

## Research Article

## Simulasi Deteksi Posisi dan Lintasan Roket Menggunakan Algoritma *TDOA-Trilateration* pada Sistem Radar Sekunder

Shulchul Chabib Achmad<sup>1</sup>, Darjat<sup>2</sup>, Yuli Christiyono<sup>2</sup>, Ngatelan<sup>2</sup>

1. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

2. Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang

### Abstract

Position and trajectory detection of rockets is very necessary for the launch of rockets can work as expected. If position and trajectory of rockets aren't monitored properly, it could be bad. Therefore, we need solutions to monitor the position and trajectory rockets with the technical studies in particular. Rockets moves with initial power and power when rockets fly until its produce acceleration. The rockets movement are arranged by the law of mechanics orbital and its are affected by the law of aerodynamics. The output result from this detection, will be used as comparative data with the expected trajectory. Through this final project, we simulate application of *TDOA-Trilateration* Algorithm for detect position and trajectory of rocket on secondary radar system. Technique for get distance between transceiver station and transponder is with find time difference of transmit and receive signal between transceiver station and transponder. This technique is called with *TDOA* (Time Difference Of Arrival). After Distance between transceiver station and transponder is known, three-dimensional position can be searched with *Trilateration* method. This proses will be simulated with software *Matlab R2008a*. On the simulation testing indicate that rockets position and trajectory which result from simulation of rockets trajectory formation stage with simulation stage to detect position and trajectory of rockets have the same  $x$ ,  $y$ ,  $z$  values. However, there is one point of position which haven't the same  $z$  value while the  $z$  value is negatif. Variation values of  $D_0$ ,  $D_1$ , and  $D_2$  (the placement of Ground Station) aren't influential to the detection values ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), but influential to values of  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ , and  $\Delta T_3$ .

**Keyword :** *TDOA* (Time Difference Of Arrival), *Trilateration*, rockets, transceiver, transponder.

### I. PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Kehandalan dan keakuratan dalam mendeteksi posisi dan lintasan benda merupakan hal yang dibutuhkan bagi orang yang hidup pada masa modern ini, terutama bagi dunia militer. Apabila benda yang dideteksi posisi dan lintasan adalah roket, tentu harus melakukan kajian teknis secara mendalam. Roket bergerak dengan tenaga penggerak awal dan tenaga penggerak ketika roket terbang sehingga menghasilkan percepatan. Pergerakan roket diatur oleh hukum mekanika orbital dan dipengaruhi oleh hukum aerodinamis. Hasil keluaran dari deteksi posisi dan lintasan roket ini nantinya bisa digunakan sebagai data pembandingan dengan lintasan yang diharapkan.

Sistem yang biasanya digunakan dalam mendeteksi posisi suatu benda adalah *GPS* dan sistem radar. Pada *GPS*, teknik untuk menentukan jarak antara *receiver* pengguna dengan *emitter* adalah dengan konsep *Time of Arrival* (*TOA*). Dengan mengukur waktu perambatan sinyal broadcast dari beberapa *emitter* yang sudah diketahui lokasinya (*Multilateration*), maka *receiver* dapat menentukan posisinya [6]. Pada sistem radar sekunder, teknik untuk menentukan jarak antara *Ground station* dengan suatu objek yang memuat transponder adalah dengan konsep *Time Difference of Arrival* (*TDOA*).

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi penerapan teknik perpaduan antara *GPS* dan sistem radar sekunder yaitu algoritma *TDOA* (*Time Difference of Arrival*) - *Trilateration* untuk mendeteksi posisi dan lintasan roket dalam koordinat 3 dimensi. Perangkat lunak yang digunakan adalah *Matlab 2008a*. Langkah pengujian yang dilakukan adalah menguji

Algoritma *TDOA-Trilateration* untuk mendeteksi posisi dan lintasan roket dengan menggunakan beberapa variasi nilai  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  (nilai yang menunjukkan penempatan letak dari 3 *ground Station* A, B, dan C) dan beberapa nilai parameter masukan dalam simulasi pembentukan lintasan roket.

#### 1.2 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Melakukan simulasi deteksi posisi dan lintasan roket menggunakan algoritma *TDOA-Trilateration* pada sistem radar sekunder.
2. Melakukan analisis pengaruh variasi nilai  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  (nilai yang menunjukkan penempatan letak dari 3 *ground Station* A, B, dan C) dan beberapa nilai parameter masukan pembentuk lintasan roket terhadap kinerja dari simulasi deteksi posisi dan lintasan roket.

#### 1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan dibatasi sebagai berikut :

1. Algoritma yang digunakan untuk mendeteksi posisi dan lintasan adalah *TDOA-Trilateration*. Proses transmisi sinyal dianggap ideal.
2. Pembuatan program bantu menggunakan *Matlab 7.6.0* (2008a).
3. Pengujian yang dilakukan bersifat simulasi dan *offline*.
4. Dalam simulasi pembentukan posisi dan lintasan roket hanya menggunakan hukum mekanika orbital, sedangkan hukum aerodinamis tidak dilibatkan. Gaya rotasi pada roket juga tidak diperhitungkan.

5. Jarak pengukuran antara *ground station* dan *transponder* dengan metode TDOA diasumsikan sama dengan jarak sebenarnya.

**II. DASAR TEORI**

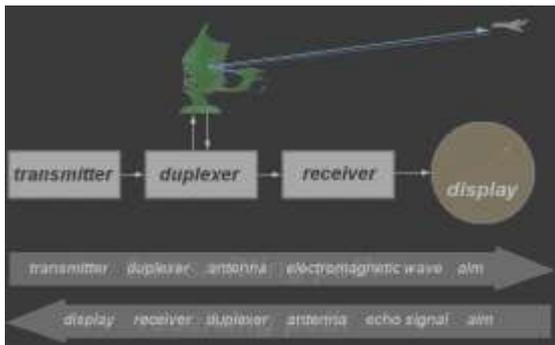
**2.1 Konsep RADAR** [11],[15]

Radar merupakan sebuah sistem elektromagnetik untuk pendeteksian dan penentuan lokasi objek. Radar beroperasi dengan memancarkan jenis khusus dari bentuk gelombang, contohnya gelombang sinus *pulse-modulated* dan mendeteksi sifat dari gema sinyal. Klasifikasi sistem radar berdasarkan teknik penentuan jarak antara *Ground Station* dengan target, terbagi atas 2 macam, yaitu Radar Primer (*Radar Basic*) dan Radar Sekunder.

Prinsip kerja dari Radar Primer yaitu ketika Radar Primer mengirimkan sinyal berfrekuensi tinggi, sinyal tersebut akan dipantulkan oleh target. Gema yang muncul diterima dan dievaluasi untuk diproses menjadi koordinat posisi. Radar merupakan singkatan dari kata *radio detection and ranging*. Bentuk gelombang yang paling sering digunakan adalah *train of narrow, rectangular-shape pulse modulating*, sebuah gelombang sinus pembawa. Jarak target ditentukan oleh pengukuran waktu  $T_R$  yang dibutuhkan oleh pulsa untuk melintas ke target dan kembali lagi. Karena energi elektromagnetik merambat pada kecepatan cahaya  $c = 3 \times 10^8$  m/s, jarak R adalah

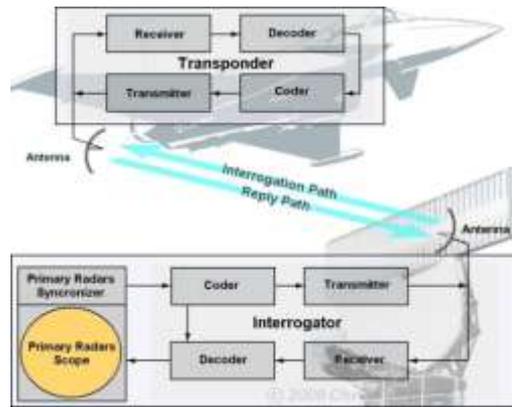
$$R = \frac{cT_R}{2} \quad \dots(1)$$

Faktor 2 muncul pada penyebut karena perambatan *two-way* dari radar. Jika jarak memiliki satuan kilometer dan  $T_R$  dalam mikrosekond, persamaan (2.1) menjadi  $R(\text{km}) = 0,15T_R(\mu\text{s})$  or  $R(\text{nmi}) = 0,081T_R(\mu\text{s}) \quad \dots(2)$  Setiap mikrosekond dari perjalanan waktu sama dengan jarak dari 0,081 *nautical mile*, 0,093 *statute mile*, 150 meter, 164 *yard*, atau 492 kaki. Prinsip radar primer dapat dideskripsikan pada gambar di bawah ini,



**Gambar 1** prinsip radar primer

Pada Radar Sekunder, objek benda yang akan dideteksi posisinya harus mempunyai transponder (transmitting responder) dan transponder ini menanggapi interogasi (sinyal kirim) dengan sebuah sinyal kode balasan. Jadi, sinyal yang dikirim oleh transmitter yang ada pada *ground station*, selanjutnya diterima dan diproses oleh transponder yang ada pada objek yang dideteksi posisinya. Setelah itu, sinyal tersebut dipancarkan kembali ke *ground station*. Perbedaan waktu kirim dan terima sinyal ini kemudian digunakan untuk mencari jarak antara *ground station* dengan objek yang memuat transponder. Prinsip kerja radar sekunder dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini,



**Gambar 2** Prinsip kerja radar sekunder

Prinsip kerja dari radar sekunder sebenarnya hampir sama dengan radar primer. Perbedaan mendasar antara radar primer dan radar sekunder adalah terletak pada aktif atau tidaknya objek benda dalam memantulkan kembali sinyal dari *ground station*.

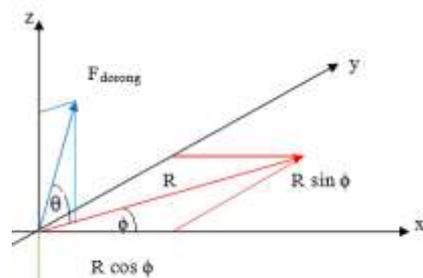
**2.2 Teori Gerak Roket** [2],[10]

Prinsip kerja gaya dorong roket merupakan penerapan dari hukum ketiga Newton dan kekekalan momentum. Secara umum, gaya translasi roket dapat dinyatakan pada persamaan di bawah ini:

$$\sum F = ma \quad \dots (3)$$

dengan  $\sum F$  adalah resultan gaya yang terjadi pada roket,  $m$  adalah massa roket, dan  $a$  adalah percepatan roket. Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa persamaan gerak roket dapat dicari dengan menghitung semua resultan kecepatan awal dan percepatan yang terjadi pada roket.

Deskripsi mengenai pergerakan roket dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini,



**Gambar 3** Ilustrasi pergerakan roket

Dari gambar di atas, untuk mencari nilai posisi pada sumbu x dan y, maka secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$x = R \cos \phi \quad \dots (4)$$

$$y = R \sin \phi \quad \dots (5)$$

R merupakan resultan dari kecepatan awal dan percepatan pada bidang x-y. Sehingga, secara matematis R dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$R = (v_0 \cos \theta)t + \frac{1}{2} (a \cos \theta)t^2 \quad \dots (6)$$

Untuk mencari nilai posisi pada sumbu z dapat menggunakan rumus:

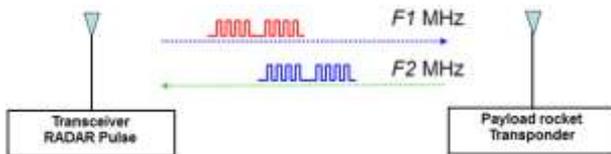
$$z = (v_0 \sin \theta)t + \frac{1}{2} (a \sin \theta)t^2 - \frac{1}{2} g t^2 \quad \dots (7)$$

Rumus pergerakan roket ini dapat digunakan dengan beberapa ketentuan sebagai berikut:

- x, y, dan z adalah sumbu koordinat 3 dimensi (x,y,z) dalam meter.
- g adalah percepatan gravitasi bumi (dianggap konstan 9,81 m/s<sup>2</sup>).
- t adalah waktu pada saat roket berjalan (s).
- φ adalah sudut simpang (derajat).
- θ adalah sudut luncur (derajat).
- v<sub>0</sub> adalah kecepatan awal (m/s).
- a adalah percepatan roket (m/s<sup>2</sup>).
- Mengabaikan hukum aerodinamis.
- Massa roket diasumsikan konstan terhadap waktu.
- Tidak melibatkan gaya rotasi.

**2.3 Teknik Pengukuran Jarak TDOA (Time Difference Of Arrival) Pada Radar Sekunder** [7], [11], [18]

Sistem Radar (Radio Detection and Ranging) Sekunder dalam menentukan jarak antara *transceiver* (transmitter receiver) dan *transponder* (transmitting responder) menggunakan teknik TDOA (Time Difference Of Arrival). Teknik TDOA ini bekerja sesuai dengan gambaran yang ada di bawah ini,



Gambar 4 Sistem kerja radar sekunder

Dari gambar di atas, untuk menghitung jarak antara *Transceiver* dan *Transponder*, pada mulanya *Transceiver* mengirimkan sinyal sebesar F1 MHz di waktu t<sub>1</sub> kepada *Transponder*. Kemudian *Transponder* menangkap sinyal F1, menguatkan dan memancarkan kembali ke *Transceiver* dengan frekuensi F2 MHz di waktu t<sub>2</sub>. Sinyal yang dikirim dan terima pada saat yang hampir bersamaan memiliki perbedaan waktu yang dapat disimbolkan dengan Δt. Penundaan waktu tersebut kemudian dikalikan dengan kecepatan cahaya (c) sebesar 299.729.458 m/s dan di bagi dua maka akan di dapatkan jarak obyek yang dicari. Secara matematis, untuk menghitung jarak (R) antara *Transceiver* dan *Transponder* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R = \frac{c \cdot [\Delta t - T_{\text{transponder}}]}{2} \dots (8)$$

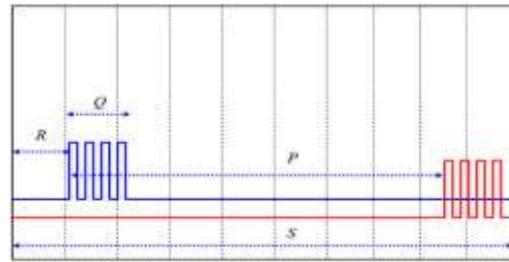
T<sub>transponder</sub> adalah waktu proses di transponder. Dalam menentukan nilai T<sub>transponder</sub>, dapat dihitung dengan rumus:

$$T_{\text{transponder}} = \frac{n}{v_p}$$

n adalah jumlah instruksi dan v<sub>p</sub> adalah kecepatan memproses instruksi. Jika mikrokontroller yang digunakan dalam *transponder* adalah ATMEGA 1280 yang memiliki kecepatan 16 MIPS (Mega Instructions Per Second) dan jika jumlah instruksi yang digunakan 32 instruksi, maka T<sub>transponder</sub> dapat diasumsikan:

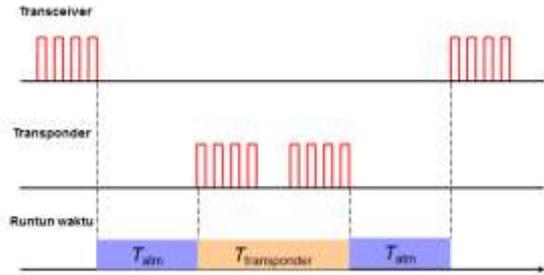
$$T_{\text{transponder}} = \frac{32}{16 \text{ MIPS}} = 2 \times 10^{-6} \text{ s} = 2 \mu\text{s}$$

Ilustrasi sinyal Radar Sekunder dan runtun perjalanan sinyal radar sekunder dapat ditunjukkan pada gambar 5 dan 6.



Gambar 5 Sinyal radar sekunder

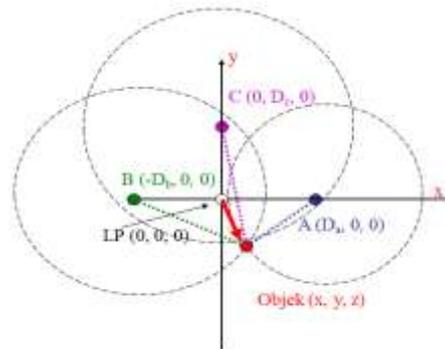
P = maksimum delay, R = delay sinyal referensi  
Q = lebar sinyal, S = lebar window data akuisisi



Gambar 6 Runtun perjalanan sinyal radar sekunder

**2.4 Algoritma Trilateration Untuk Mendeteksi Posisi Suatu Benda** [7], [14]

*Trilateration* adalah sebuah metode untuk menentukan posisi sebuah objek berdasarkan pengukuran jarak secara simultan dari tiga buah titik (dimisalkan titik A, B, dan C) yang terletak di lokasi yang diketahui. Seperti pada prinsip trigonometri, bahwa jika suatu titik diamati dari tiga buah tempat yang berbeda pada kondisi tetap, maka koordinat titik tersebut dapat dihitung walaupun posisi titik tersebut bergerak. Prinsip *Trilateration* 3 dimensi dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini,



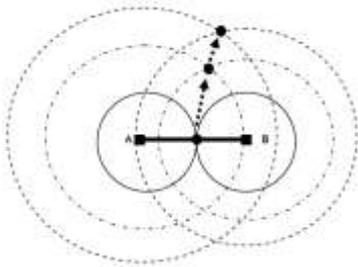
Gambar 7 Trilateration 3 dimensi

Dari gambar di atas, posisi 3 dimensi objek dengan koordinat (x, y, z) dapat dideteksi dengan cara mengukur jarak objek benda dari tiga buah titik untuk dapat dihitung perubahan koordinat trayektorinya. Prinsip dasar dari *trilateration* dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = R_i^2, (i = 1, 2, 3) \dots (9)$$

Dimana R<sub>i</sub> merupakan jarak yang terukur oleh titik ke-i pada posisi (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>) sampai objek benda pada posisi (x, y, z). Jadi, posisi (x, y, z) dari objek benda dapat diukur dengan adanya 3 pengukuran jarak R<sub>i</sub> (i = 1, 2, 3). Masing-masing jarak antara posisi objek benda dengan titik A, B, dan C disimbolkan dengan R<sub>a</sub>, R<sub>b</sub>, R<sub>c</sub>. Untuk menentukan koordinat posisi dalam tiga sumbu, maka dapat digunakan potongan persamaan bola dari tiga titik tersebut. Ilustrasi perpotongan

dua buah bola dalam satu bidang adalah seperti pada gambar di bawah ini,



**Gambar 8** Ilustrasi perpotongan koordinat bola dalam 2 dimensi

Posisi titik A dan B adalah titik-titik sebagai pusat koordinat bola. Perpotongan bola tersebut merupakan titik koordinat objek benda, sehingga semakin bergerak bentuk bola semakin membesar. Jika ke arah kiri maka bola sebelah kanan menjadi lebih besar dari pada bola sebelah kiri, dan begitu pula sebaliknya.

Jika menggunakan tiga buah bola, maka masing-masing persamaan bola dapat dituliskan sebagai berikut,

$$R_a^2 = (x - D_a)^2 + y^2 + z^2 \quad \dots (10)$$

$$R_b^2 = (x + D_b)^2 + y^2 + z^2 \quad \dots (11)$$

$$R_c^2 = x^2 + (y - D_c)^2 + z^2 \quad \dots (12)$$

Posisi objek benda dalam koordinat 3 dimensi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

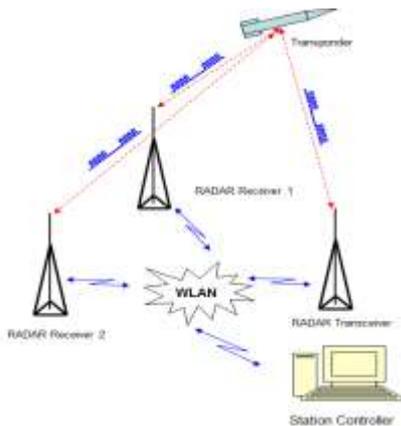
$$x = \frac{R_a^2 - R_b^2 - D_a^2 + D_b^2}{-2D_a - 2D_b} \quad \dots (13)$$

$$y = \frac{R_a^2 - R_c^2 + 2D_a x - D_a^2 + D_c^2}{2D_c} \quad \dots (14)$$

$$z = \text{sqrt} [R_a^2 - (x - D_a)^2 - y^2] \quad \dots (15)$$

### III. PERANCANGAN SISTEM

Deskripsi secara umum mengenai sistem radar sekunder yang diteliti ini dapat ditunjukkan pada gambar di bawah ini :

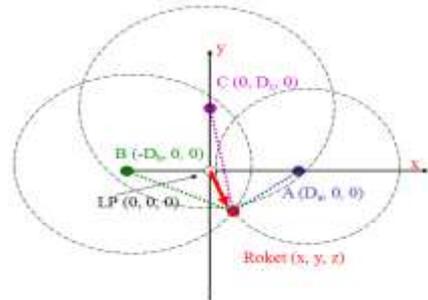


**Gambar 9** Deskripsi sistem radar sekunder

Pada perancangan simulasi ini, teknik *TDOA* (*Time Difference Of Arrival*) digunakan untuk mencari jarak (R) antara *transponder* dengan *transceiver* 1, 2, dan 3. Prinsip dasar dari *TDOA* adalah mencari selisih waktu pengiriman dengan waktu penerimaan. Urutan perjalanan sinyal dimulai dari *transceiver*, kemudian diterima dan diproses oleh *transponder*. Setelah itu, sinyal tersebut dikembalikan lagi ke *transceiver*. Secara matematis, perhitungan jarak ini dapat dituliskan seperti pada persamaan 16, yaitu:

$$R = \frac{c \cdot [\Delta t - T_{\text{transponder}}]}{2} \quad \dots (16)$$

$\Delta t$  adalah perbedaan waktu antara pengiriman dan penerimaan sinyal,  $T_{\text{transponder}}$  adalah waktu proses di transponder, dan  $c$  adalah kecepatan cahaya. Setelah jarak antara *transponder* dengan *transceiver* 1, 2, dan 3 diketahui, titik koordinat 3 Dimensi roket yang bermuatan *transponder* dapat dicari dengan metode *Trilateration*. Prinsip *Trilateration* untuk mendeteksi roket dalam koordinat 3 dimensi, dapat ditunjukkan pada gambar 10.



**Gambar 10** Trilateration 3 dimensi

Pada gambar di atas, posisi 3 dimensi roket dengan koordinat (x, y, z) dapat dideteksi dengan cara mengukur jarak objek benda dari tiga buah titik untuk dapat dihitung perubahan koordinat trayektorinya. Titik A, B, dan C merupakan posisi untuk meletakkan *Ground Station*. Masing-masing jarak antara posisi roket dengan *Ground Station* A, B, dan C adalah

$$R_a = \frac{c \cdot [\Delta t_a - T_{\text{transponder}}]}{2} \quad \dots (17)$$

$$R_b = \frac{c \cdot [\Delta t_b - T_{\text{transponder}}]}{2} \quad \dots (18)$$

$$R_c = \frac{c \cdot [\Delta t_c - T_{\text{transponder}}]}{2} \quad \dots (19)$$

Posisi roket dalam koordinat 3 dimensi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (13) sampai (15).

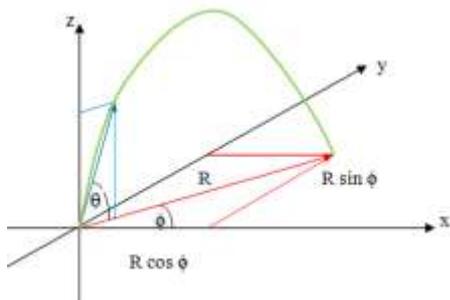
Simulasi ini memanfaatkan software Matlab R2008a. Simulasi yang dilakukan bersifat offline. Pada simulasi ini ada dua tahap, yaitu:

1. Tahap simulasi pembentukan lintasan roket. Pada tahap ini, parameter masukannya adalah sudut luncur/teta ( $\theta$ ), sudut simpang/vhi ( $\phi$ ), v awal ( $v_0$ ), percepatan (a), waktu proses *transponder* ( $T_{\text{transponder}}$ ), interval waktu cuplik (*Interval T Cuplik*), jarak antara *Ground Station* A, B, C dengan titik referensi ( $D_0, D_1, D_2$ ). Adapun keluarannya adalah dalam koordinat 3 dimensi (x,y,z) dan deltaT ( $\Delta t$ ).
2. Tahap simulasi deteksi posisi dan lintasan roket. Pada tahap ini, masukannya adalah deltaT ( $\Delta t$ ) dari hasil keluaran yang didapatkan pada tahap sebelumnya. Keluaran yang dihasilkan pada tahap kedua ini adalah berupa koordinat 3 dimensi (x,y,z) hasil deteksi posisi dan lintasan roket menggunakan algoritma *TDOA-Trilateration*.

#### 3.1 Tahap Simulasi Pembentukan Lintasan Roket

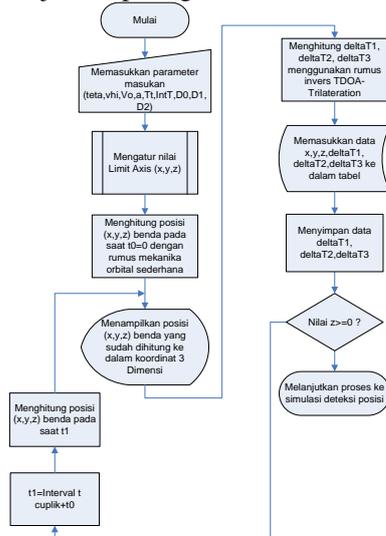
Proses simulasi pembentukan lintasan roket diperlukan untuk mendapatkan data masukan dalam proses simulasi deteksi posisi dan lintasan roket menggunakan algoritma *TDOA-Trilateration*. Untuk membentuk lintasan roket ini, digunakan rumus mekanika orbital sederhana sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x &= R \cos \phi; \\ y &= R \sin \phi; \\ R &= (v_0 \cos \theta)t + \frac{1}{2}(a \cos \theta)t^2; \\ z &= (v_0 \sin \theta)t + \frac{1}{2}(a \sin \theta)t^2 - \frac{1}{2}g t^2; \end{aligned}$$



Gambar 11 Lintasan roket secara umum

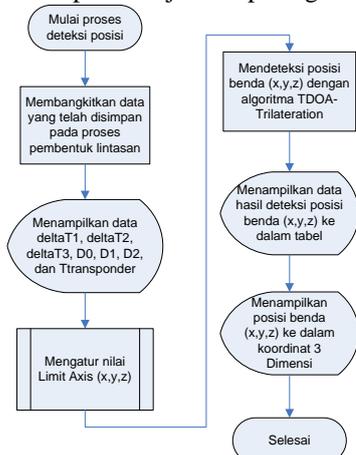
Diagram alir dari proses tahap simulasi pembentukan lintasan roket dapat ditunjukkan pada gambar 12.



Gambar 12 Diagram alir proses tahap simulasi pembentukan lintasan roket

### 3.2 Tahap Simulasi Deteksi Posisi dan Lintasan Roket

Pada simulasi ini, dilakukan pendeteksian posisi dan lintasan roket dengan data masukan deltaT ( $\Delta t$ ). Data deltaT ( $\Delta t$ ) diperoleh dari keluaran simulasi pembentukan lintasan. Data masukan deltaT ( $\Delta t$ ) ini diproses dengan menggunakan rumus TDOA-Trilateration, sehingga keluaran yang dihasilkan adalah hasil deteksi posisi dan lintasan roket dalam koordinat 3 dimensi (x,y,z). Simulasi ini bertujuan untuk menganalisis dan membuktikan kinerja dari Algoritma TDOA-Trilateration dalam mendeteksi posisi dan lintasan roket. Diagram alir dari proses simulasi deteksi posisi dan lintasan roket dapat ditunjukkan pada gambar 13.



Gambar 13 Diagram alir proses tahap simulasi deteksi posisi dan lintasan roket.

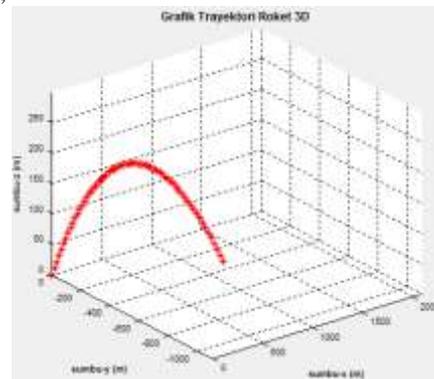
## IV. PENGUJIAN SIMULASI UNTUK PENDETEKSIAN POSISI dan LINTASAN ROKET

Pada subbab ini, dilakukan pengujian simulasi dengan menggunakan parameter masukan sebagai berikut:

Tabel 1 Nilai parameter untuk simulasi Deteksi Posisi dan Lintasan Roket

Parameter	Satuan	Nilai
Sudut Luncur (teta)	derajat	32
Sudut Simpang (vhi)	derajat	-13
v awal	m/s	100
Ttransponder	$\mu s$	2
Interval T Cuplik	sekon	0,2
Percepatan (a)	$m/s^2$	3
D0	meter	21
D1	meter	24
D2	meter	27
Limit axis x	meter	2098
Limit axis y	meter	-1099
Limit axis z	meter	299,8

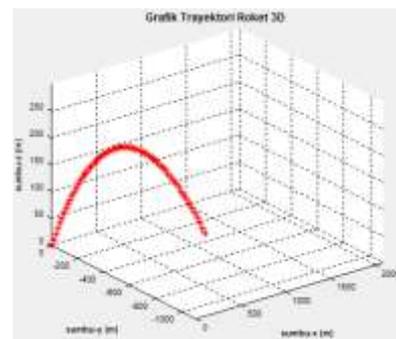
Hasil simulasi ini dapat ditunjukkan pada gambar dan tabel di bawah ini,



Gambar 14 Hasil simulasi pembentukan lintasan roket

Tabel 2 Nilai keluaran hasil simulasi pembentukan lintasan roket

	x1 (m)	y1 (m)	z1 (m)	delta T1 (s)	delta T2 (s)	delta T3 (s)
1	0	0	0	2.1401e-06	2.1601e-06	2.1801e-06
2	16.5758	-3.8268	10.4340	2.0798e-06	2.2807e-06	2.2437e-06
3	33.2508	-7.6766	20.5392	2.1676e-06	2.4090e-06	2.3486e-06
4	50.0250	-11.5482	30.3155	2.2904e-06	2.5392e-06	2.4674e-06
5	66.8983	-15.4447	39.7631	2.4180e-06	2.6689e-06	2.5914e-06
6	83.8707	-19.3631	48.8818	2.5468e-06	2.8006e-06	2.7177e-06
7	100.9424	-23.3044	57.6717	2.6757e-06	2.9311e-06	2.8451e-06
8	118.1131	-27.2696	66.1329	2.8047e-06	3.0614e-06	2.9729e-06
9	135.3831	-31.2556	74.2652	2.9334e-06	3.1914e-06	3.1010e-06
10	152.7522	-35.2656	82.0687	3.0619e-06	3.3212e-06	3.2291e-06
11	170.2204	-39.2985	89.5434	3.1902e-06	3.4507e-06	3.3572e-06
12	187.7878	-43.3542	96.6893	3.3183e-06	3.5799e-06	3.4852e-06
13	205.4544	-47.4329	103.5063	3.4461e-06	3.7090e-06	3.6131e-06



Gambar 15 Hasil simulasi deteksi posisi dan lintasan roket

**Tabel 3** Nilai x, y, dan z Hasil simulasi deteksi posisi dan lintasan roket

	x (m)	y (m)	z (m)
1	6.3159e-15	-1.6842e-14	0.0000e+00
2	16.5758 + 0	-3.8268 + 0	10.4340 + -0
3	33.2508 + 0	-7.6766 + 0	20.5392 + -0
4	50.0250 + 0	-11.5492 + 0	30.3155 + -0
5	66.8983 + 0	-15.4447 + 0	39.7631 + -0
6	83.8707 + 0	-19.3631 + 0	48.8818 + -0
7	1.0094e+02	-23.3044 + 0	57.6717 + -0
8	1.1811e+02	-27.2686 + 0	66.1329 + -0
9	1.3538e+02	-31.2556 + 0	74.2652 + -0
10	1.5275e+02	-35.2656 + 0	82.0687 + -0
11	1.7022e+02	-39.2985 + 0	89.5434 + -0
12	1.8779e+02	-43.3542 + 0	96.6893 + -0
13	2.0545e+02	-47.4329 + 0	1.0351e+02
14	2.2322e+02	-51.5344 + 0	1.0999e+02
15	2.4108e+02	-55.6589 + 0	1.1615e+02

Tabel 2 dan tabel 3 merupakan tampilan sampel data hasil pengujian simulasi deteksi posisi dan lintasan roket dengan waktu proses 15 detik.

Pada gambar 14 dan 15 serta tabel 2 dan 3 menunjukkan bahwa posisi dan lintasan roket hasil simulasi tahap pembentukan lintasan dengan simulasi tahap deteksi posisi dan lintasan roket memiliki nilai x, y, z yang semuanya hampir sama. Hal ini berarti, simulasi ini bisa mendeteksi posisi dan lintasan suatu benda.

**4.2 Pengaruh Variasi Nilai D0, D1, D2 (Penempatan Letak Ground Station)**

Pada pengujian simulasi deteksi posisi dan lintasan roket, penempatan letak *Ground Station* dan titik referensi (0,0,0) harus ditentukan terlebih dahulu. Ilustrasi penempatan letak *Ground Station* sesuai dengan gambar 10. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian pengaruh dari variasi nilai D0 (*Ground Station A*), D1 (*Ground Station B*), D2 (*Ground Station C*) terhadap hasil deteksi posisi dan lintasan roket.

Pada pengujian ini, parameter masukan yang digunakan dalam simulasi pembentukan lintasan roket adalah seperti yang ditampilkan pada tabel berikut ini:

**Tabel 4** Nilai parameter untuk pengujian variasi nilai D0, D1, dan D2 sama

Parameter	Satuan	Nilai
Sudut Luncur (teta)	derajat	32
Sudut Simpang (vhi)	derajat	-13
v awal	m/s	100
Ttransponder	µs	2
Interval T Cuplik	sekon	0,2
Percepatan (a)	m/s <sup>2</sup>	3
Limit axis x	meter	2098
Limit axis y	meter	-1099
Limit axis z	meter	299,8

**4.2.1 Variasi Nilai D0, D1, D2 Sama**

Pada pengujian ini, D0, D1, dan D2 mempunyai nilai yang sama. Variasi nilai D0, D1, dan D2 adalah:

1. D0 = D1 = D2 = 21 meter
2. D0 = D1 = D2 = 1 meter
3. D0 = D1 = D2 = 0,001 meter

Dari hasil pengujian simulasi deteksi posisi dan lintasan roket untuk variasi nilai D0, D1, D2 yang sama,

menunjukkan bahwa variasi nilai D0, D1, D2 (penempatan letak *ground station*) tidak berpengaruh terhadap pendeteksian nilai x, y, dan z. Namun, variasi ini berpengaruh terhadap nilai deltaT1, deltaT2, dan deltaT3. Semakin jauh jarak roket terhadap *ground station*, maka semakin besar pula nilai deltaT yang diperoleh. Jadi, variasi nilai D0, D1, D2 yang sama tidak berpengaruh pada pendeteksian nilai x, y, dan z. Hal ini sudah sesuai dengan rumus:

$$R = \frac{c \cdot [\Delta t - T_{transponder}]}{2} \dots (20)$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot R}{c} + T_{transponder} \dots (21)$$

Dalam simulasi deteksi posisi dan lintasan roket, sebaiknya letak *ground station* saling berjauhan (berarti D0, D1, D2 memiliki nilai yang cukup besar). Hal ini harus diperhatikan, karena semakin jauh letak antara *ground station* satu dengan yang lainnya, maka nilai presisi waktu deltaT1, deltaT2, dan deltaT3 akan semakin mudah dibedakan oleh sensor *clock*. Sebaliknya, jika semakin dekat letak antara *ground station* satu dengan yang lainnya, maka nilai presisi waktu deltaT1, deltaT2, dan deltaT3 akan semakin sulit dibedakan oleh sensor *clock*.

**4.2.1 Variasi Nilai D0, D1, D2 Berbeda**

Pada pengujian ini, D0, D1, dan D2 mempunyai nilai yang berbeda. Variasi nilai D0, D1, dan D2 adalah:

1. D0 = 21 m, D1 = 31 m, D2 = 41 m
2. D0 = 211 m, D1 = 311 m, D2 = 411 m
3. D0 = 2111 m, D1 = 3111 m, D2 = 4111 m

Dari hasil pengujian simulasi deteksi posisi dan lintasan roket untuk variasi nilai D0, D1, D2 yang berbeda, menunjukkan bahwa variasi nilai D0, D1, D2 (penempatan letak *ground station*) yang berbeda tidak berpengaruh terhadap pendeteksian nilai x, y, dan z. Namun, variasi ini berpengaruh terhadap nilai deltaT1, deltaT2, dan deltaT3. Semakin jauh jarak roket terhadap *ground station*, maka semakin besar pula nilai deltaT yang diperoleh. Hal ini sudah sesuai dengan rumus:

$$R = \frac{c \cdot [\Delta t - T_{transponder}]}{2}$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot R}{c} + T_{transponder}$$

**4.3 Pengaruh Variasi Nilai Percepatan**

Pada pengujian ini, variasi nilai percepatan yang digunakan adalah 5 m/s<sup>2</sup>, 7 m/s<sup>2</sup>, dan 9 m/s<sup>2</sup>. Parameter masukan yang digunakan dalam simulasi pembentukan lintasan roket adalah seperti yang ditampilkan pada tabel berikut ini:

**Tabel 5** Nilai parameter untuk pengujian variasi nilai percepatan

Parameter	Satuan	Nilai
Sudut Luncur (teta)	derajat	32
Sudut Simpang (vhi)	derajat	-13
v awal	m/s	100
Ttransponder	µs	2
Interval T Cuplik	sekon	0,5
D0	meter	21
D1	meter	24
D2	meter	27

Dari hasil pengujian simulasi pendeteksian posisi dan lintasan roket dengan variasi nilai percepatan, menunjukkan bahwa variasi nilai percepatan mempengaruhi hasil tahap simulasi pembentukan lintasan roket. Jangkauan roket (r) pada pengujian dengan percepatan 5 m/s<sup>2</sup> adalah

V. PENUTUP

$$r = \sqrt{(1632,484-0)^2 + (-376,887-0)^2 + (15,6455-0)^2}$$

$$= \sqrt{2665004,01026 + 142043,8108 + 244,78167}$$

$$= 1675,49772 \text{ meter}$$

Dengan cara yang sama, jangkauan roket Pada pengujian dengan percepatan 7 m/s<sup>2</sup> adalah 2299,563836 meter. Jangkauan roket Pada pengujian dengan percepatan 9 m/s<sup>2</sup> adalah 3463,8525218 meter. Jadi, semakin besar nilai percepatan roket, maka semakin jauh pula jangkauan roket yang ditempuh. Hal ini sudah sesuai dengan teori.

4.4 Pengaruh Variasi Nilai Kecepatan Awal

Pada pengujian ini, variasi nilai kecepatan awal yang digunakan adalah 75 m/s, 125 m/s, dan 175 m/s. Parameter masukan yang digunakan dalam simulasi pembentukan lintasan roket adalah seperti yang ditampilkan pada tabel berikut ini:

**Tabel 6** Nilai parameter untuk pengujian variasi nilai kecepatan awal

Parameter	Satuan	Nilai
Sudut Luncur (teta)	derajat	32
Sudut Simpang (vhi)	derajat	-13
Ttransponder	µs	2
Interval T Cuplik	sekon	0,5
Percepatan (a)	m/s <sup>2</sup>	3
D0	meter	21
D1	meter	24
D2	meter	27

Dari hasil pengujian simulasi pendeteksian posisi dan lintasan roket dengan variasi nilai kecepatan awal, menunjukkan bahwa variasi nilai kecepatan awal mempengaruhi hasil tahap simulasi pembentukan lintasan roket. Jangkauan roket (r) pada pengujian dengan kecepatan awal 75 m/s adalah

$$r = \sqrt{(700,610-0)^2 + (-161,7485-0)^2 + (6,629-0)^2}$$

$$= \sqrt{490854,3721 + 26162,577252 + 43,943641}$$

$$= 719,069463 \text{ meter}$$

Dengan cara yang sama, jangkauan roket pada pengujian dengan kecepatan awal 125 m/s adalah 2021,7607009 meter. Jangkauan roket pada pengujian dengan kecepatan awal 175 m/s adalah 3983,18016992 meter.

4.5 Pengaruh Variasi Nilai Interval T Cuplik

Pada pengujian ini, variasi nilai interval waktu cuplik yang digunakan adalah 0,1 detik, 0,5 detik, dan 1 detik. Parameter masukan yang digunakan dalam simulasi pembentukan lintasan roket adalah seperti yang ditampilkan pada tabel berikut ini:

**Tabel 7** Nilai parameter untuk pengujian variasi nilai kecepatan awal

Parameter	Satuan	Nilai
Sudut Luncur (teta)	derajat	32
Sudut Simpang (vhi)	derajat	-13
v awal	m/s	100
Ttransponder	µs	2
Percepatan (a)	m/s <sup>2</sup>	3
D0	meter	21
D1	meter	24
D2	meter	27

Dari hasil pengujian simulasi pendeteksian posisi dan lintasan roket dengan variasi nilai interval waktu cuplik, menunjukkan bahwa semakin besar nilai interval waktu cuplik, maka jarak antar titik-titik yang membentuk lintasan akan semakin renggang.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan, maka didapatkan hal-hal sebagai berikut:

1. Pada pengujian menunjukkan bahwa posisi dan lintasan roket hasil simulasi tahap pembentukan lintasan dengan simulasi tahap deteksi posisi dan lintasan roket memiliki nilai x, y, z yang semuanya hampir sama.
2. Hasil pengujian simulasi deteksi posisi dan lintasan roket untuk variasi nilai D0, D1, dan D2 yang sama maupun berbeda, menunjukkan bahwa variasi nilai D0, D1, dan D2 (penempatan letak *ground station*) tidak berpengaruh terhadap pendeteksian nilai x, y, dan z.
3. Variasi nilai D0, D1, dan D2 berpengaruh terhadap nilai deltaT1, deltaT2, dan deltaT3. Semakin jauh jarak roket terhadap *ground station*, maka semakin besar pula nilai deltaT yang diperoleh.
4. Semakin jauh letak antara *ground station* satu dengan yang lainnya, maka nilai presisi waktu deltaT1, deltaT2, dan deltaT3 akan semakin mudah dibedakan oleh sensor *clock*. Sebaliknya, jika semakin dekat letak antara *ground station* satu dengan yang lainnya, maka nilai presisi waktu deltaT1, deltaT2, dan deltaT3 akan semakin sulit dibedakan oleh sensor *clock*.

5.2 Saran

1. Dapat dilakukan penelitian lanjutan untuk menerapkan Algoritma *TDOA-Trilateration* secara nyata dan *online*.
2. Perlu adanya penambahan tapis untuk memperkecil kesalahan, jika dilakukan penerapan secara nyata dan *online*.
3. Pendeteksian posisi ini dapat dikembangkan lagi dengan fasilitas penentuan letak *ground station* yang bebas tanpa ada batasan.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendeteksi posisi dan lintasan suatu objek dengan menggunakan kombinasi algoritma lain, seperti *TOA (Time of Arrival)*, *AOA (Angle of Arrival)*, *Triangulation*, dan *RSSI (Received Signal Strength Indicator)*.
5. Dalam memodelkan pergerakan roket, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk membuat model gerakan roket yang mendekati kenyataan (misalnya hukum aerodinamis, gaya rotasi, dan pengendalian pada roket diperhitungkan).
6. NED (North, East, Down) merupakan sistem koordinat yang khusus digunakan dalam wahana dirgantara, sehingga perlu dilakukan simulasi pendeteksian posisi roket dengan menggunakan sistem koordinat NED (North, East, Down).

**Daftar Pustaka**

- [1] Away, Gunaidi Abdia, *The Shortcut of Matlab Programming*, Informatika, Bandung, 2006.
- [2] Benson, Tom, "This IS Rocket Science", Glenn Research Center, NASA.
- [3] Grimbale, M.J., *Robust Industrial Control: Optimal Design Approach for Polynomial Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- [4] Haykin, Simon., *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, Upper Saddle River NJ, 1996.
- [5] Jimenez, A.R., and F. Seco, "Ultrasonic Localization Methods for Accurate Positioning", Instituto de Automatica Industrial, Madrid, 2005.
- [6] Kaplan, Elliott.D., *Understanding GPS: principles and applications*, Artech House, Norwood, 1996.
- [7] Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, "Sistem Navigasi Roket – Satelit Berbasis RADAR Sekunder", Bogor, 2009.
- [8] Sayed, A. H., A. Tarighat, N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 24-40, 2005.
- [9] Shen, Guowei, Rudolf Zetik, and Reiner S. Thoma, "Performance Comparison of TOA and TDOA Based Location Estimation Algorithms in LOS Environment", *IEEE 978-1-4244-1799-5/08/\$25.00*, 2008.
- [10] Siouris, G.M., *Missile Guidance and Control Systems*, Springer, New York, 2004.
- [11] Skolnik, Merrill., *Radar Handbook Second Edition*, McGraw-Hill, United States, 1990.
- [12] SO, Hing Cheung and Shun Ping HUI, "Constrained Location Algorithm Using TDOA Measurements", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol E86-A, No. 12 Desember 2003.
- [13] Thomas, Federico, Lluís Ros, "Revisiting Trilateration for Robot Localization", *IEEE Transactions on Robotics*, Vol 21, No. 1, February 2005.
- [14] Widada, W., dan Kliwati, S., "Algoritma TDOA-Trilateration untuk Radar Sekunder sebagai Sistem Tracking 3-Dimensi Trayektori Roket", Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, 2008.
- [15] Wolff, Christian, Radar Tutorial, <http://www.radartutorial.eu/index.en.html>, Juni 2011.
- [16] ---, *Axes Conventions*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Axes\\_conventions](http://en.wikipedia.org/wiki/Axes_conventions), Agustus 2011.
- [17] ---, *Cartesian Coordinate System*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Cartesian\\_coordinate\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Cartesian_coordinate_system), Agustus 2011.
- [18] ---, *Datasheet Microcontroller ATMEGA 1280*, ATMEL.