

# APLIKASI PROPORTIONAL NAVIGATION UNTUK SASARAN BERGERAK DAN KENDALI SUDUT PERKENAAN PADA BOM TERPANDU BERBASIS BOM BT-X PT.PINDAD

## APPLICATION OF PROPORTIONAL NAVIGATION FOR MOVING TARGET AND CONTROL OF IMPACT ANGLE IN BT-X BOMB BASED ON PT.PINDAD BOMBS PRODUCTION

Ria Septitis Mentari<sup>1</sup>, R. Djoko A. Navalino<sup>2</sup>, Y.H. Yogaswara<sup>3</sup>

Program Studi Teknologi Persenjataan, Universitas Pertahanan  
(sasunaru\_ria@yahoo.com)

**Abstrak-** Ketidaktepatan bom konvensional dalam mengenai sasaran sangat dipengaruhi oleh kemampuan pilot dan platform pembawa dalam memenuhi parameter-parameter pelepasan bom. Untuk meminimalisir ketidaktepatan tersebut, bom konvensional dilengkapi sistem pemandu dan kendali. Penelitian ini bertujuan membandingkan dua sistem pemandu *Pure Proportional Navigation (PPN)* dan *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)* pada *proportional navigation* untuk mengetahui sistem pemandu mana yang dapat mengenai sasaran bergerak dan kendali sudut perkenaan. Metode penelitian menggunakan solusi numerik dari *ordinary differential equation (ODE)* yang diaplikasikan dalam model dinamik koordinat *Cartesian* pada bidang dua dimensi. Bom terpandu direpresentasikan sebagai benda kaku di udara menggunakan persamaan titik bermassa dan dihubungkan pada kedua persamaan sistem pemandu. Dua sistem pemandu tersebut dibuat dan diaplikasikan menggunakan dua model dinamik pada Simulink. Pengulangan simulasi dilakukan untuk mempelajari perilaku kedua sistem model dinamik. Hasil penelitian menunjukkan model dinamik *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)* mampu mengenai sasaran bergerak dan kendali sudut perkenaan. Sedangkan, model dinamik *Pure Proportional Navigation (PPN)* hanya mampu mengenai sasaran bergerak. Nilai keakuratan sudut perkenaan *TPG* mendekati sudut yang diinginkan dengan presentase tertinggi dan terendah adalah 96% dan 76%. Nilai keakuratan sudut perkenaan semakin berkurang ketika kecepatan sasaran bergerak semakin tinggi.

**Kata kunci:** Bom Terpandu, Persamaan Titik Bermassa, dan *Proportional Navigation*

**Abstract -** The lack of precision in a conventional bomb to hitting the target is strongly influenced by the ability of pilot and carrier platforms to meet the condition of bomb release parameters. To minimize this lack of precision, the conventional bomb was equipped with a guidance and control systems. The aim of this study to compare *Pure Proportional Navigation (PPN)* and *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)* in *proportional navigation* and find out which guidance system could impact the moving target and control of the impact angle. The research method use a numerical solution from *ordinary differential equation (ODE)* which is applied in *Cartesian coordinate dynamic models* in two dimensional area. Guided bomb represented as a rigid object in the air using mass point equation and connected with the two equation of guidance systems. The two guidance systems were created and applied using two dynamic models in Simulink. The repetition of simulations are carried out to study the behavior of two dynamic model systems. The results of this study show the *TPG*

---

<sup>1</sup> Program Studi Teknologi Persenjataan, Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan.

<sup>2</sup> Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan.

<sup>3</sup> Fakultas Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan dan Divisi Senjata, Dinas Penelitian Dan Pengembangan Angkatan Udara, Bandung.

dynamic model capable to impact the moving target and control of the impact angle. Meanwhile, the PPN dynamic model show it only capable to impact the moving target. The accuracy value of TPG's impact angle approaches the desired impact angle with the highest and lowest percentage are 96% and 76%. The accuracy value of the impact angle decreases when the target moves faster.

**Keywords:** Guided Bomb, Mass Point Equation, and Proportional Navigation

## Pendahuluan

**E**ffect Based Operations (EBO) merupakan konsep yang menjadi awal militer Amerika Serikat mengubah prinsip peperangan untuk mencapai tujuan strategis dengan tindakan taktis dan memiliki efek berdampak langsung pada sasaran seperti peristiwa *Desert Storm* pada tahun 1991. Strategi ini mengubah pola peperangan masa lalu dari merencanakan tujuan strategis menjadi tindakan taktis yang dilakukan untuk mencapai efek yang diinginkan<sup>4</sup>. Pendekatan ini dilakukan dengan meningkatkan sistem persenjataan terutama senjata presisi. Salah satunya adalah mempresisikan bom konvensional.

Pada Abad 21, sistem senjata yang diluncurkan melalui udara telah mengalami perkembangan yang signifikan menjadi lebih presisi disebut *Precision Guided Munitions (PGMs)*. Senjata ini dapat

menyerang sasaran yang diinginkan secara tepat sehingga dapat meminimalisir kerusakan berlebih dan menambah efisiensi biaya pembuatannya. Selain itu, senjata yang presisi mengurangi kerentanan (ketidakmampuan dalam menghindari serangan) dari *platform* pembawa terhadap sistem pertahanan udara musuh.

Bom terpandu dipilih sebagai salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap produk-produk luar negeri dan mewujudkan kemandirian dalam industri pertahanan di Indonesia. Bom terpandu dapat meminimalisir kerusakan, survivabilitas pilot sangat tinggi dan cukup satu atau dua tentara dalam suatu *platform* pembawa ke medan tempur untuk menghancurkan markas sasaran dalam serangan mendadak dengan biaya yang rendah<sup>5</sup>.

Konsep pengembangan bom terpandu telah dilakukan oleh Dinas

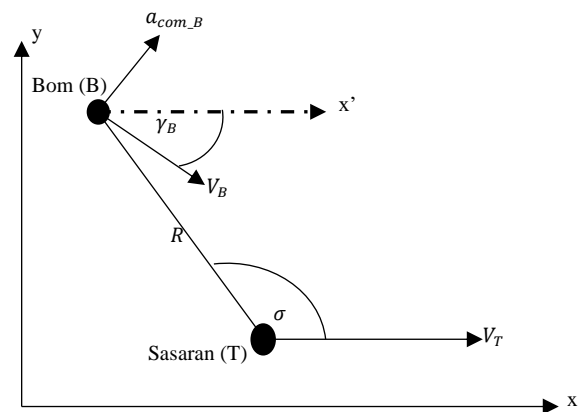
---

<sup>4</sup> Milan N. Vego. *Effects-Based Operations: A Critique*, dalam [www.ndu.press.ndu.edu](http://www.ndu.press.ndu.edu). Issue 41, 2 quarter, 2006/JFQs, hlm. 1.

<sup>5</sup> Loren Thomson. *JDAM: How Boeing's Low Cost Smart Bomb Revolutionized Strike Warfare*, dalam <https://www.forbes.com/sites/lorenthompson/2018/08/29/jdam-how-boeings-low-cost-smart-bomb-revolutionized-strike-warfare/#15fc6112c7da>, diakses 21 Januari 2018

Penelitian dan Pengembangan Angkatan Udara (Dislitbang AU) dengan berbasis pada konsep bom BT-X hasil produksi PT. Pindad. Namun, bom terpandu tersebut masih mengaplikasikan sistem panduan sederhana dengan mengumpankan langsung variabel posisi relatif antara bom dengan sasaran terhadap perintah bidang kendali. Implementasi sistem panduan tersebut masih perlu dikembangkan.

Dalam penelitian ini, sistem pemandu *proportional navigation* (PN) digunakan untuk membuat bom tetap konstan pada sasaran bergerak seiring perubahan waktu. Sistem pemandu *proportional navigation* (PN) memiliki dua jenis sistem pemandu secara umum yaitu PPN dan TPN. *Pure Proportional Navigation* (PPN) merupakan sistem pemandu dengan perhitungan meliputi kecepatan bom, perintah percepatan ( $a_{com}$ ) tegak lurus dengan kecepatan bom dan laju perubahan garis pandang digambarkan seperti pada Gambar 1.



**Gambar 1.** *Pure Proportional Navigation* (PPN)  
Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

Konstanta navigasi ( $N=3$ ) untuk sasaran bergerak<sup>6</sup>. Jika konstanta navigasi ( $N>2$ ), kecepatan bom lebih besar dari kecepatan sasaran bergerak ( $V_B > V_T$ ) dan perintah percepatan bom lebih besar dari perintah percepatan sasaran ( $a_B > a_T$ ) maka perkenaan terhadap sasaran tidak memiliki batasan tertentu<sup>7</sup>. Persamaan *Pure Proportional Navigation* (PPN) yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$a_B = NV_B \dot{\sigma} \quad (1)$$

$N$  adalah konstanta navigasi,  $V_B$  adalah kecepatan bom (m/s), dan  $\dot{\sigma}$  adalah laju perubahan garis pandang/LOS rate (rad/s). Persamaan dinamika gerak untuk

<sup>6</sup> Chang-Hun Lee et al. "Zero Effort Miss Shaping Guidance Laws". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Volume: 54, Issue: 2, April 2018 pp 693-705.

<sup>7</sup> Korean Society for Industrial and Applied Mathematics. "Homing Guidance", dalam <https://www.ksiam.org/conference/3cbf86f3-4131-440b-a6f6-407c6c52edbf/past>, KSIAM 2014, Jeju, diakses 23 Januari 2019

bom terhadap sasaran bergerak dalam koordinat cartesian pada bidang dua dimensi secara umum sebagai berikut:

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \gamma_B$$

$$\frac{dy}{dt} = V \sin \gamma_B$$

$$\frac{d(\gamma_B)}{dt} = \frac{a}{V}$$

$$\frac{d(\sigma)}{dt} = \dot{\sigma}$$

$V \cos \gamma_B$  = kecepatan bom terhadap sumbu  $x$ ,  $V \sin \gamma_B$  = kecepatan bom terhadap sumbu  $y$ ,  $a$  = percepatan bom,  $\gamma_B$  = sudut lintas bom ketika bom dijatuhkan,  $\sigma$  = sudut garis pandang antara bom dengan sasaran.

Kondisi batas untuk persamaan gerak bom dengan sistem pemandu PPN adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X(t_0) &= X_0 & X(t_f) &= X_f \\ Y(t_0) &= Y_0 & Y(t_f) &= Y_f \\ a_{com_T}(t_0) &= a_{com_{T_0}} & & (3) \\ V_B(t_0) &= V_{B_0} & V_B(t_f) &= V_{B_f} \\ V_T(t_0) &= V_{T_0} & V_T(t_f) &= V_{T_f} \\ \gamma_B(t_0) &= \gamma_{B_0} & \gamma_B(t_f) &= \gamma_{B_f} \end{aligned}$$

Dengan  $a_{com_{T_0}}$  = perintah akselerasi awal sasaran,  $V_{B_0}$  = kecepatan awal bom,  $V_{B_f}$  = kecepatan final bom (mencapai sasaran),  $V_{T_0}$  = kecepatan awal sasaran,  $V_{T_f}$  = kecepatan final sasaran

(saat bom mencapai sasaran),  $\gamma_{B_0}$  = sudut lintas awal bom,  $\gamma_f$  = sudut lintasan final bom

Kemudian, *True Proportional Navigation (TPN)* merupakan sistem pemandu dengan perhitungan meliputi perintah percepatan tegak lurus dengan besar sudut garis pandang, laju perubahan sudut garis pandang dan *closing velocity*. Tetapi, penentuan nilai *closing velocity* sangat sulit dilakukan maka turunan dari sistem pemandu *True Proportional Navigation (TPN)* yaitu *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)* yang menggunakan perintah percepatan sebagai fungsi polinomial *time-to-go* dan menentukan koefisien-koefisien perintah pemandu untuk memenuhi batasan dalam mencapai sasaran dan menentukan koefisien perintah pemandu untuk menghasilkan perkenaan yang efektif. Dengan penghitungan terhadap *time-to-go*, bom terpandu dapat mengkoreksi perubahan arah lintasan bom pada setiap jangka waktu tertentu hingga mengenai sasaran. Persamaan-persamaan yang digunakan adalah seperti di bawah ini:

$$\begin{aligned} a_B(t) &= -\frac{V_B}{t_{go}} [-(m+2)(n+2)\sigma \\ &\quad + (m+n+3)\gamma_B \\ &\quad + (m+1)(n+1)\gamma_f] \end{aligned}$$

$$t_{go} = \frac{R}{V_B} \left( 1 + P_1 \left[ \frac{1}{2} (\gamma_B - \gamma_f) - P_2 (\sigma - \gamma_f) \right]^2 + P_3 (\gamma_B - \gamma_f)^2 \right) - \frac{1}{2} (\sigma - \gamma_f)^2$$

dengan,

$$P_1 = \frac{1}{(2m+3)(2n+3)(m+n+3)} \quad (6)$$

$$P_2 = (m+2)(n+2)$$

$$P_3 = \left(m + \frac{3}{2}\right) \left(n + \frac{3}{2}\right)$$

Kondisi batas untuk persamaan gerak bom dengan sistem pemandu TPG adalah sebagai berikut:

$$V_B(t_0) = V_{B_0} \quad V_B(t_f) = V_{B_f}$$

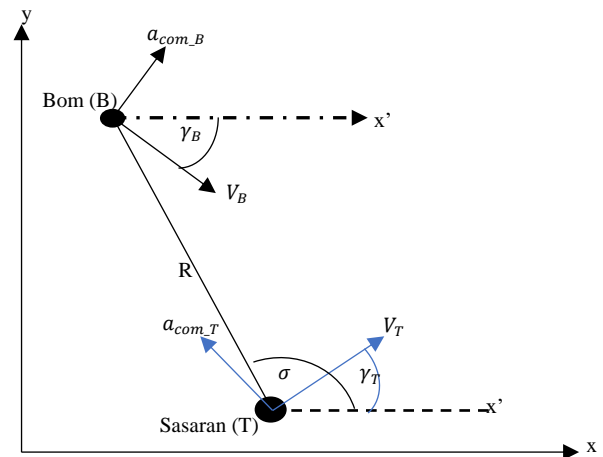
$$V_T(t_0) = V_{T_0} \quad V_T(t_f) = V_{T_f}$$

$$\gamma_B(t_0) = \gamma_{B_0} \quad \gamma_B(t_f) = \gamma_{B_f} \quad (7)$$

$$\gamma_T(t_0) = \gamma_{T_0} \quad \gamma_T(t_f) = \gamma_{T_f}$$

$$\gamma_{B_f} = \gamma_f$$

$V_{B_0}$  = kecepatan awal bom,  $V_{B_f}$  = kecepatan final bom,  $V_{T_0}$  = kecepatan awal sasaran,  $V_{T_f}$  = kecepatan final sasaran,  $\gamma_{B_0}$  = sudut yang dibentuk bom ketika bom dijatuhkan,  $\gamma_{B_f}$  = sudut yang dibentuk bom ketika *impact* dengan sasaran dan besar  $\gamma_{B_f}$  sama dengan besar  $\gamma_f$ ,  $\gamma_T$  = sudut yang dibentuk sasaran. Persamaan *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)* tersebut digambarkan seperti pada Gambar 2.



**Gambar 2.** *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)*

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

Untuk sasaran bergerak, konstanta navigasi yang digunakan adalah  $N = 3$  karena memiliki solusi pembiayaan yang optimal (*optimal cost*)<sup>8</sup>. Sistem pemandu PN sering digunakan untuk *homing* yaitu pendeteksian sasaran, pelacakan dan perintah percepatan secara komputasi dilakukan pada sistem dalam bom. Berdasarkan hal tersebut, peneliti ingin mengaplikasikan sistem pemandu PPN dan TPG yang dapat diterapkan pada bom BT-X dan aplikasinya dalam sebuah model dinamika melalui simulasi pada *Simulink Matlab* untuk membandingkan manakah dari kedua sistem pemandu tersebut yang mampu memberikan dua kemampuan yaitu dapat menghancurkan sasaran yang

<sup>8</sup> Chang-Hun Lee et al, op.cit. hlm. 693-705.

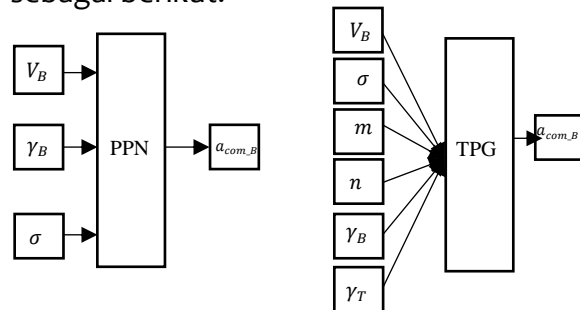
bergerak  $(X_f, Y_f)$  dan mengendalikan sudut perkenaan terhadap sasaran  $(\gamma_f)$ .

### Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan jenis penelitian terapan. Menurut Kemenristekdikti (2018), menyatakan bahwa penelitian terapan adalah penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan ilmiah dengan suatu tujuan praktis dan diharapkan hasilnya dapat segera digunakan untuk keperluan praktis<sup>9</sup>. Penelitian terapan peneliti dilakukan dengan menggunakan seperangkat *hardware* dan *software* untuk membuat suatu model dinamik.

Pendekatan penelitian ini berbasis simulasi dalam pemodelan sistem. Menurut Khotimah (2015), menyatakan bahwa simulasi merupakan teknik penyelesaian permasalahan sistem nyata dengan cara pengoperasian sistem tiruan untuk memperoleh data *output* yang menunjukkan karakteristik sistem tersebut<sup>10</sup>. Simulasi berfungsi menyelidiki perilaku sistem tiruan dengan penggunaan blok-blok dan inputan

konstanta yang mewakili elemen-elemen sistem nyata. Blok-blok tersebut dirangkai dimana setiap bloknya mewakili suatu fungsi matematika model dinamik tersebut yang secara umum digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 3.** Skema Blok Simulink PPN dan TPG  
Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

Model dinamik bom direpresentasikan menggunakan blok-blok *simulink* yang terdapat di *software Matlab*. Rancangan penelitian didasari oleh beberapa asumsi sebagai berikut:

- Persamaan dinamika gerak bom terpandu dinyatakan dalam koordinat *Cartesian* bidang 2 Dimensi.
- Model dinamika yang digunakan adalah dinamika titik bermassa suatu benda kaku (*rigid body*).
- Kecepatan sasaran bergerak adalah konstan, lurus dan tidak bermanuver.
- Menggunakan variasi kecepatan untuk sasaran bergerak dan sudut perkenaan

<sup>9</sup> Direktorat Riset Dan Pengabdian Masyarakat. *Panduan Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat Edisi XII*. Direktorat Jenderal Penguatan Riset Dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi Dan Pendidikan Tinggi Tahun 2018.

<sup>10</sup> Bain Khusnul Khotimah. *Teori Simulasi Dan Pemodelan: Konsep, Aplikasi Dan Terapan* Fakultas Teknik Prodi Teknik Informatika Universitas Trunojoyo Madura: Wade Group, hlm. 12

- asaran (batas sudut adalah sudut umum yaitu  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ ).
- Kecepatan bom yang digunakan adalah  $150 \text{ m/s}$  ( $\sim 540 \text{ km/jam}$ ).
  - Koordinat bom adalah  $(0, 3000)$  dan koordinat sasaran bergerak adalah  $(1000, 0)$ .
  - Input percepatan sasaran bergerak adalah  $10^{-6} \text{ m/s}^2$  untuk menghindari eror pada simulasi.
  - Konstanta navigasi yang digunakan adalah  $N = 3$ .

## Hasil dan Pembahasan

### Gambaran Umum

Untuk rancangan sistem pemandu dalam penelitian ini, rancangan sistem pemandu bom dibuat dalam model dinamika bom menggunakan persamaan gerak titik bermassa dalam koordinat Cartesian di bidang 2 dimensi. Model dinamika yang dibuat dapat direkonstruksi dan nantinya digunakan oleh pilot pesawat tempur dan visualisasi simulasi terbang. Bom bersifat *homing* yaitu bom memiliki program yang diinputkan dalam sistem pemandu dan kendali. Perangkat yang terpasang pada bom berisi rangkaian panel yang terhubung pada sensor disebut *on board computer*. Model dinamik bom yang lebih kompleks didapat dengan mengkombinasikan koefisien-koefisien

lain yang mempengaruhi melalui *Graphical User Interface (GUI)* untuk memudahkan pengguna dalam pemakaian. Rancangan model dinamika ini hanya melakukan pendekatan perhitungan sederhana dari stabilitas variabel dan pemilihan *gain* sederhana yang diaplikasikan dalam sistem dinamik.

### Model Dinamik

Model dinamik sebagai benda tiruan dalam sistem virtual yang merepresentasikan kondisi benda sebenarnya pada sistem nyata. Model dinamik yang dibutuhkan dalam penelitian jumlahnya bergantung pada kebutuhan peneliti.

**Table 1.** Batasan Kondisi-Kondisi Awal Model Dinamik

Parameter	Nilai
Posisi Bom ( $X_0, Y_0$ )	[ 0 3000 ]
Posisi Sasaran ( $X_f, Y_f$ )	[1000 0]
Kecepatan Bom ( $V_B$ )	150 m/s
Sudut lintas bom ( $\gamma_B$ )	$0^\circ$ pada PPN dan TPG
Sudut Perkenaannya ( $\gamma_f$ )	$30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ dan $90^\circ$ (PPN) $-30^\circ, -45^\circ, -60^\circ$ , dan $-90^\circ$ (TPG)
Guidance gain set	PPN ( $N = 3$ ) TPG ( $m = 2, n = 3, N = 3$ )

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

Dalam penelitian ini, model dinamik peneliti memiliki kondisi-kondisi awal yang

harus dipenuhi untuk dijelankannya dalam sebuah simulasi model dinamik bom terpandu dapat dilihat pada Tabel 1.

Model dinamik yang digunakan terdiri dari dua jenis dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut

#### 1. Model Dinamik Bom

Model dinamik bom dibuat dengan menggunakan perhitungan percepatan bom ( $a_{com\_B} = 150 \text{ m/s}$ ) ketika bom telah dijatuhkan di udara. Blok integrator difungsikan sebagai fungsi matematika dalam menghitung kecepatan dan koordinat bom. Nilai konstanta inputan yang diperlukan adalah kecepatan awal bom, sudut perkenaan dan koordinat awal bom. Inputan-inputan tersebut dianggap sebagai kondisi awal bom.

#### 2. Model Dinamik Sasaran Bergerak Di Darat

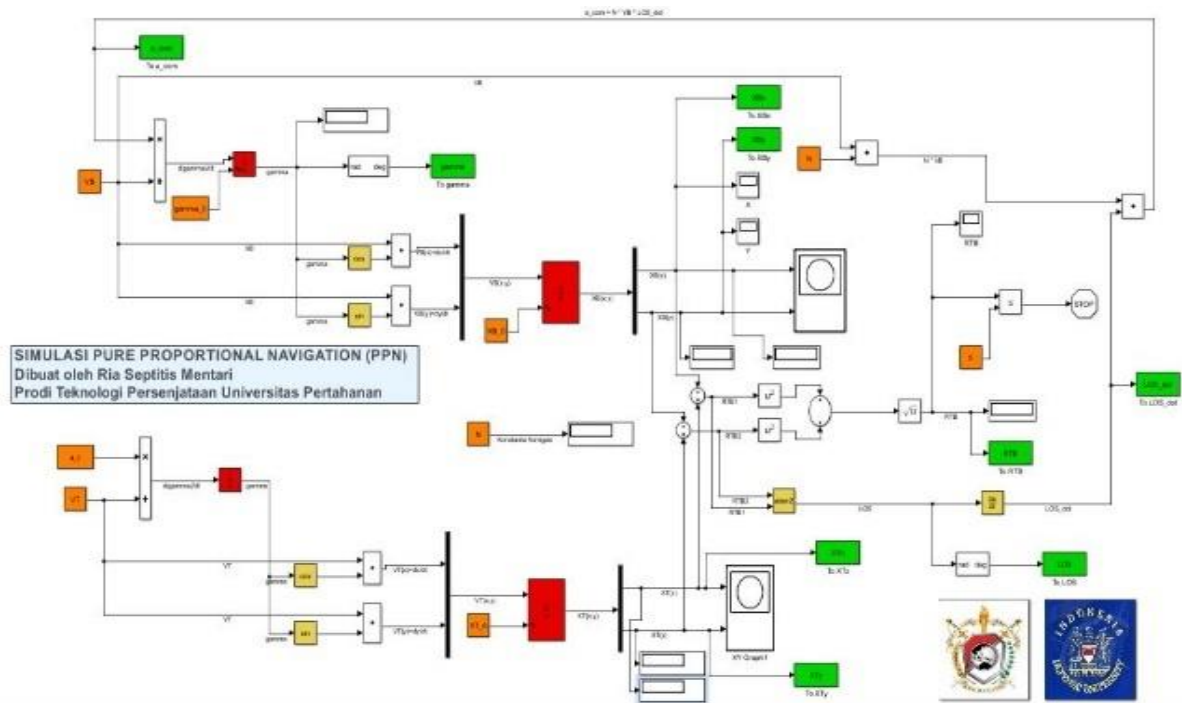
Model dinamik sasaran bergerak dibuat dengan menginputkan kecepatan awal dan koordinat sasaran. Sasaran diasumsikan bergerak lurus dengan kecepatan konstan pada bidang 2 dimensi. Variasi kecepatan yaitu 11 m/s, 16 m/s, 22 m/s dan 27 m/s. Kemudian, variasi sudut perkenaan ( $\gamma_f$ ) yang digunakan adalah  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Ketinggian sasaran bergerak berada pada 1000 m dari posisi awal bom dan

sasaran tidak memiliki ketinggian karena bergerak di darat.

Dalam skenario operasi, bom terpandu dapat dibawa menggunakan pesawat tempur yang memiliki kecepatan supersonik seperti F-16, Su-27, Su-30 maupun pesawat pembom Indonesia. Jika variasi kecepatan penelitian digambarkan secara nyata maka kecepatan sasaran bergerak 11 m/s setara ( $\sim 40 \text{ km/jam}$ ) yaitu radar *vehicle*, 16 m/s setara ( $\sim 60 \text{ km/jam}$ ) yaitu tank, 22 m/s setara ( $\sim 80 \text{ km/jam}$ ) yaitu *logistic vehicle*, 27 m/s setara ( $\sim 100 \text{ km/jam}$ ) yaitu APC (*Armour Personnel Carrier*). Kemudian, medan operasi adalah daerah Indonesia yang jarang dilakukan pemantauan rutin dan berpotensi masuknya kendaraan tempur musuh seperti wilayah perbatasan dengan negara lain, perbukitan atau pegunungan dan dataran rendah yang belum dihuni. Daerah-daerah tersebut terdapat di Indonesia Tengah dan Timur.

Skuadron yang dapat terlibat dalam pengoperasian bom terpandu yaitu skuadron 11 yang berada di Lanud Sultan Hasanudin, Makassar menggunakan pesawat SU-27SK dan SU-30MK/MK2 dan skuadron 16 yang berada di Lanud Roesmin Nurjadin, Pekanbaru menggunakan pesawat F-16 C/D 52 ID. Bom terpandu disimulasikan mengenai





**Gambar 4.** Model Dinamik Menggunakan Pure Proportional Navigation (PPN)  
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

sasaran bergerak dengan variasi kecepatan dan variasi sudut perkenaan dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Skenario Simulasi Bom BT-X

Kecepatan Bom ( $V_B$ )	Kecepatan Sasaran Bergerak ( $V_T$ )	Sudut Perkenaan ( $\gamma_f$ )
150 m/s	11 m/s (~40 km/jam)	30°
	16 m/s (~60 km/jam)	45°
	22 m/s (~80 km/jam)	60°
	27 m/s (~100 km/jam)	90°

Sumber: Yogaswara, 2018: 18

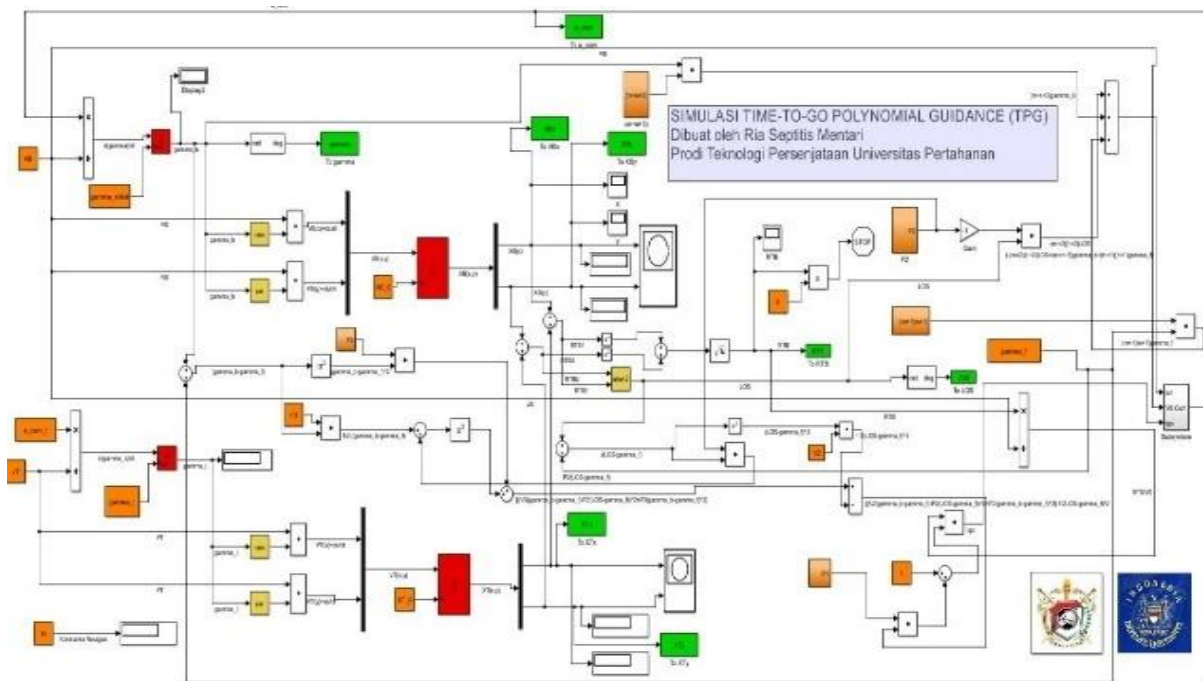
### Blok Dinamik Sistem

Blok sistem dinamik merupakan serangkaian blok yang menggambarkan suatu sistem. Sistem tersebut terdiri dari 2 blok dinamik yaitu blok dinamik bom dan blok dinamik sasaran bergerak. Blok dinamik bom berisi persamaan diferensial

biasa orde 1 dan 2 dari percepatan bom. Blok dinamik bom disambungkan dengan blok dinamik sasaran bergerak sehingga muncul nilai jarak jangkauan antara bom dan sasaran ( $R$ ) serta nilai sudut lintas bom ( $\gamma_B$ ). Kemudian, agar sistem menghasilkan perintah percepatan maka blok perintah percepatan bom menjadi variabel yang harus diperhitungkan.

### Blok Pure Proportional Navigation (PPN)

Blok PPN merupakan blok dinamik bom terhadap sasaran yang terhubung dengan blok sistem pemandu PPN. Konstanta inputan dalam PPN adalah kecepatan bom ( $V_B$ ), sudut awal lintas bom ( $\gamma_{B_0}$ ), koordinat bom ( $X_{B_0}$ ), kecepatan sasaran ( $V_T$ ), percepatan sasaran ( $a_t$ ) dan koordinat sasaran ( $X_{M_0}$ ). Kemudian, inputan percepatan sasaran ( $a_t$ ) bernilai



**Gambar 5.** Model Dinamik Menggunakan Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)  
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

$10^{-6} \text{ m/s}^2$  atau mendekati nilai nol dimana sasaran bergerak pada sumbu x. Blok *constant* diinputkan dengan nilai 5 yang berarti bom akan meledakkan diri terhadap sasaran jika jarak jangkauan antara bom dan sasaran kurang dari 5 meter. Pembatasan tersebut dilakukan agar lintasan bom terhadap sasaran tidak mengalami gangguan/eror.

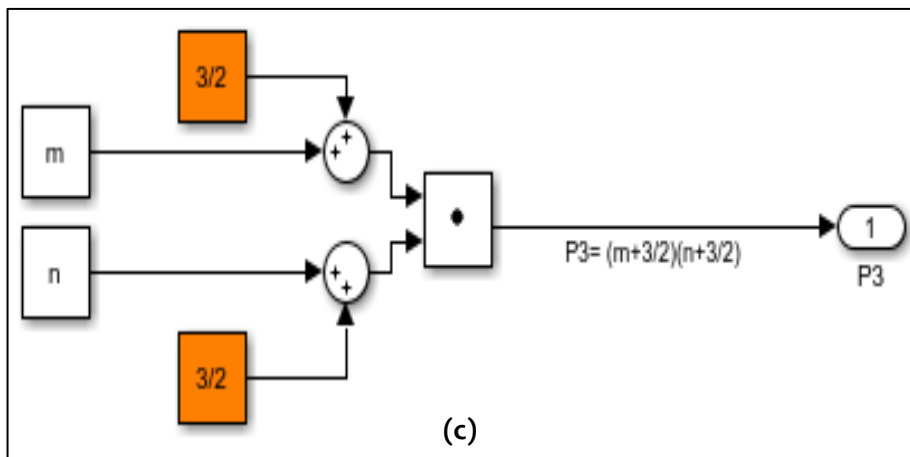
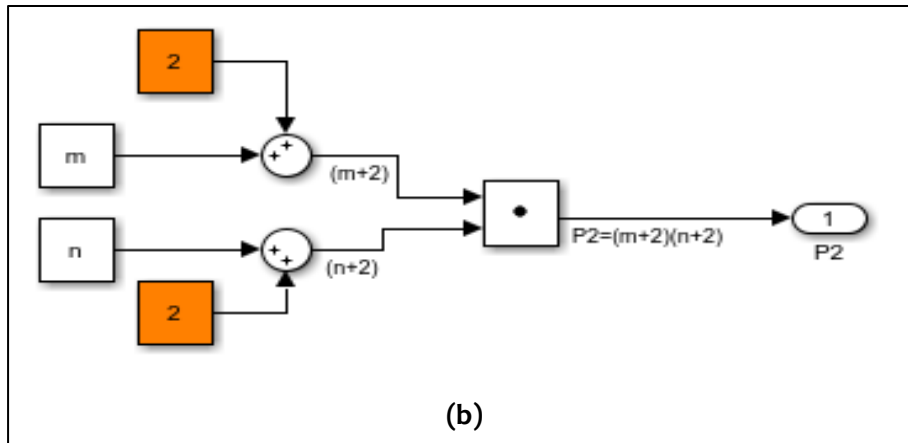
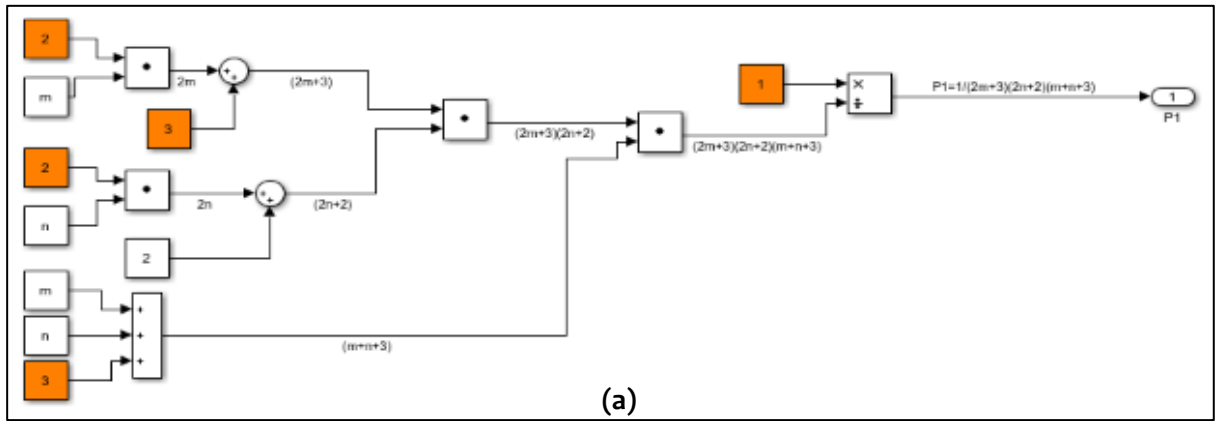
Input sudut lintasan bom terhadap sasaran ( $\gamma_o$ ) masih berupa satuan derajat maka pengubahan *degree* menjadi *radian* perlu dilakukan dengan menginputkan '*deg2rad ( )*' dalam *M-file Matlab*. Pada penelitian ini, sistem dalam program *Matlab* yang dicoba dijalankan telah berhasil bekerja dengan baik. Gambaran blok model dinamik *PPN* ditunjukkan pada Gambar 4.

Blok 'to workspace' ditambahkan pada beberapa titik seperti koordinat final bom ( $X_{B_f}, Y_{B_f}$ ), koordinat final sasaran ( $X_{T_f}, Y_{T_f}$ ), jarak jangkauan bom terhadap sasaran ( $RTB$ ), sudut garis pandang (LOS), garis pandang (LOS\_dot), sudut final lintasan bom ( $\gamma_{B_f}$ ) dan perintah percepatan bom terhadap sasaran ( $a_{com}$ ) untuk mendapatkan output data di *workspace*. Untuk dapat menampilkan data-data tersebut dalam bentuk angka, blok 'to workspace' disimpan dalam format *array*.

### Blok Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)

#### Gambaran TPG Secara Umum

Blok *TPG* merupakan blok dinamik bom terhadap sasaran yang dihubungkan dengan blok sistem pemandu *TPG*. Data inputan pada blok *TPG* adalah kecepatan

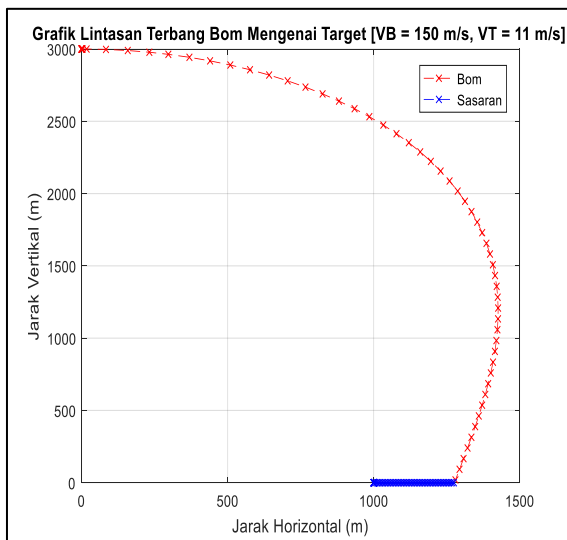


**Gambar 6.** (a) Blok P1 (b) P2 dan (c) P3 Sebagai Gain Set Dalam TPG  
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

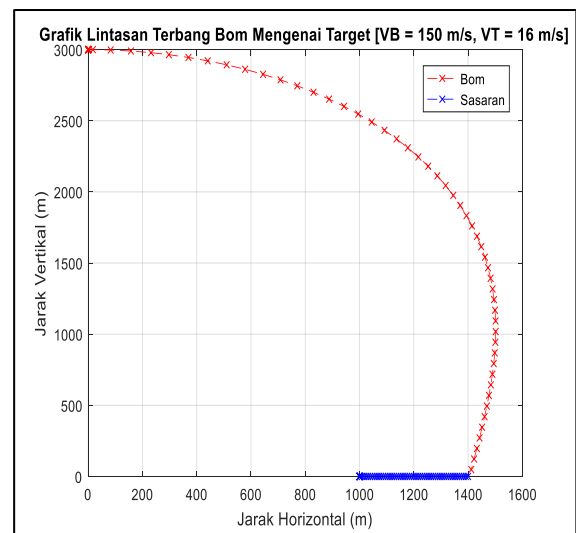
bom (VB), koordinat bom (XB<sub>o</sub>), koordinat sasaran (XT<sub>o</sub>), percepatan sasaran (a<sub>t</sub>), sudut awal lintasan bom (gamma<sub>o</sub>), sudut awal lintasan sasaran (gamma<sub>t\_o</sub>), sudut bom ketika mencapai sasaran (gamma<sub>f</sub>), dan sudut yang dibentuk sasaran (gamma<sub>t</sub>). Sistem pemandu TPG menggunakan persamaan dengan turunan fungsi polinomial

terhadap waktu. Persamaan tersebut akan memudahkan bom untuk mengoreksi lintasan menuju sasaran dalam rentang waktu tertentu secara mandiri. Gambaran umum mengenai blok TPG ditunjukkan seperti pada Gambar 5.

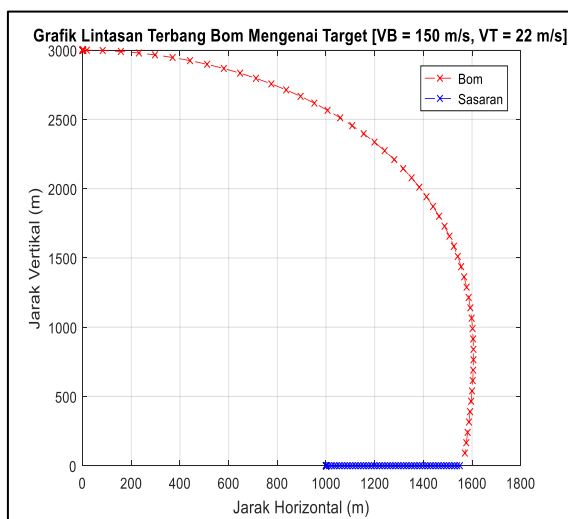
Kemudian, sudut perkenaan bom terhadap sasaran juga dapat dikendalikan sesuai yang diinginkan. Input gamma<sub>o</sub>



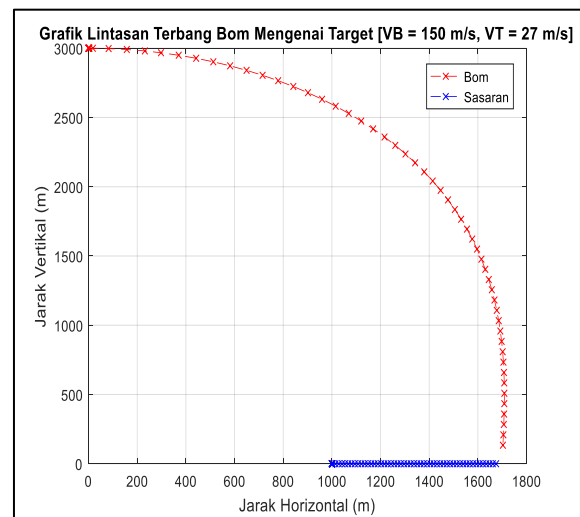
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 7.** (a) Grafik Lintasan Bom Pada  $v=11$  m/s, (b) Grafik Lintasan Bom Pada  $v=16$  m/s, (c) Grafik Lintasan Bom Pada  $v=22$  m/s, (d) Grafik Lintasan Bom Pada  $v=27$  m/s  
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

dan  $\gamma_{t_0}$  bernilai 'deg2rad(0)' atau  $0^\circ$ . Untuk mengatur sudut perkenaan yang diinginkan,  $\gamma_{b_f}$  atau  $\gamma_f$  bernilai 'deg2rad( )' atau sesuai derajat sudut yang diinginkan ( $-30^\circ, -45^\circ, -60^\circ$  dan  $-90^\circ$ ).

Untuk dapat menginputkan data-data final tersebut dalam *output Matlab*, blok 'to workspace' ditambahkan pada beberapa titik seperti koordinat final bom ( $X_{B_f}, Y_{B_f}$ ), koordinat final sasaran

( $X_{T_f}, Y_{T_f}$ ), sudut final lintasan bom ( $\gamma_{B_f}$ ), jarak jangkauan bom menuju sasaran (RTB) dan perintah percepatan bom terhadap sasaran ( $a_{com}$ ). Blok 'to workspace' disimpan dalam format *array* untuk dapat menampilkan data-data tersebut dalam bentuk angka. Kemudian, hasil data tersebut dituliskan kembali dalam *M-File* untuk mendapat hasil grafik.

### Blok P1,P2,dan P3

Blok P1, P2 dan P3 merupakan blok subsistem dari blok TPG. Blok *subsystem* tersebut berisi persamaan yang melibatkan *gain set TPG*. Gambaran persamaan *guidance gain* pada blok P1, P2 dan P3 adalah sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 6. TPG menghasilkan beberapa variasi lintasan bergantung pada pemilihan *guidance gain* dan hanya bilangan bernilai positif yang dapat digunakan. Karakteristik TPG tersebut menyulitkan pemilihan dalam menentukan *guidance gain* yang tepat dan dapat menyebabkan kegagalan dalam penguncian sasaran. Menurut Lee et al (2013), menyatakan bahwa penambahan *guidance gain*  $n > m > 1$  membuat perintah percepatan bom dapat memenuhi batas percepatan bernilai nol.

### **Simulasi Sasaran Bergerak Pure Proportional Navigation (PPN)**

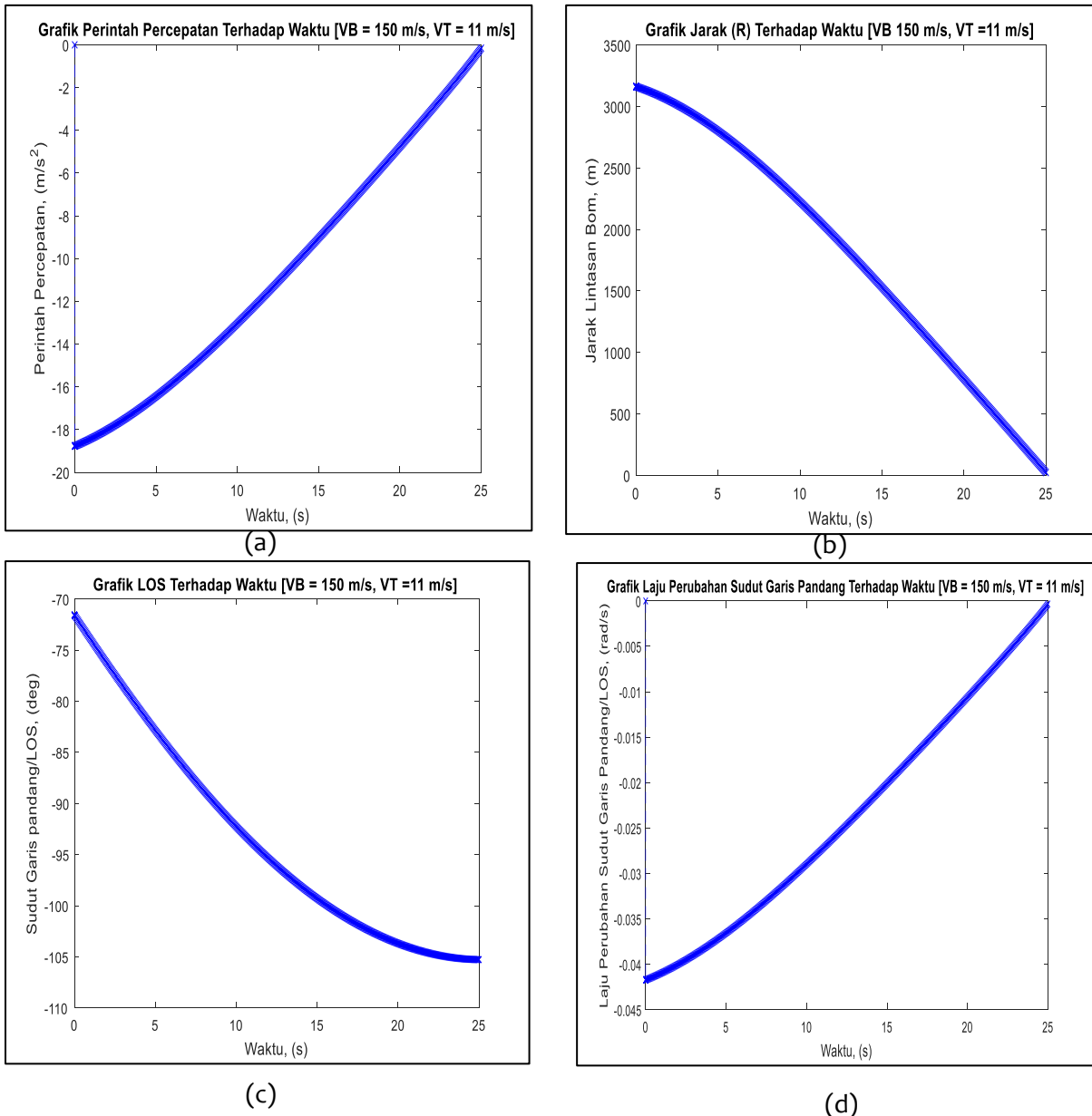
#### **Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Dengan Variasi Kecepatan Sasaran**

Simulasi model dinamik dijalankan dengan variasi kecepatan sasaran bergerak pada blok PPN. Posisi bom berada di ketinggian 3000 m ketika bom dijatuhkan. Garis merah menunjukkan lintasan terbang bom dan garis biru menunjukkan lintasan sasaran bergerak. Berdasarkan hasil

simulasi grafik di atas, bom mampu mencapai sasaran bergerak secara tepat dengan hasil sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 7.

- a. Pada grafik (a), bom mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1277 m dengan kecepatan sasaran bergerak 11 m/s.
- b. Pada grafik (b), bom mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1405 m dengan kecepatan sasaran bergerak 16 m/s.
- c. Pada grafik (c), bom mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1562 m dengan kecepatan sasaran bergerak 22 m/s.
- d. Pada grafik (d), bom mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1698 m dengan kecepatan 27 m/s

Hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa sistem blok PPN mampu membuat bom mencapai sasaran bergerak dengan tepat dengan bentuk lintasan melengkung ke bawah. Walaupun kecepatan sasaran berbeda-beda, perintah percepatan bom mampu memperhitungkan pada jarak berapa bom akan mengenai sasaran tersebut. Kecepatan sasaran bergerak yang semakin tinggi maka jarak dimana bom akan mengenai sasaran semakin jauh juga.



**Gambar 8.** (a) Grafik Perintah Percepatan Terhadap Waktu, (b) Grafik Jarak Jangkau (R) Terhadap Waktu, (c) Grafik LOS Terhadap Waktu, (d) Grafik Garis Pandang Terhadap Waktu

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

### Konsep Sistem Pemandu *Pure Proportional Navigation (PPN)*

Dalam penelitian ini, konsep sistem pemandu *PPN* dapat diketahui dari simulasi yang dijalankan pada kecepatan sasaran bergerak 11 m/s. Garis biru menunjukkan kondisi-kondisi yang terjadi pada variabel-variabel yang berkaitan.

Gambaran hasil simulasi tersebut ditunjukkan sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 8.

Pada gambar (a), bom yang telah dijatuhkan di udara menjadikan bom tersebut memiliki perintah percepatan yang mengecil seiring dengan perubahan waktu hingga bernilai nol (kecepatan bom

bernilai konstan) dengan waktu final 25 s. Pada gambar (b), jarak jangkauan bom terhadap sasaran bergerak semakin mengecil hingga bernilai nol seiring dengan perubahan waktu dimana jarak jangkauan awal 3000 m dari permukaan tanah dengan waktu final 25 s. Pada grafik (c), besar sudut garis pandang/LOS semakin besar seiring dengan perubahan waktu. Hal tersebut terjadi karena lintasan bom terhadap sasaran bergerak berupa lintasan melengkung ke bawah. Pada grafik (d), laju perubahan sudut garis pandang/LOS bom terhadap sasaran bergerak semakin mengecil hingga bernilai nol dan memiliki waktu final 25 s. Menurut Siouris (2003), menyatakan bahwa percepatan efektif yang digunakan untuk sasaran bergerak adalah percepatan bom yang menggunakan konstanta navigasi bernilai lebih dari 2 dimana nilai percepatan akan semakin mengecil hingga bernilai nol pada waktu final<sup>11</sup>. Hasil simulasi tentang laju perubahan sudut garis pandang seiring perubahan waktu dalam penelitian ini menunjukkan adanya kesamaan nilai yang dihasilkan antara simulasi dengan teori yang ada yaitu laju perubahan sudut garis pandang/LOS bernilai nol ketika bom

mencapai waktu final. Dengan pengkondisian perintah percepatan bom bernilai nol pada waktu final, bom mampu mengatasi efek dari gangguan dan eror saat melakukan defleksi sirip pada ekor bom.

### **Simulasi Sasaran Bergerak *Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)***

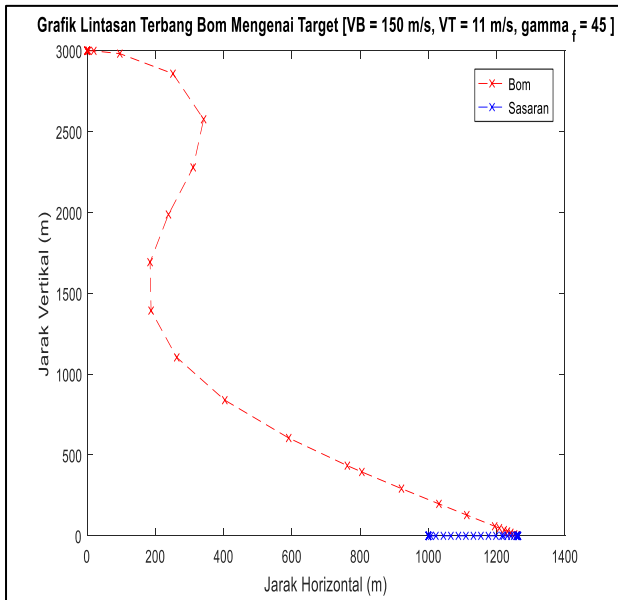
#### **Simulasi TPG Dengan Kecepatan Sasaran Bergerak $V_T=11$ m/s.**

Simulasi dijalankan dengan data input kecepatan sasaran bergerak ( $V_T$ ) = 11 m/s. Pada grafik (a)  $V_T = 11$  m/s dan ( $\gamma_f = 30^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1284 m. Pada grafik (b)  $V_T = 11$  m/s dan ( $\gamma_f = 45^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1260 m. Pada grafik (c)  $V_T = 11$  m/s dan ( $\gamma_f = 60^\circ$ ) di atas, bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1248 m. Berdasarkan grafik (d)  $V_T = 11$  m/s dan ( $\gamma_f = 90^\circ$ ) di atas, bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1256 m.

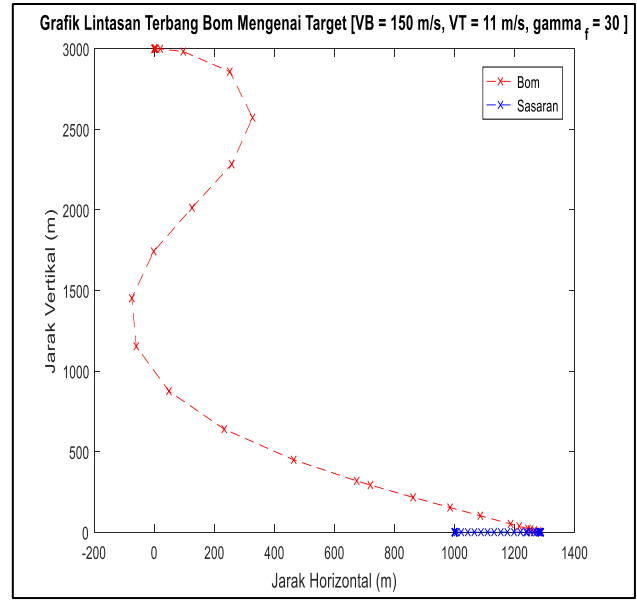
#### **Simulasi TPG Dengan Kecepatan Sasaran Bergerak $V_T=16$ m/s**

---

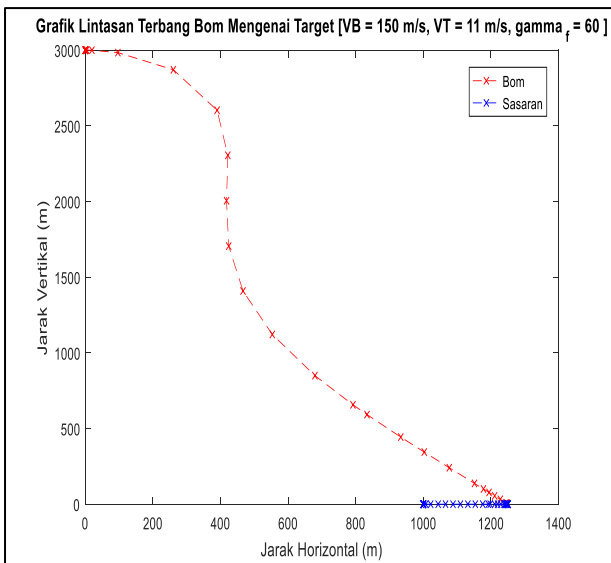
<sup>11</sup> George M. Siouris, *Missile Guidance And Control Systems*. New York: Springer, hlm. 200.



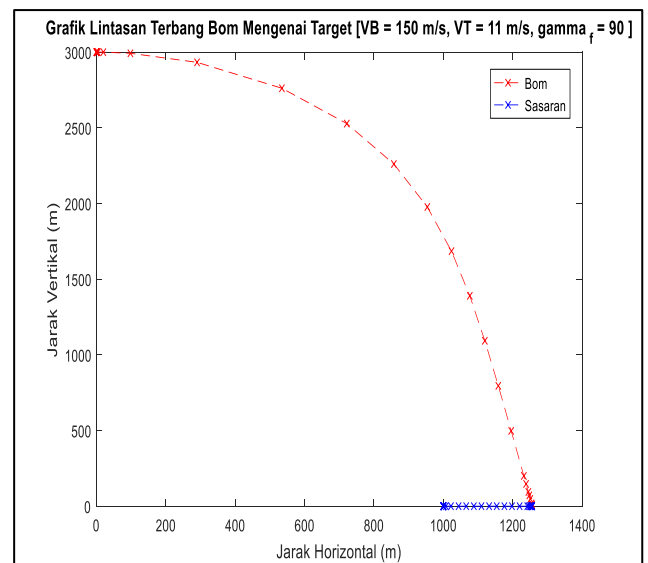
(a)



(b)



(c)



(d)

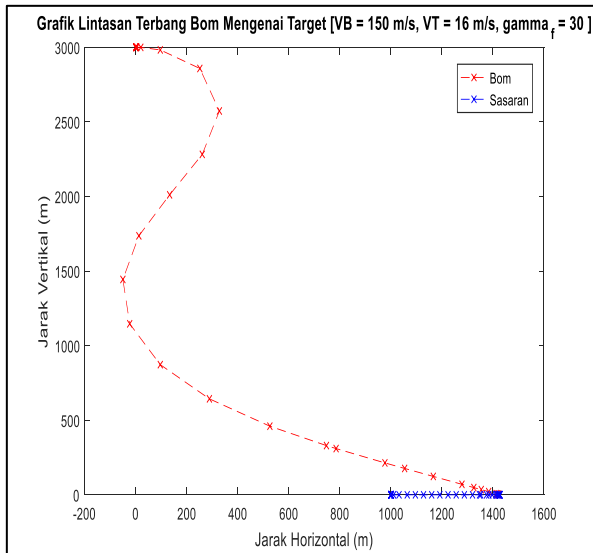
**Gambar 9.** (a) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 30^\circ$ , (b) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 45^\circ$ , (c) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 60^\circ$ , (d) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 90^\circ$

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

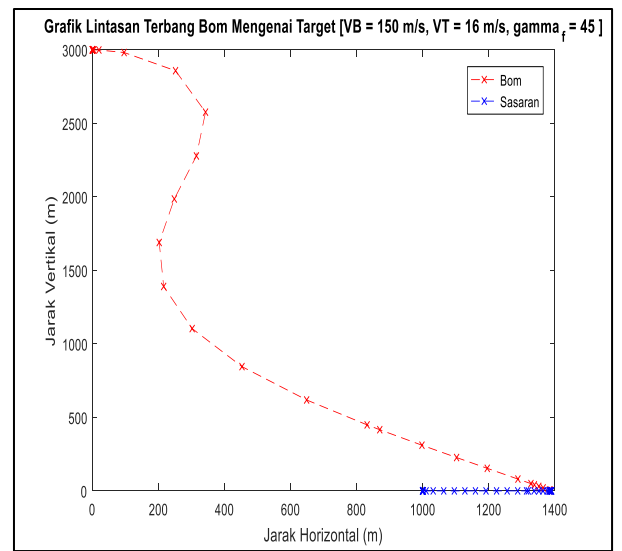
Simulasi dijalankan dengan data input kecepatan sasaran bergerak ( $V_T$ ) = 16 m/s. Pada grafik (a)  $V_T = 16$  m/s dan ( $\gamma_f = 30^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1423 m. Pada grafik (b)  $V_T = 16$  m/s dan ( $\gamma_f = 45^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal

1387 m. Pada grafik (c)  $V_T = 16$  m/s dan ( $\gamma_f = 60^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1367 m. Pada grafik (d)  $V_T = 16$  m/s dan ( $\gamma_f = 90^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1280 m. Gambaran hasil simulasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 10.

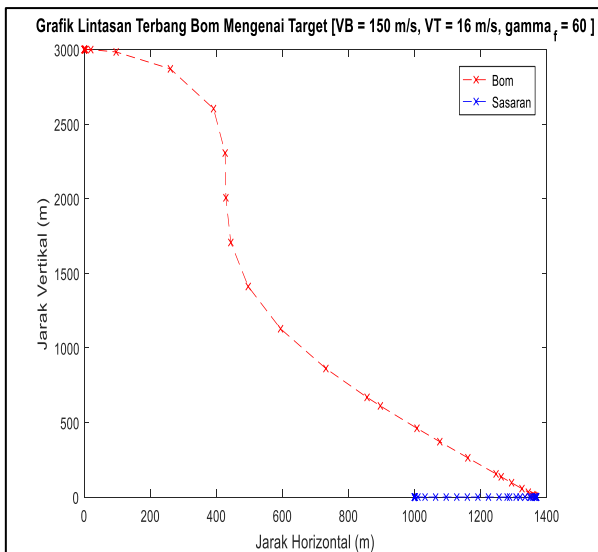




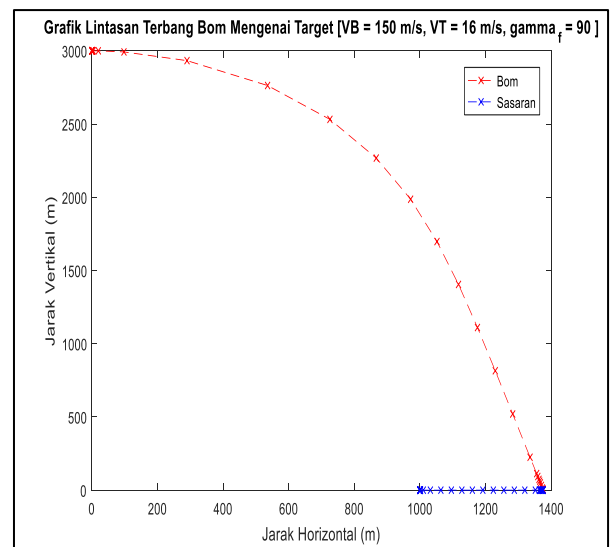
(a)



(b)



(c)



(d)

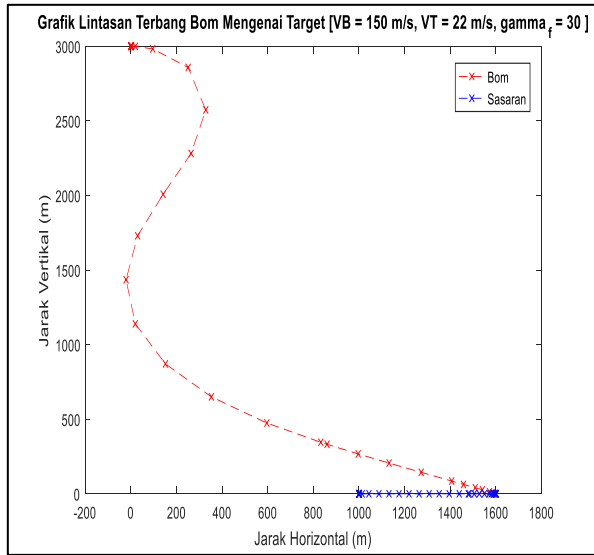
**Gambar 10.** (a) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 30^\circ$ , (b) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 45^\circ$ , (c) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 60^\circ$ , (d) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 90^\circ$

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

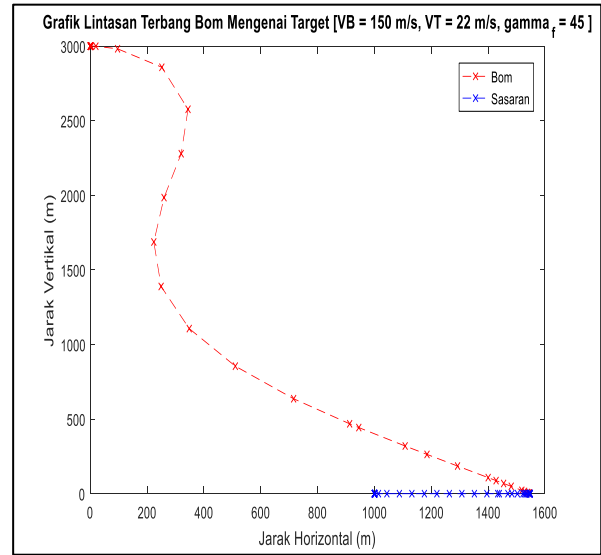
### Simulasi TPG Dengan Kecepatan Sasaran Bergerak VT=22 m/s

Simulasi dijalankan dengan data input kecepatan sasaran bergerak (VT) = 22 m/s. Pada grafik (a)  $V_T = 22 \text{ m/s}$  dan ( $\gamma_f = 30^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1598 m. Pada grafik (b)  $V_T = 22 \text{ m/s}$  dan

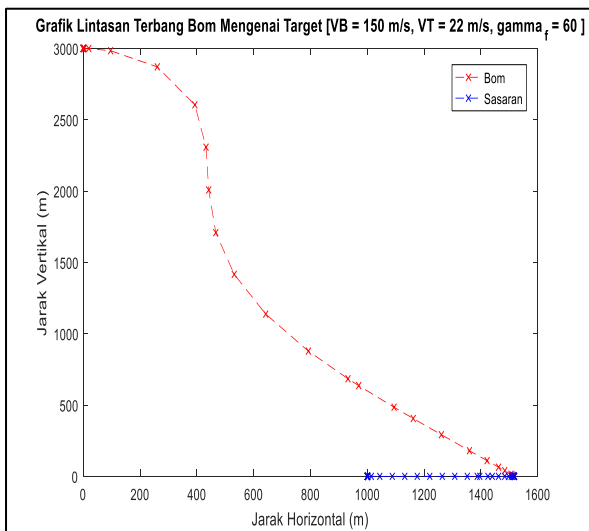
( $\gamma_f = 45^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1545 m. Pada grafik (c)  $V_T = 22 \text{ m/s}$  dan ( $\gamma_f = 60^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1516 m. Pada grafik (d)  $V_T = 22 \text{ m/s}$  dan ( $\gamma_f = 90^\circ$ ), bom mampu mencapai



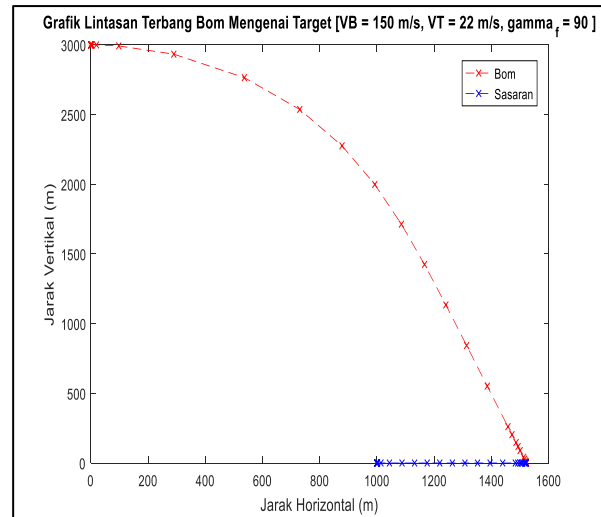
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 11.** (a) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 30^0$ , (b) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 45^0$ , (c) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 60^0$ , (d) Grafik Lintasan Bom terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 90^0$

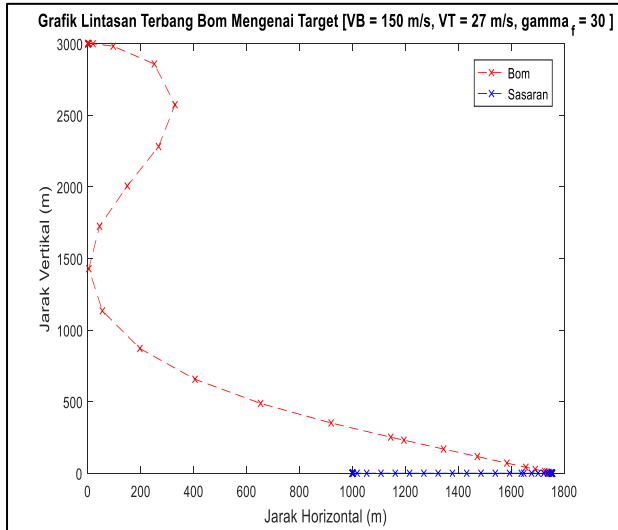
Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

sasaran bergerak pada jarak horizontal 1522 m. Gambaran hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 11.

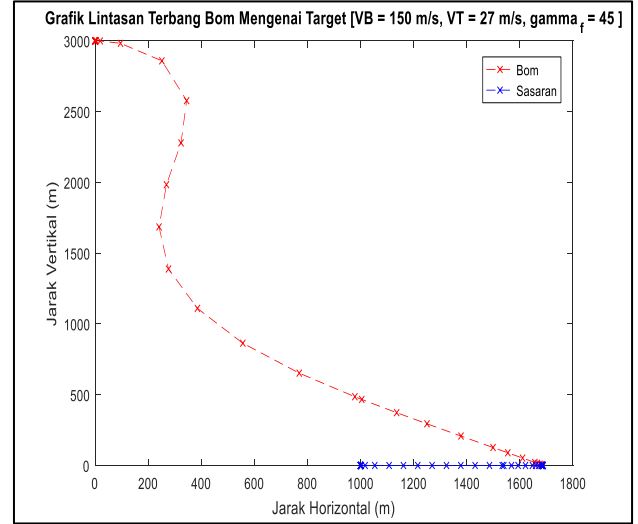
### Simulasi TPG Dengan Kecepatan Sasaran Bergerak $V_T=27$ m/s

Simulasi dijalankan dengan data input kecepatan sasaran bergerak ( $V_T$ ) = 22

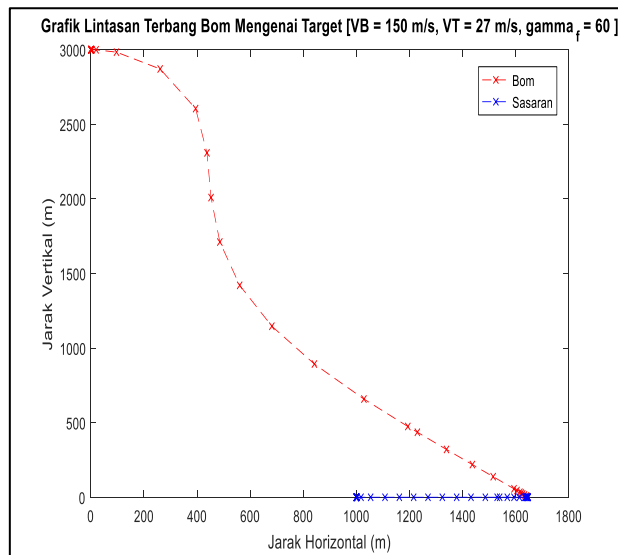
m/s. Pada grafik (a)  $V_T = 27$  m/s dan ( $\gamma_f = 30^0$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1752 m. Pada grafik (b)  $V_T = 27$  m/s dan ( $\gamma_f = 45^0$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1684 m. Pada grafik (c)  $V_T = 27$  m/s dan ( $\gamma_f = 60^0$ ), bom mampu mencapai



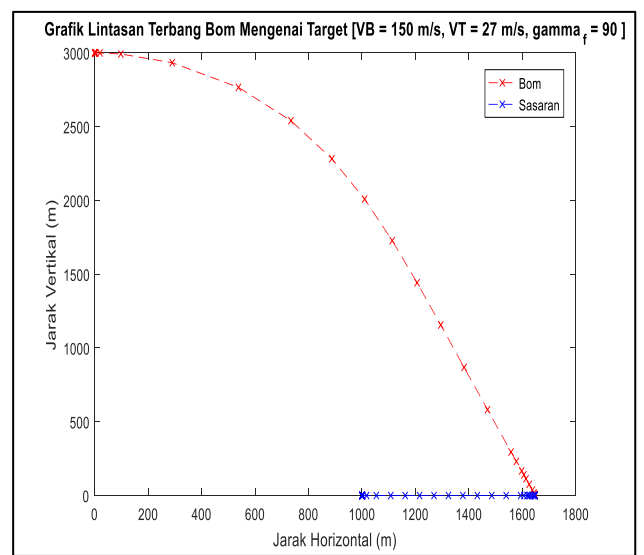
sasaran bergerak pada jarak horizontal



(b)



(c)



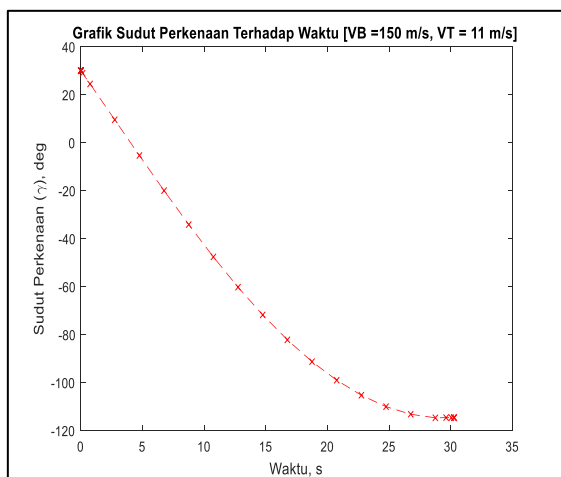
(d)

**Gambar 12.** (a) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 30^\circ$ , (b) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 45^\circ$ , (c) Grafik Lintasan Bom Terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 60^\circ$ , (d) Grafik Lintasan Bom terhadap Sasaran Bergerak Pada  $\gamma_f = 90^\circ$   
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

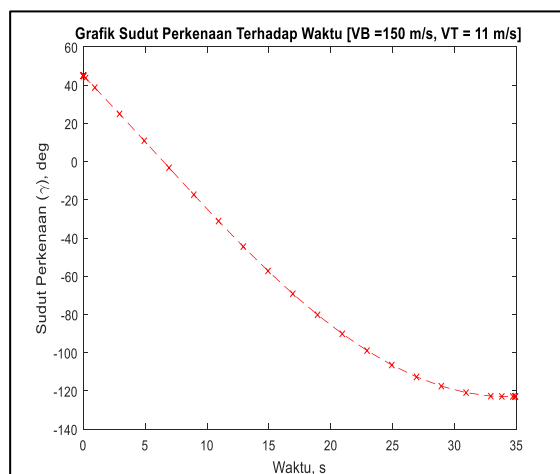
1645 m. Pada grafik (d)  $V_T = 27\text{ m/s}$  dan ( $\gamma_f = 90^\circ$ ), bom mampu mencapai sasaran bergerak pada jarak horizontal 1648 m terlihat pada Gambar 12.

Hasil grafik-grafik simulasi tersebut menunjukkan bahwa model dinamik bom terhadap sasaran bergerak menggunakan sistem pemandu TPG mampu membuat

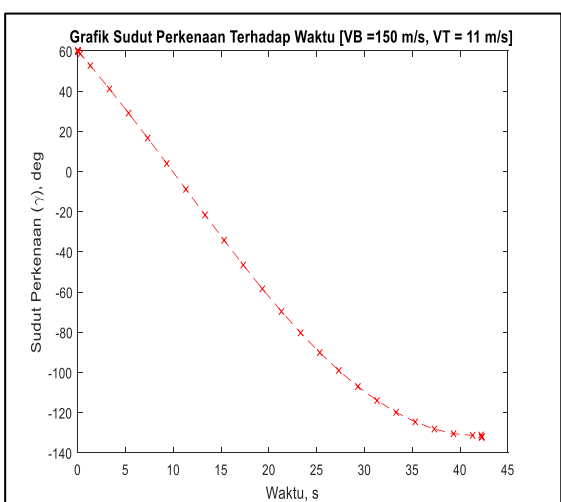
bom mencapai sasaran bergerak dengan tepat. Menurut Chang Hun, Lee et al (2013), koefisien fungsi polinomial ditentukan untuk memenuhi batasan dimana jarak jangkauan bom terhadap sasaran bergerak (*miss distance*) bernilai nol maka kendali sudut perkenaan akan mencapai sudut yang diinginkan dan



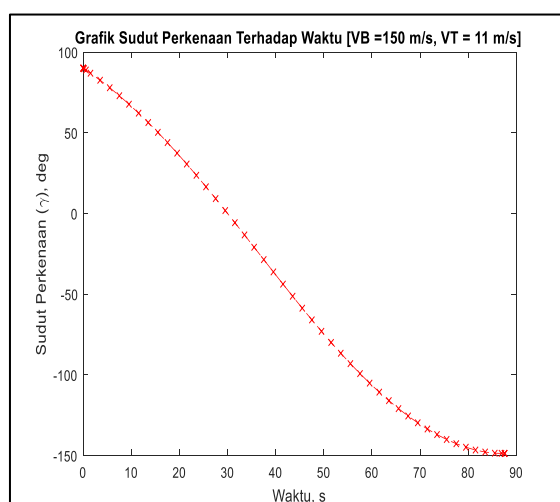
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 13.** (a) Grafik Sudut Perkenaan Terhadap Waktu Pada  $\gamma_f = 30^\circ$ , (b) Grafik Sudut Perkenaan Terhadap Waktu Pada  $\gamma_f = 45^\circ$ , (c) Grafik Sudut Perkenaan Terhadap Waktu Pada  $\gamma_f = 60^\circ$ , (d) Grafik Sudut Perkenaan Terhadap Waktu Pada  $\gamma_f = 90^\circ$   
 Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

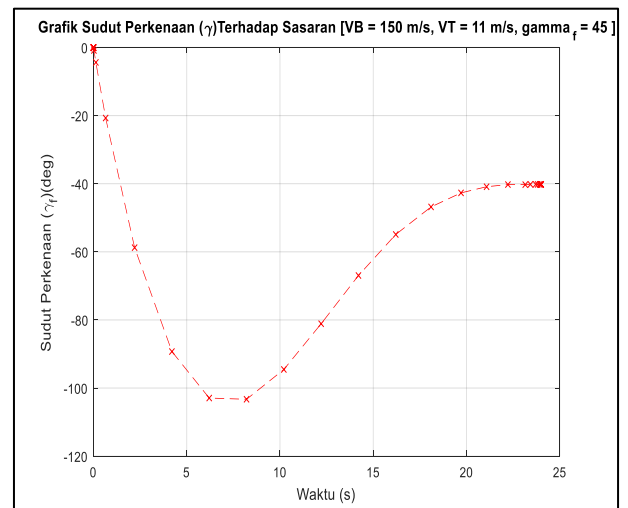
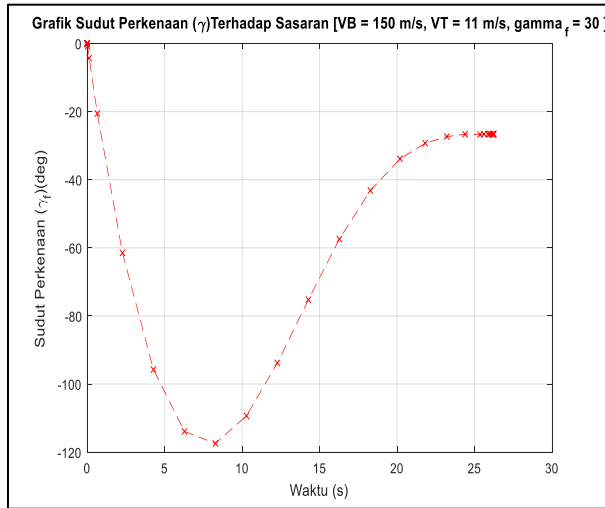
percepatan final bernilai nol<sup>12</sup>. Dalam penelitian ini, batasan-batasan tersebut terbukti karena fungsi polinomial *time-to-go* mampu mengkoreksi setiap titik lintasan balistik bom menuju sasaran bergerak.

### Simulasi Sudut Perkenaan

#### *Pure Proportional Navigation (PPN)*

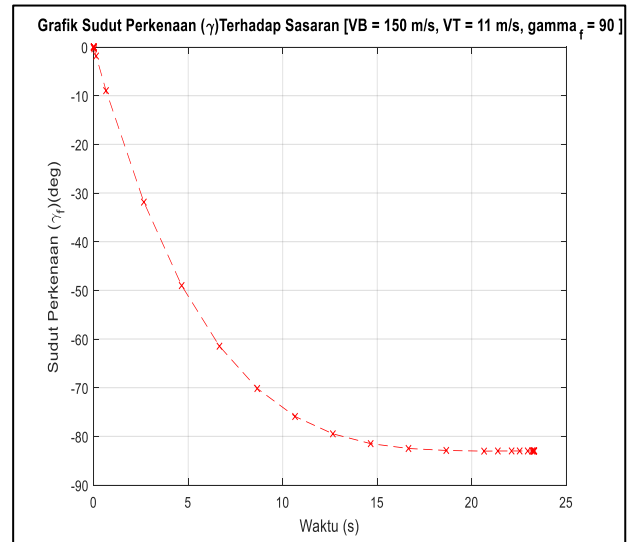
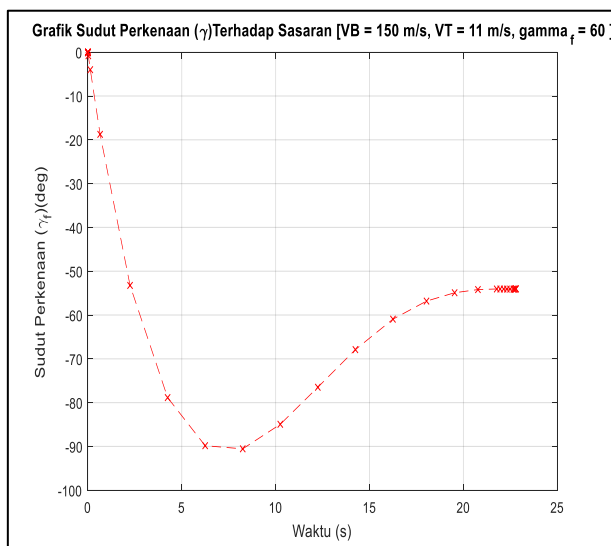
Salah satu hasil grafik sudut perkenaan terhadap waktu dengan sistem pemandu *PPN* yang dianalisis sebagai

<sup>12</sup> Chang Hun Lee et al. "Polynomial Guidance Laws Considering Final Impact Angle and Acceleration Constraint". *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic System* Vo.49 No.1 January, 2013, hlm. 76.



contoh adalah grafik hasil simulasi model

(b)



(c)

(d)

**Gambar 14.** Grafik Sudut Perkenaannya Terhadap Waktu Dengan Kecepatan Sasaran 11 m/s (a) Sudut Perkenaannya  $\gamma_f = 30^\circ$ , (b) Sudut Perkenaannya  $\gamma_f = 45^\circ$ , (c) Sudut Perkenaannya  $\gamma_f = 60^\circ$ , (d) Sudut Perkenaannya  $\gamma_f = 90^\circ$ .

Sumber: Hasil Olahan Peneliti, 2019

dinamik yang menggunakan kecepatan sasaran 11 m/s. Grafik-grafik tersebut menunjukkan bahwa sistem pemandu PPN tidak memiliki kemampuan untuk mengendalikan sudut perkenaannya bom mengenai sasaran bergerak. Pernyataan tersebut terbukti dari nilai empat grafik hasil simulasi yang memiliki sudut awal dan sudut perkenaannya yang berbeda-beda.

Grafik (a) menunjukkan sudut awal dimulai dari  $30^\circ$  dan sudut perkenaannya adalah  $118^\circ$ . Grafik (b) menunjukkan sudut awal dimulai dari  $45^\circ$  dan sudut perkenaannya adalah  $122^\circ$ . Grafik (c) menunjukkan sudut awal dimulai dari  $60^\circ$  dan sudut perkenaannya adalah  $130^\circ$ . Grafik (d) menunjukkan sudut awal dimulai dari  $90^\circ$

dan sudut perkenaannya adalah  $150^\circ$  yang terlihat pada Gambar 13.

### **Time-to-go Polynomial Guidance (TPG)**

Grafik sudut perkenaan terhadap waktu final dengan sistem pemandu TPG yang dianalisis pada contoh ini yaitu grafik yang menggunakan kecepatan sasaran 11 m/s yang dapat dilihat pada Gambar 14.

Pada grafik (a)  $\gamma_f = 30^\circ$ , bom mampu mencapai sudut perkenaan final ( $\gamma_{B_f} = 29^\circ$ ) dengan waktu final 27 s. Pada grafik (b)  $\gamma_f = 45^\circ$ , bom mampu mencapai sudut perkenaan final ( $\gamma_{B_f} = 42^\circ$ ) dengan waktu final 24 s. Pada grafik (c)  $\gamma_f = 60^\circ$ , bom mampu mencapai sudut perkenaan final ( $\gamma_{B_f} = 55^\circ$ ) dengan waktu final 23 s. Pada grafik (d)  $\gamma_f = 90^\circ$ , bom mampu mencapai sudut perkenaan final ( $\gamma_{B_f} = 84^\circ$ ) dengan waktu final 23 s. Berdasarkan hasil penelitian ini, nilai waktu final bom saat mengenai sasaran bergerak semakin cepat seiring dengan perubahan nilai sudut perkenaan yang semakin membesar.

Pernyataan sistem pemandu TPG mampu mengendalikan sudut perkenaan terbukti dari keempat grafik tersebut yang memiliki titik awal yang sama yaitu  $0^\circ$  dan titik akhir yang mendekati nilai sudut

perkenaan yang ingin dicapai. Tetapi, nilai keakurasian kendali sudut perkenaan bom terhadap sasaran bergerak semakin berkurang apabila sasaran tersebut memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Hal tersebut terjadi karena pergerakan defleksi sirip yang semakin cepat dapat membuat sistem kendali sirip pada ekor bom mengatur sudutnya kurang dari sudut yang diinginkan dan mengakibatkan muncul eror ketika sirip dibelokkan.

Menurut Chang Hun, Lee et al (2013), kendali sudut perkenaan menjadi faktor yang lebih utama daripada kendali sudut lintasan bom karena kendali sudut perkenaan yang tepat dapat menghancurkan sasaran secara efektif<sup>13</sup>. Bom yang bermanuver ketika bom menuju sasaran memiliki sudut yang tidak sama dengan sudut lintasan terbangnya karena adanya *angle of attack*. Apabila *angle of attack* terlalu besar maka bom dapat memantul dari sasaran dan menimbulkan kerusakan sistem bom tersebut saat benturan sehingga efek ledakan kurang maksimal. Sementara itu, *angle of attack* yang bernilai kecil sangat direkomendasikan untuk memastikan sudut lintasan terbang sama dengan sudut bom<sup>14</sup>.

---

<sup>13</sup> Chang Hun, Lee et al, op.cit. hlm. 75

<sup>14</sup> Chang Hun, Lee et al, loc. cit.

## Kesimpulan

Dalam perbandingan sistem pemandu PPN dan TPG pada bom terpandu BT-X, pemandu yang diterapkan dalam bom BT-X lebih mengaplikasikan sistem pemandu TPG daripada sistem pemandu PPN. Sistem pemandu TPG mampu membentuk lintasan bom terhadap sasaran bergerak dengan model lintasan bom yang berbeda-beda. Pengaplikasian lintasan-lintasan tersebut bergantung pada dimana titik terlemah sasaran bergerak berada. Selain itu, sistem pemandu TPG mampu melakukan dua kali perintah percepatan bom untuk mengenai sasaran bergerak.

Dalam perbandingan hasil simulasi sistem pemandu PPN dan TPG pada model dinamik simulink Matlab, sistem pemandu TPG cenderung memiliki kelebihan dan lebih aplikatif daripada sistem pemandu PPN. Sistem pemandu TPG mampu menghancurkan sasaran bergerak dengan tepat dan mengendalikan sudut perkenaannya dengan limit sudut  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $90^\circ$ . Sedangkan, sistem pemandu PPN hanya mampu menghancurkan sasaran bergerak tetapi tidak mampu mengendalikan sudut perkenaannya. Nilai keakurasian sudut perkenaan akan semakin rendah apabila sasaran bergerak

memiliki kecepatan yang lebih tinggi. *Angle of attack* yang bernilai kecil juga sangat direkomendasikan untuk memastikan sudut lintasan terbang sama dengan sudut perkenaan bom. Apabila *angle of attack* terlalu besar maka bom dapat memantul dari sasaran dan menimbulkan kerusakan sistem saat benturan sehingga efek ledakan kurang maksimal.

## Saran

Berdasarkan kesimpulan tersebut, peneliti dapat mengungkapkan beberapa saran sebagai berikut

1. Untuk memahami dinamika gerak bom terpandu lebih lanjut, penelitian selanjutnya juga dapat dilakukan dengan mengubah kecepatan bom (memvariasikan kecepatan bom). Selain itu, skenario operasi dilakukan dengan kondisi sasaran bergerak mendekat.
2. Jika peneliti selanjutnya berniat melanjutkan penelitian sebelumnya maka *software* yang dianjurkan untuk digunakan adalah versi *software* yang sama dengan peneliti sebelumnya. *Software* yang berbeda versi biasanya

memiliki pengaturan atau perintah pemrograman yang sedikit berbeda.

3. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan membuat model dinamik pada 3DOF atau menambah koefisien-koefisien eksternal seperti kondisi atmosfer ketika bom dijatuhkan, faktor gangguan (noise) dan kemungkinan eror yang dapat terjadi pada sistem. Pada kondisi 3DOF, pemrograman tersebut dapat diekstrak untuk diinput pada *on board computer* bom di sistem yang nyata.

## Daftar Pustaka

### Buku

- Direktorat Riset Dan Pengabdian Masyarakat. 2018. *Panduan Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat Edisi XII*. Direktorat Jenderal Penguatan Riset Dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi Dan Pendidikan Tinggi.
- Khotimah, B.K. 2015. *Teori Simulasi Dan Pemodelan: Konsep, Aplikasi Dan Terapan* Fakultas Teknik Prodi Teknik Informatika Universitas Trunojoyo Madura: Wade Group
- Souris, G, M. 2003. *Missile Guidance and Control Systems*. Springer: New York. ISBN 0-387-00726-1

### Internet

- Korean Society for Industrial And Applied Mathematics. 2018. "Homing Guidance", dalam <https://www.ksiam.org/conference/3cbf86f3-4131-440b-a6f6-407c6c52edbf/past>, KSIAM 2014, Jeju, diakses 23 Januari 2019
- Milan N. Vego. 2006. *Effects-Based Operations: A Critique*, dalam *Ndu.press.ndu.edu. Issue 41, 2 quarter/JFQs*, diakses 20 Desember 2018.
- Thomson, Loren. 2018. *JDAM: How Boeing's Low Cost Smart Bomb Revolutionized Strike Warfare*, dalam <https://www.forbes.com/sites/lorenthompson/2018/08/29/jdam-how-boeings-low-cost-smart-bomb-revolutionized-strike-warfare/#15fc6112c7da>, diakses 21 Januari 2018

### Jurnal

- Lee, Chang Hun, Shin, Hyo San, Lee, Jin Ik, Tahk, Min Jea. 2013. "Polynomial Guidance Laws Considering Final Impact Angle and Acceleration Constraint". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* Vo.49 No.1 January, 2013, hlm. 74-92.
- Lee, Chang Hun, Kim, Tae Hun, Tahk, Min Jea. 2018. *Zero Effort Miss Shaping Guidance Laws*. *IEEE Transaction On Aerospace And Electronic Systems*, Volume: 54, Issue:2, April 2018 pp 693-705.