- Departement Of the Army Field Manual. *Tank Gunnery*. Tersedia di [www.bits.de/NRANEU/others/amd-us-archive/FM17-12C1%2861%29.pdf](http://www.bits.de/NRANEU/others/amd-us-archive/FM17-12C1%2861%29.pdf). Diakses pada tanggal 7 Agustus 2018.

- 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 Symposium 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](http://abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol2/Section_I_Advanced_Control_Systems/SSM2_I_08.pdf). Diakses pada tanggal 17 Juli 2018Ru.
- Humaidi, Prasetya A.D & Saputra, Jeki. 2017. *Optimasi Penentuan Elevasi Dan Azimuth Peluncur Roket Menggunakan PID*. Tersedia di <http://jurnal.umk.ac.id/index.php/SNA/article/view/1280>. Diakses pada tanggal 20 Juli 2018.
- Kunto D., Wahjudi A., & Nurhadi, Hendro. 2016. *Perancangan Sistem Kontrol PID untuk Pengendali Sumbu Elevasi Gun pada Turret-gun Kaliber 20 Milimeter*. Tersedia di <https://media.neliti.com/media/publications/192487-ID-perancangan-sistem-kontrol-pid-untuk-pen.pdf>. Diakses pada tanggal 20 Juli 2018.
- Narasimhan, G & Sivaprasad, N. 1989. *FEM Analysis of Gun Tank Turret*. Tersedia di <https://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/4769>. Diakses pada tanggal 2 Mei 2018.
- Paplinski, Krzysztof. M. 2009. *Mathematical Model Of the Main Battle Tank With Stabilized Turret And Gun*. Journal Powertrain and transpoprt. Tersedia di [http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0018-0034/c/httpwww\\_bg\\_utp\\_edu\\_plartjok12009jo20kones20200920no20120vol201620paplinski.pdf](http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0018-0034/c/httpwww_bg_utp_edu_plartjok12009jo20kones20200920no20120vol201620paplinski.pdf) . Diakses pada tanggal 23Mei 2018.

- Santos, Marcio D. & Ferreira, Armando M. 2006. *Gun-Turret Modelling And Control*. Tersedia di [http://abcm.org.br/symposium-series/SSM\\_Vol2/Section\\_I\\_Advanced\\_Control\\_Systems/SSM2\\_I\\_08.pdf](http://abcm.org.br/symposium-series/SSM_Vol2/Section_I_Advanced_Control_Systems/SSM2_I_08.pdf). Diakses pada tanggal 20 Juli 2018.
- Siahaan, Ian Hardianto. 2006. *Simulasi Model Matematis Kontrol Sistem Kontrol Traksi*. Tersedia di <http://jurnalmesin.petra.ac.id/index.php/mes/article/view/16306>. Diakses pada tanggal 20 Juli 2018.
- Stuck. 2013. *Classification Of Systems, Structures And Components Of A Nuclear Facility*. Tersedia di [https://www.finlex.fi/data/normit/41768/YVL\\_B.2e.pdf](https://www.finlex.fi/data/normit/41768/YVL_B.2e.pdf). Diakses pada tanggal 22 Juli 2018.
- Telen, M.A.E & Guirnaldo, S.A. 2017. *Design Study of a Gyro-stabilized, Remote-controlled Weapon Station*. Tersedia di <http://cdo.ustp.edu.ph/wp-content/uploads/2017/12/8.-Design-Study-of-a-Gyro-stabilized-Remote-controlled-Weapon-Station.pdf>. Diakses pada tanggal 20 Juli 2018.
- 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.

## **DOKUMEN DAN PERATURAN**

- Kementerian Pertahanan Republik Indonesia. 2014. *Peraturan Menteri 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.

Doktrin TNI Angkatan Darat “Kartika Eka Paksi”.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 34 tahun 2004 tentang Tentara Nasional Indonesia.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 16 tahun 2012 tentang Industri Pertahanan.

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2002 tentang Pertahanan negara.

Undang-Undang Dasar Republik Indonesia Tahun 1945.

#### **FORUM GROUP DISCUSSION (FGD)**

Kodiklat TNI AD. 2013. *Rencana Pengembangan Tank Medium Bagi Satuan Kavaleri TNI AD*. Pusat Kesenjataan Kavaleri: Jakarta.

PT.Pindad. 2018. Forum Group Discussion Teknologi Persenjataan: Peluang Dan Ancaman Industri Pertahanan Dalam Pengelolaan Kebutuhan Alutsista Masa Kini Dan Masa Depan. Diakses pada tanggal 31 Juli 2018.


#### **INTERNET**

Kumludere, Oğulbey Mahallesi. 2016. *FNSS and PT. Pindad, Completes Conceptual Design of the Modern Medium Weight Tank (MMWT)*. Tersedia di <https://www.fnss.com.tr/en/news/fnss-and-pt-pindad-completes-conceptual-design-of-the-modern-medium-weight-tank-mmwt>. Diakses pada tanggal 26 Juli 2018.

Mizokami, Kyle. 2016. *The U.S. Army Wants a New Light Tank*. Tersedia di <https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a22337/us-army-new-light-tank/>. Diakses pada tanggal 07 Agustus 2018.

# LAMPIRAN-LAMPIRAN

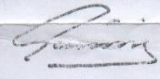
## Lampiran 1: Surat Keterangan Penelitian Dari Universitas Pertahanan

		<b>KEMENTERIAN PERTAHANAN RI UNIVERSITAS PERTAHANAN</b>
Nomor : B/2637 IX/2018		Bogor, 07 Oktober 2018
Klasifikasi : Biasa		
Lampiran : -		
Hal : Permohonan Izin dan Rekomendasi Pelaksanaan Penelitian.	Kepada Yth. Dan Pusdikka  di Tempat	

1. Dasar:
  - a. Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2011 tentang Universitas Pertahanan sebagai Perguruan Tinggi yang Diselenggarakan Oleh Pemerintah.
  - b. Kalender Akademik Program Studi Teknologi Daya Gerak Fakultas Teknologi Pertahanan Universitas Pertahanan Tahun Akademik 2017/2018.
2. Sehubungan dasar di atas, dengan hormat disampaikan bahwa:
  - a. Sebagai syarat kelulusan Program Pascasarjana Universitas Pertahanan, bagi mahasiswa diwajibkan menyusun tesis yang terkait dengan program studinya.
  - b. Mahasiswa Program Studi Teknologi Daya Gerak Fakultas Teknologi Pertahanan Unhan atas nama Putri Herdiyana Wulanuari, NIM: 120170404005, nomor HP: 081542607002 putri.wulanuari@tp.idu.ac.id, bermaksud menyusun tesis dengan judul: "Perancangan Sistem Kendali Gun Turret Pada Medium Tank".
3. Berkenaan dengan hal tersebut mohon diizinkan mahasiswa dimaksud untuk melaksanakan penelitian dalam rangka mendapatkan data dan keterangan termasuk melakukan wawancara dengan pejabat yang ditunjuk.
4. Demikian mohon menjadikan periksa.

a.n. Rektor  
 Universitas Pertahanan  
 Warek I Bjd. Akademik dan Kemahasiswaan,




Prof. Dr. Ir. Dadang Gunawan, M.Eng  
 Pembina Utama IV/e

Tembusan:

1. Sekjen Kemhan
2. Rektor Unhan
3. Warek Unhan
4. Kasatwas Unhan
5. Ka LPPM Unhan

## Lampiran 2: Surat Keterangan Penelitian Dari Pindad

**PT. PINDAD (PERSERO)**




Bandung, 4 Oktober 2018

Nomor : B/222/P/BD/X/2018  
 Klasifikasi : Biasa  
 Lampiran :  
 Perihal : **Konfirmasi Ijin Penelitian**

Kepada  
 Yth. **Warek I Bid.Akademik dan  
 Kemahasiswaan UNHAN**  
 di  
Tempat

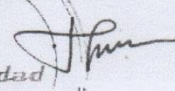
- Berdasarkan surat dari Warek I Bid. Akademik dan Kemahasiswaan UNHAN nomor : B/2468/TX/2018 tanggal 19 September 2018 perihal Permohonan Surat Izin dan Rekomendasi Pelaksanaan Penelitian
- Bersama ini disampaikan bahwa PT. Pindad (Persero) **dapat memfasilitasi** kepada mahasiswa yang dimaksud untuk melaksanakan penelitian, atas nama :

NO	NAMA	NIM	PRODI	JENJANG
1.	Putri Herdiyana	120170404005	Teknologi Gerak Daya	Megister

Yang dilaksanakan pada bulan **September s.d. Oktober 2018**, bertempat di PT. Pindad (Persero).

- Demikian disampaikan dan agar digunakan sebagaimana mestinya.

**PT. PINDAD (PERSERO)**  
 A.n. VP HUMAN CAPITAL DAN  
 PENGEMBANGAN ORGANISASI



**SITI NURFITRIYANA**  
 MANAGER PEMBELAJARAN &  
 PENGEMBANGAN KEPEMIMPINAN

**Konfirmasi:**  
 - E : [Prakerin.diklat@pindad.com](mailto:Prakerin.diklat@pindad.com)  
 - T : +62 22 7312073, ext 2600

**Head Office**  
 Jl. GatotSubroto No. 517  
 Bandung 40284  
 Indonesia

P +62 22 7312073  
 F +62 22 7301222  
 E [info@pindad.com](mailto:info@pindad.com)

**Representative Office**  
 Jl. BatuCeper No. 28  
 Jakarta 10120  
 Indonesia

P +62 21 3806929  
 F +62 21 3814039  
 E [pindadjkt@pindad.com](mailto:pindadjkt@pindad.com)

[www.pindad.com](http://www.pindad.com)

### Lampiran 3: Surat Keterangan Penelitian Dari Dislitbang AD

<p>MARKAS BESAR ANGKATAN DARAT DINAS PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN</p>		<p>Jakarta, 11 Desember 2018</p>
Nomor	: B/ 1823 /XII/2018	
Klasifikasi	: Biasa	
Lampiran	: -	
Perihal	: <u>Persetujuan ijin penelitian</u>	Kepada
		Yth. Rektor Universitas Pertahanan
		di
		Bogor

1. Dasar:

- a. Surat Rektor Universitas Pertahanan Nomor B/2449/IX/2018 tanggal 18 September 2018 tentang Permohonan ijin penelitian dan permintaan data;
- b. Surat Rektor Universitas Pertahanan Nomor B/2468/IX/2018 tanggal 19 September 2018 tentang Permohonan ijin penelitian dan rekomendasi pelaksanaan penelitian; dan
- c. Pertimbangan pimpinan dan staf Dislitbangad.

2. Sehubungan dasar di atas, dengan ini disampaikan pada prinsipnya Kadislitbangad menyetujui mahasiswa Unhan TA 2017/2018 untuk melaksanakan penelitian di Dislitbangad dalam penyusunan Tesis dengan judul sebagai berikut:

- a. "Evaluasi Program Pengembangan *Medium Tank* dalam Kerjasama PT Pindad (Persero) dengan FNSS Turki guna Meningkatkan Pertahanan Negara" atas nama:
  - 1) Nama : Fitri Afriantika
  - 2) NIM : 120170201013
  - 3) Program Studi : Manajemen Pertahanan Fakultas Manajemen Pertahanan Unhan
- b. "Perancangan Sistem Kendali *Gun Turret* Pada *Medium Tank*" atas nama:
  - 1) Nama : Putri Herdiyana Wulanuari
  - 2) NIM : 120170404005
  - 3) Program Studi : Teknologi Daya Gerak Fakultas Teknologi Pertahanan Unhan

### Lampiran 4: 3 d.o.f Load Speed vs Time (High Frequency Excitation)

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
import matplotlib

plt.style.use('ggplot')

N = 2.6
Im = 32.88419e-4
I1 = 18.44091e-4
I2 = 1759.42124e-4
IL = 38354172.33827e-4
Cm = 0.3
CL = 10
Km = 1.16656759e4
KL = 11.8056641e7

def GradTurret(Xbar, t):
    dx = Xbar[0]
    dy = Xbar[1]
    dz = Xbar[2]
    x = Xbar[3]
    y = Xbar[4]
    z = Xbar[5]

    TM = 4000 * np.sin(4000 * 2 * np.pi * t) + 400 * np.sin(40 * 2
* np.pi * t)
    ddx = (TM - Cm * (dx - dy) - Km * (x - y)) / Im
    ddy = (Cm * dx - (Cm + (CL / N ** 2)) * dy + ((CL / N) * dz) +
\
          (Km * x) - y * (Km + (KL / N ** 2)) + (KL / N) * z) /
(I1 + (I2 / N ** 2))
    ddz = (CL * ((dy / N) - dz) + KL * ((y / N) - z)) / IL
    return ddx, ddy, ddz, dx, dy, dz

state0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]
ts = np.arange(0.0, 0.08, 0.0001)

Xbar_t = odeint(GradTurret, state0, ts)

formatter = matplotlib.ticker.ScalarFormatter()
formatter.set_powerlimits((-3,4))

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)
ax.plot(ts, Xbar_t[:, 2])
ax.set_xlabel("Time (s)")
ax.set_ylabel("load speed (rad/s)")
plt.ticklabel_format(axis='y', style='sci', scilimits=(0, 4))
plt.savefig("response_high_frequency_excitation.png", dpi=900)
plt.show()

```

### Lampiran 5: 3 d.o.f Load Speed vs Time (Low Frequency Excitation)

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint
import matplotlib

plt.style.use('ggplot')

N = 2.6
Im = 32.88419e-4
I1 = 18.44091e-4
I2 = 1759.42124e-4
IL = 38354172.33827e-4
Cm = 0.3
CL = 10
Km = 1.16656759e4
KL = 11.8056641e7

def GradTurret(Xbar, t):
    dx = Xbar[0]
    dy = Xbar[1]
    dz = Xbar[2]
    x = Xbar[3]
    y = Xbar[4]
    z = Xbar[5]

    TM = 4000 * np.sin(8 * 2 * np.pi * t) + 400 * np.sin(4 * 2 *
np.pi * t)
    ddx = (TM - Cm * (dx - dy) - Km * (x - y)) / Im
    ddy = (Cm * dx - (Cm + (CL / N ** 2)) * dy + ((CL / N) * dz) +
\
            (Km * x) - y * (Km + (KL / N ** 2)) + (KL / N) * z) /
(I1 + (I2 / N ** 2))
    ddz = (CL * ((dy / N) - dz) + KL * ((y / N) - z)) / IL
    return ddx, ddy, ddz, dx, dy, dz

state0 = [0, 0, 0, 0, 0, 0]
ts = np.arange(0.0, 0.5, 0.00001)

Xbar_t = odeint(GradTurret, state0, ts)

formatter = matplotlib.ticker.ScalarFormatter()
formatter.set_powerlimits((-3,4))

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)
ax.plot(ts, Xbar_t[:, 2])
ax.set_xlabel("Time (s)")
ax.set_ylabel("load speed (rad/s)")
plt.savefig("response_low_frequency_excitation.png", dpi=900)
plt.show()

```

### Lampiran 6: Bode Plot (Input Motor Torque, output Load speed)

```
#!/usr/bin/env python

import matplotlib.pyplot as plt
import control as con
import numpy as np
import numpy.linalg as la

plt.style.use('ggplot')

N = 2.6
Im = 32.88419e-4
I1 = 18.44091e-4
I2 = 1759.42124e-4
IL = 38354172.33827e-4
Cm = 0.3
CL = 10
Km = 1.16656759e4
KL = 11.8056641e7

M = np.array(
    [[Im, 0, 0],
     [0, I1 + I2 / N**2, 0],
     [0, 0, IL]
    ])

C = np.array(
    [[Cm, -Cm, 0],
     [-Cm, Cm + CL / N**2, -CL/N],
     [0, -CL / N, CL]
    ])

K = np.array(
    [[Km, -Km, 0],
     [-Km, Km + KL/N**2, -KL/N],
     [0, -KL/N, KL]
    ])

Id = Id = np.array(
    [[1],
     [0],
     [0]
    ])

M_inv = la.inv(M)

A_upper = np.concatenate((np.zeros((3, 3)), np.eye(3)), axis=1)
A_lower = np.concatenate((np.dot(-M_inv, K), np.dot(-M_inv, C)),
axis=1)
A = np.concatenate((A_upper, A_lower), axis=0)

B = np.concatenate((np.zeros((3, 1)), np.dot(M_inv,
Id).reshape((3, 1))), axis=0)
```

```
C = np.array([0, 0, 0, 0, 0, 1]).reshape((1, 6))
D = 0

sys = con.ss(A, B, C, D)

mag, phase, omega = con.bode(sys)

plt.savefig("tank_bode_plot.png", dpi=900)

plt.show()
```

## Lampiran 7: Sistem kontrol LQR

```

// Input parameters
N = 2.6
Im = 32.88419e-4
I1 = 18.44091e-4
I2 = 1759.42124e-4
IL = 38354172.33827e-4
Cm = 0.3
CL = 10
Km = 1.16656759e4
KL = 11.8056641e7

// The state space model
dims_row = 2
dims_col = 1

M = [Im, 0, 0
      0, I1 + I2 / N**2, 0
      0, 0, IL];

C = [Cm -Cm 0
      -Cm Cm + CL / N**2 -CL/N
      0 -CL / N CL];

K = [Km -Km 0
      -Km Km + KL/N**2 -KL/N
      0 -KL/N KL];

M_inv = inv(M);

A_upper = cat(dims_row, zeros(3, 3), eye(3, 3));
A_lower = cat(dims_row, -M_inv*K, -M_inv*C);
A = cat(dims_col, A_upper, A_lower);

B = cat(dims_col, zeros(3, 1), M_inv*eye(3, 1));
C = eye(6, 6)
P = syslin("c", A, B, C);

// Compensator weights
Q_xx = diag([1 0 5 0 0 0]);
R_uu = 0.5;
Kc = lqr(P, Q_xx, R_uu);

// Plant + compensator system
C = [1 0 0 0 0 0 // theta_m
      0 1 0 0 0 0 // theta_1
      0 0 1 0 0 0]; // theta_L
S = C*(P./(-Kc));

// check system stability
// and (real(spec(S.A))<0)
// Check by simulation

dt = 0.001;
t = 0:dt:1;

```

```

u = 0.1*rand(t);
y = csim(u, t, S, [0; 0; 3; 0; 0; 0]);

//clf;
//plot(t', y');
//xlabel(_("time (s)"))
//L=legend(["$dy_1$", "$dy_2$", "$\theta_L$"]);
//L.font_size=4;

clf;

f0=scf(0)
plot(t, y(1, :));
xlabel("time (s)", 'fontsize', 4)
ylabel("$\theta_m\text{(rad)}$", 'fontsize', 4)
xs2png(0, 'theta_m.png')

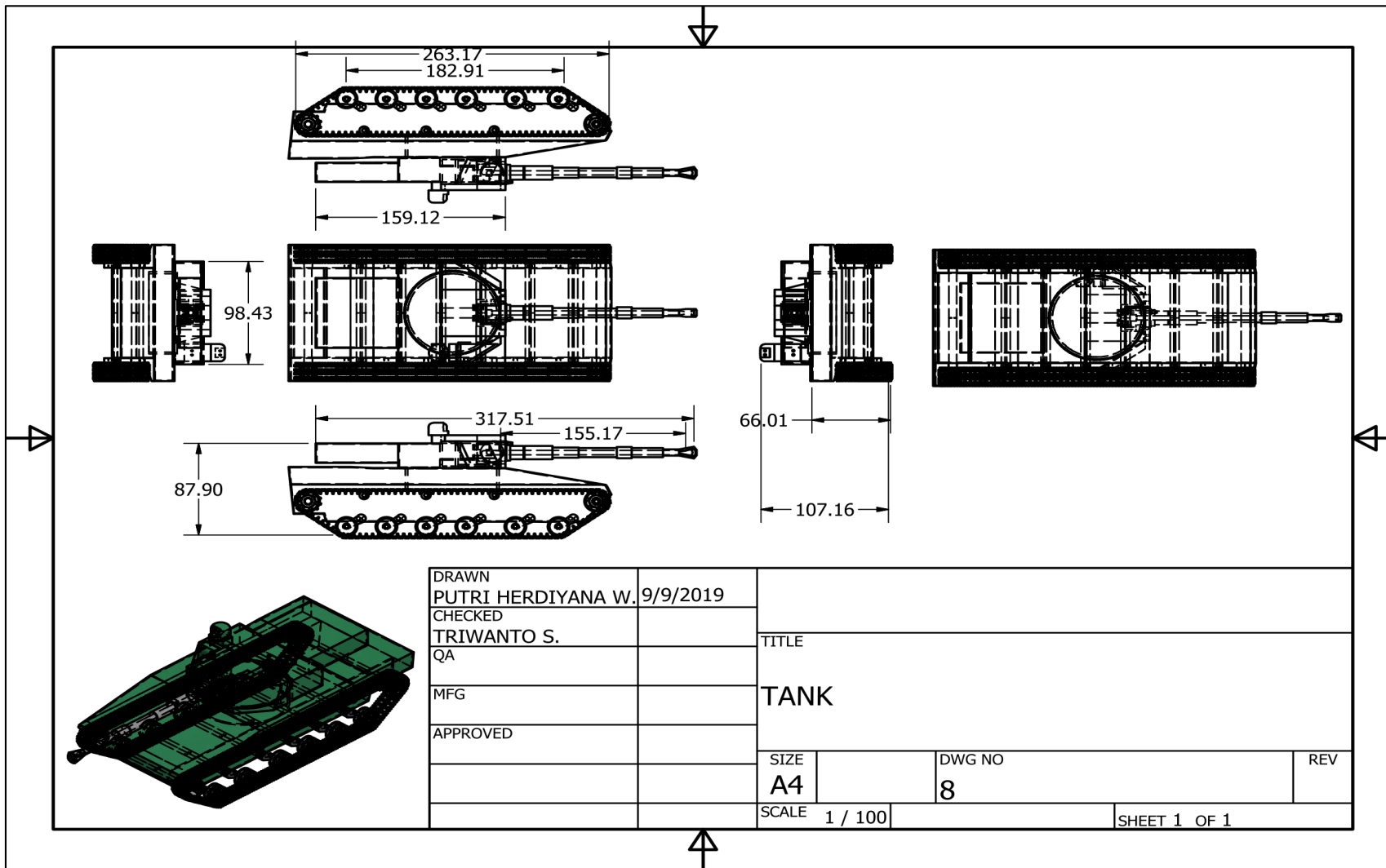
f1=scf(1)
plot(t, y(2, :));
xlabel("time (s)", 'fontsize', 4)
ylabel("$\theta_1\text{(rad)}$", 'fontsize', 4)
xs2png(1, 'theta_1.png')

f2=scf(2)
plot(t, y(3, :));
xlabel("time (s)", 'fontsize', 4)
ylabel("$\theta_L\text{(rad)}$", 'fontsize', 4)
xs2png(2, 'theta_2.png')

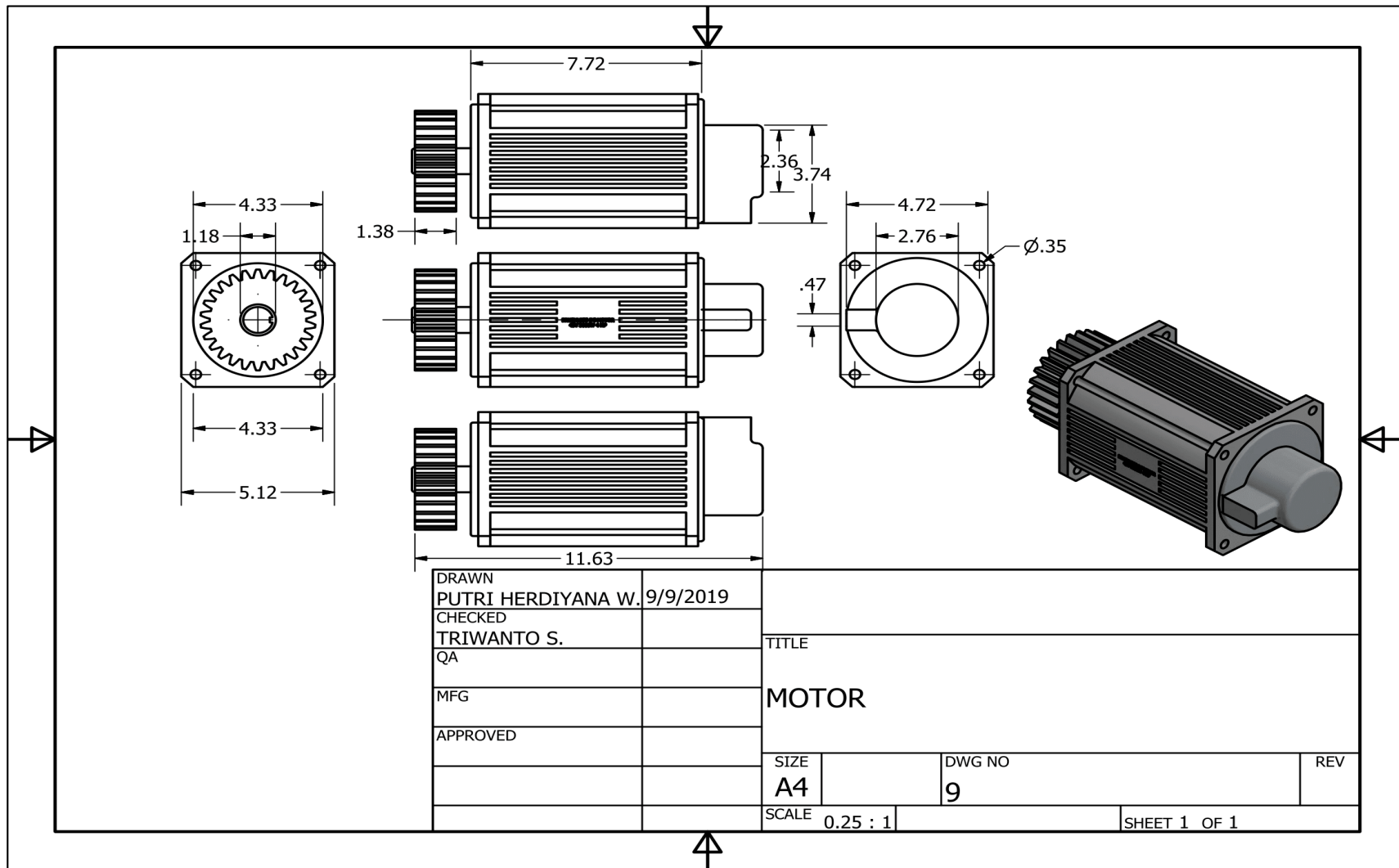
f3=scf(3)
plot(t, u);
xlabel("time (s)", 'fontsize', 4)
ylabel("perturbation (rad)", 'fontsize', 4)
xs2png(3, 'perturbation.png')

```

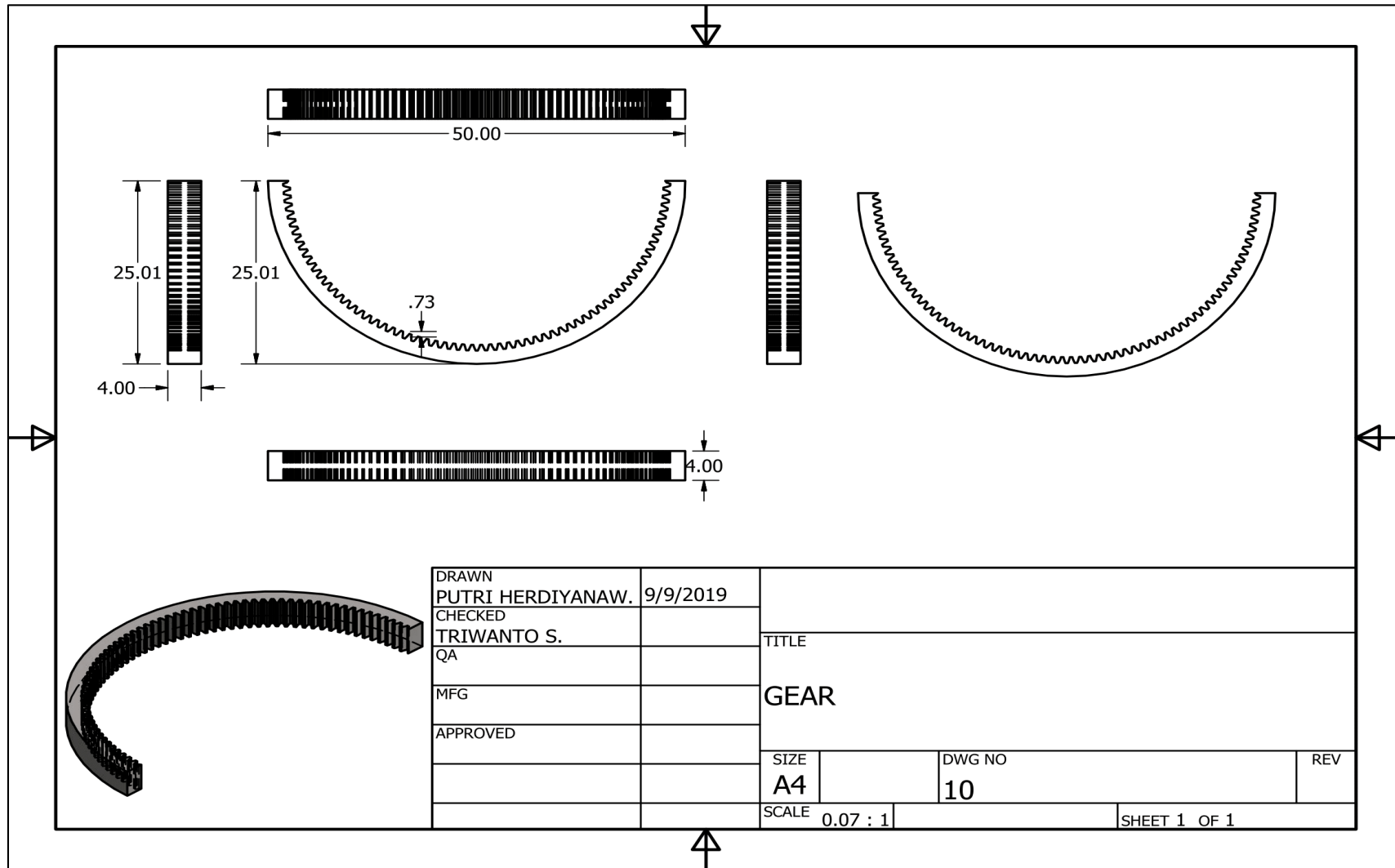
Lampiran 8: Tank FNSS Pindad



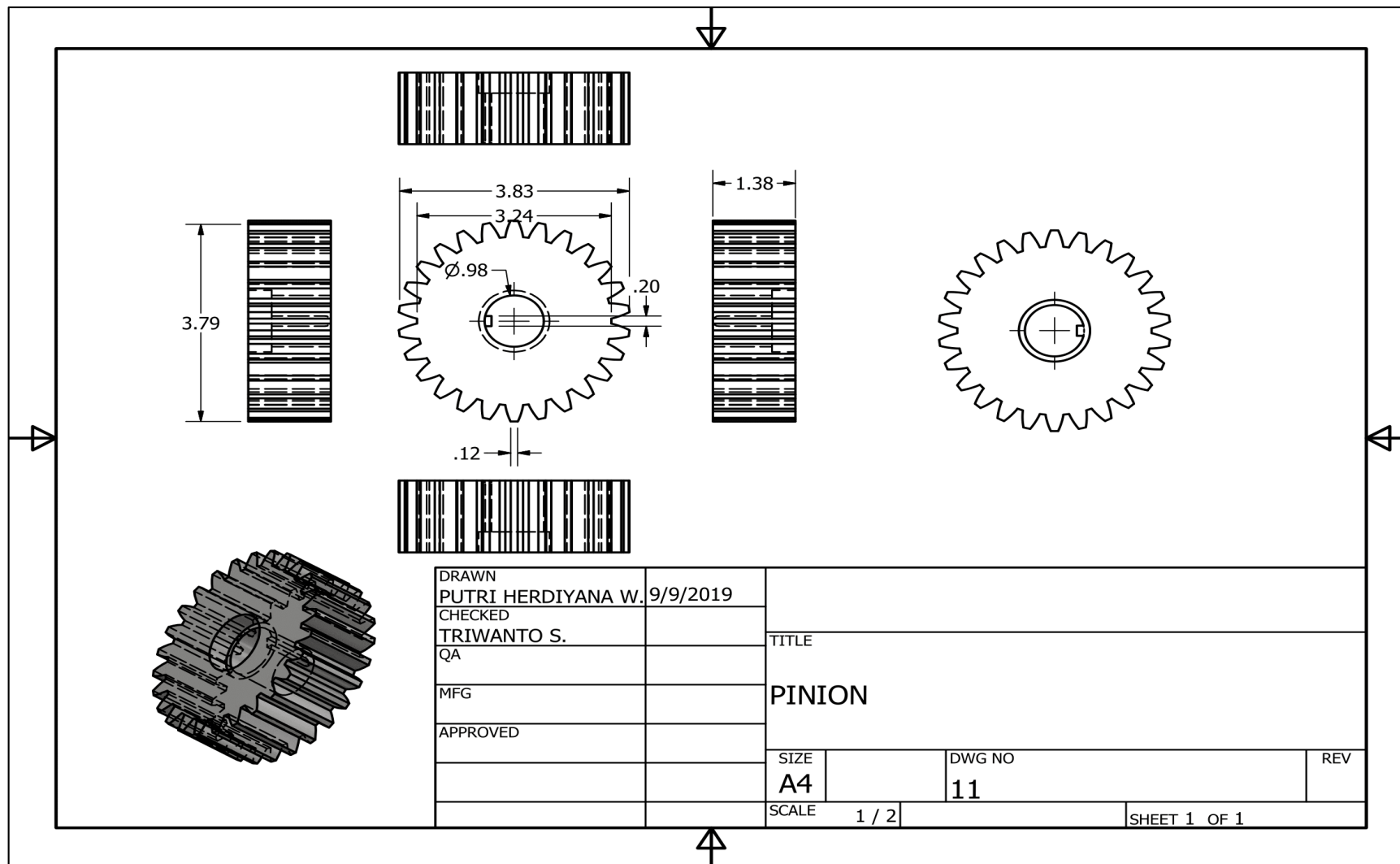
Lampiran 9: Motor



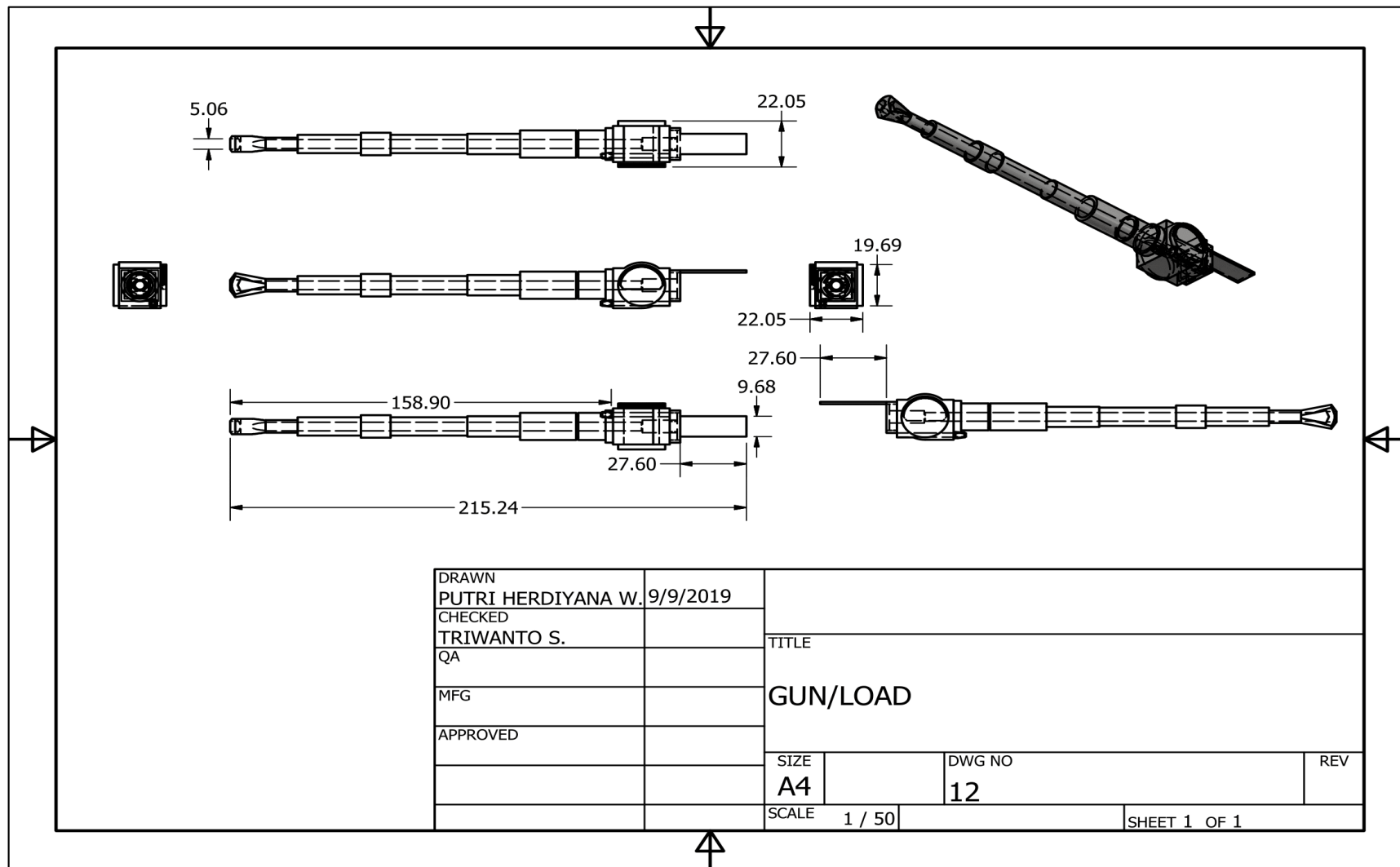
Lampiran 10: Gear



Lampiran 11: Pinion

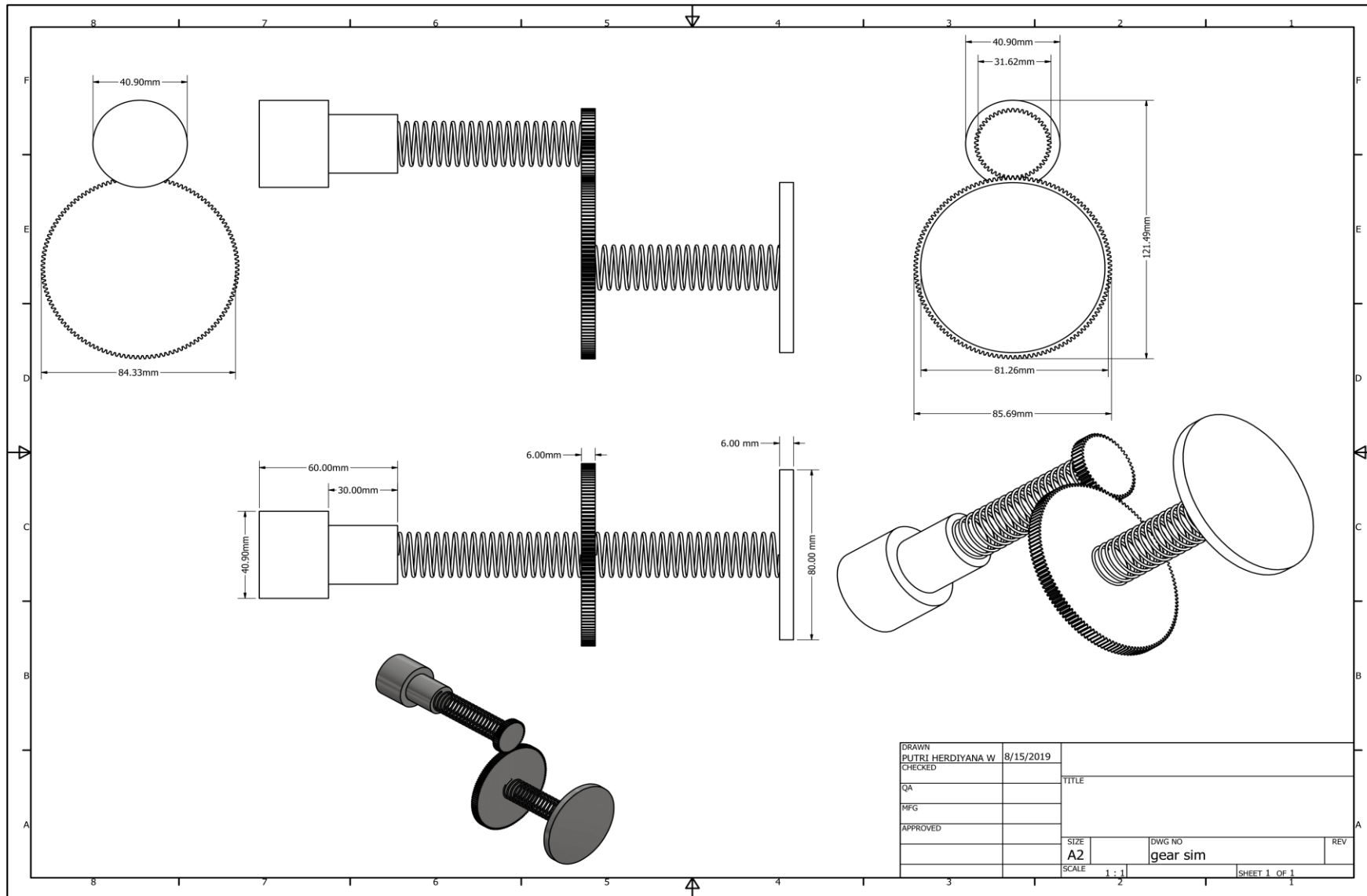


Lampiran 12: Gun /Load

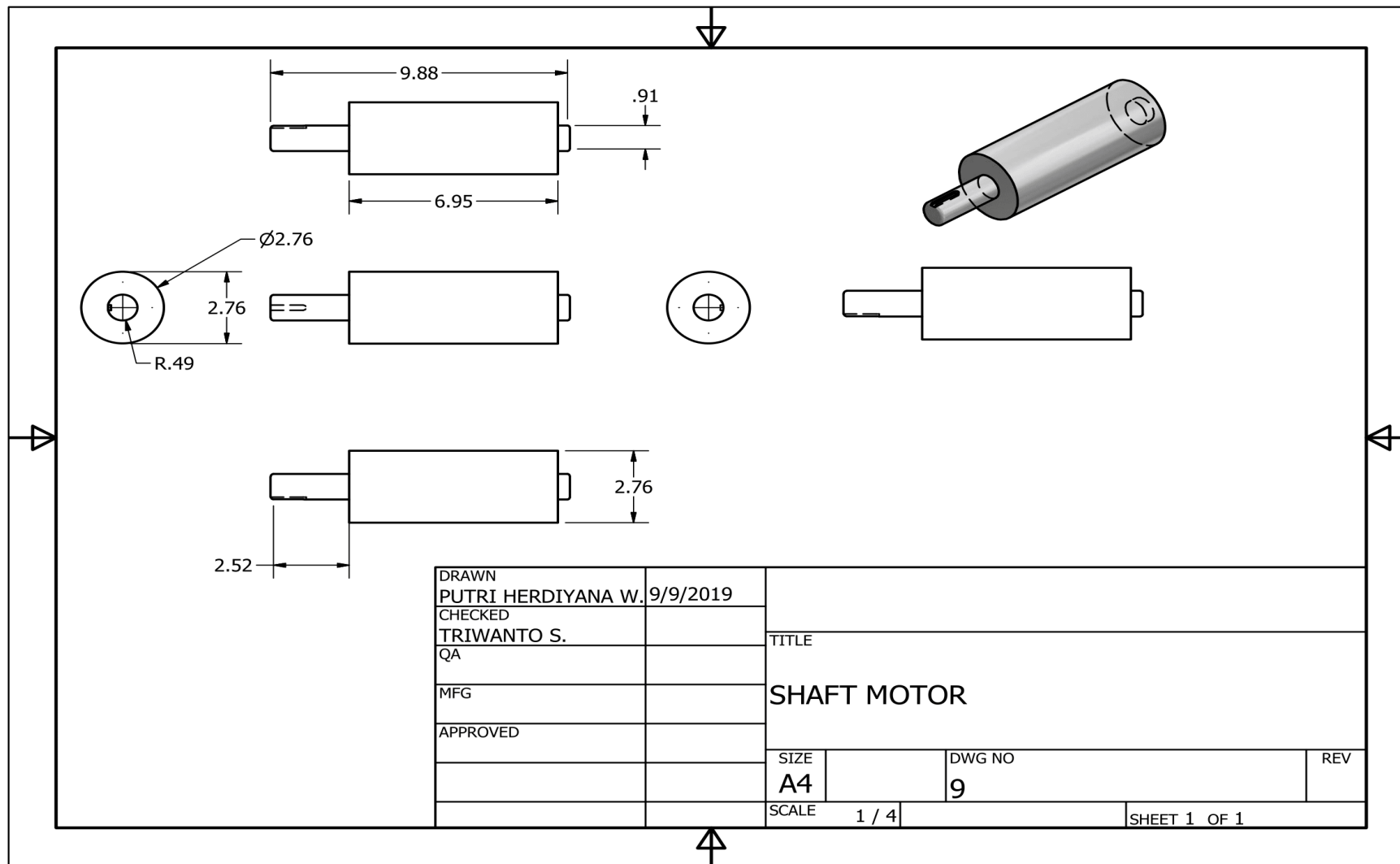


DRAWN PUTRI HERDIYANA W. 9/9/2019			
CHECKED TRIWANTO S. QA		TITLE	
MFG		GUN/LOAD	
APPROVED			
SIZE A4	DWG NO 12	REV	
SCALE 1 / 50	SHEET 1 OF 1		

Lampiran 13: Model Elevasi Turret



Lampiran 14: *Shaft Motor*



Lampiran 15: Dokumentasi



## RIWAYAT HIDUP PENELITI



Putri Herdiyana Wulanuari, lahir di Banyumas pada tanggal 27 Jnaurai 1995. Anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Willibrodus Heru Dwiatmoko dan Ibu Diah Relawanti. Menyelesaikan pendidikan SD Negeri 02 Kecila lulus tahun 2006, SMP N 1 Kemranjen lulus tahun 2009, SMA Negeri Sumpiuh lulus tahun 2012, Sarjana S-1 Pendidikan Matematika di Universitas Muhammadiyah Purwokerto lulus tahun 2016, dan pada 2017 melanjutkan program Magister (S-2) di Universitas Pertahanan.

Pengalaman tugas di Universitas Pertahanan adalah melakukan Kuliah Kerja Dalam Negeri (KKDN) di Lampung dan melakukan Kuliah Kerja Luar Negeri (KKLN) di India.