

METODE *TRACKING* KECEPATAN ROKET MENGGUNAKAN TRANSPONDER *DOPPLER* DUA-FREKUENSI (ROCKET SPEED TRACKING METHOD USING TWO-FREQUENCY DOPPLER TRANSPONDER)

Wahyu Widada

Peneliti Bidang Telemetry dan Muatan Roket, Lapan
e-mail: w_widada@yahoo.com

ABSTRACT

Radio Doppler tracking system for rocket usually only use one carrier frequency. This paper discusses a method of radio Doppler for tracking rocket using two-frequency radio waves. The system uses Doppler frequency transponder on 465 MHz and 2400 MHz simultaneously. Low frequency radio used to measure high-speed rocket and conversely higher frequency radio waves are used to measure the low-speed rocket. Results obtained using this method are 5.4 times more accurate at speeds less than Mach 0.7 compared with the results of the Doppler system that uses only one radio frequency. This method is suitable for measuring rocket speed up to Mach 3.8.

Keywords: *Doppler tracking, Rockets, Two-frequency, High-resolution, Transponder*

ABSTRAK

Sistem *Doppler tracking* untuk roket biasanya hanya menggunakan satu frekuensi pembawa. Tulisan ini membahas sebuah metode *Doppler* radio pelacak roket dengan menggunakan dua frekuensi gelombang radio. Sistem ini menggunakan transponder *Doppler* pada frekuensi 465 MHz dan 2400 MHz secara simultan. Radio frekuensi rendah digunakan untuk mengukur kecepatan-tinggi roket dan sebaliknya gelombang radio frekuensi lebih tinggi digunakan untuk mengukur kecepatan rendah roket. Hasil yang diperoleh dari metode ini lebih akurat 5.4 kali pada kecepatan kurang dari 0.7 Mach dibandingkan dengan hasil dari sistem *Doppler* yang menggunakan hanya satu frekuensi radio. Metode ini cocok untuk mengukur kecepatan roket hingga 3.8 Mach.

Kata kunci: *Doppler tracking, Roket, Dua-frekuensi, Resolusi tinggi, Transponder*

1 PENDAHULUAN

LAPAN sedang mengembangkan roket dengan diameter besar seperti tipe RX550. Roket tipe ini dirancang untuk jarak jauh hingga jangkauan ratusan kilometer. Untuk mengetahui performa roket tersebut, maka sangat diperlukan sistem instrumentasi pengukur jarak jangkauan dan kecepatan roket. Pengukuran

jarak jangkauan dapat menggunakan sistem *Radio Detecting and Ranging* (RADAR) tipe transponder, yaitu penggunaan muatan transponder pada roket untuk menerima sinyal *beacon* dan memancarkannya kembali (Wahyu Widada, 2012). Sistem tersebut telah dikembangkan sejak tahun 2009, dan saat ini sudah dipergunakan pada setiap uji peluncuran

roket, serta terus dikembangkan agar semakin modern dan akurat. Sedangkan untuk mengukur kecepatan roket, di Lapan juga telah mulai dikembangkan sistem *Doppler* radio sejak tahun 2013 (Wahyu Widada, 2012; Wahyu Widada, 2013). Sistem ini secara langsung dapat mengukur kecepatan roket berdasarkan perubahan frekuensi radio yang diterima di stasiun pengamatan, dan perubahan ini dapat dikonversikan menjadi kecepatan roket (Bjelland, B., 1963; Martin-Loef, J., 1967; Seddon, J. C., 1963). Prototipe sistem ini telah dibuat dan sudah diujicoba di laboratorium, akan tetapi belum diuji dalam peluncuran roket, dan telah direncanakan pada peluncuran roket akhir tahun 2013. Seperti sistem instrumentasi yang lain, maka ada faktor sensitivitas terhadap kecepatan roket, dalam hal ini adalah perbedaan frekuensi radio pemancar. Semakin tinggi frekuensi radio pemancar, maka akan semakin sensitif terhadap perubahan kecepatan roket (semakin mudah berubah). Jika terlalu tinggi frekuensinya, maka akan lebih sensitif, tetapi batas pengukuran menjadi terbatas, atau hanya pada kecepatan tertentu yang lebih rendah. Sebaliknya semakin rendah frekuensi pemancar, akan semakin lebar batas kecepatan roket yang dapat diukur, tetapi semakin kurang sensitif terhadap kecepatan roket. Oleh karena itu perlu dipikirkan metode agar sistem ini selalu sensitif dan jangkauan pengukuran kecepatan tetap lebar.

Tulisan ini membahas metode dua frekuensi pada sistem *Doppler* untuk mengukur kecepatan roket agar menjadi tetap sensitif dan akurat pada kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi. Integrasi dua buah frekuensi, frekuensi 465 MHz untuk mengukur kecepatan lebih tinggi dan frekuensi 2400 MHz untuk mengukur kecepatan yang lebih rendah, dilakukan. Kedua frekuensi dipancarkan secara bersamaan dan kemudian diterima di stasiun pengamat secara kontinyu.

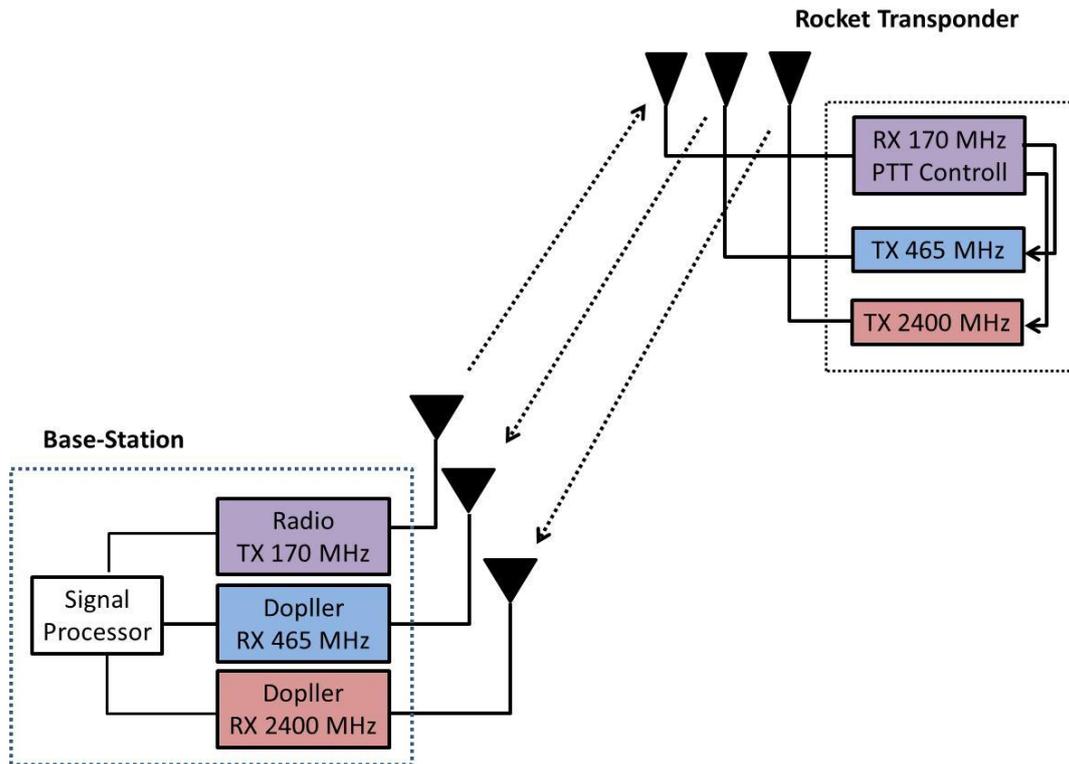
2 MULTI FREKUENSI DOPPLER RADIO

Secara umum metode radio *Doppler* multi frekuensi seperti terlihat pada Gambar 2-1 di bawah. Pada muatan roket terdiri dari dua buah radio transponder dengan frekuensi penerima yang sama dan frekuensi pemancar yang berbeda. Frekuensi penerima (170 MHz) ini digunakan sebagai *trigger* radio transponder agar hanya pada saat menerima sinyal saja radio akan memancarkan sinyal secara kontinyu (Jackson, J. E., 1965). Hal ini digunakan agar pasokan daya tetap bertahan lama dan radio juga tidak menjadi panas dan tidak stabil jika terus-menerus memancar. Berdasarkan prinsip *Doppler*, maka kecepatan roket dapat dihitung dari perubahan frekuensi antara pemancar dan frekuensi yang diterima di stasiun pengamat dengan persamaan berikut ini

$$V = \frac{\Delta f \times C}{f} \quad (2-1)$$

Disini C adalah kecepatan rambat gelombang radio di udara sebesar 3×10^8 m/detik², sedangkan Δf adalah perbedaan antara frekuensi pemancar dan frekuensi yang diterima di stasiun pengamat. Dari persamaan di atas, maka parameter yang mempengaruhi perubahan frekuensi adalah kecepatan roket (m/detik) dan nilai frekuensi pemancar radio transponder (Hz). Semakin tinggi frekuensi f yang digunakan, maka perubahan frekuensi Δf terhadap kecepatan juga semakin tinggi dan sensitif.

Frekuensi radio yang dipancarkan adalah dua buah seperti terlihat pada Tabel 2-1, yaitu 465 MHz dan 2400 MHz dengan menggunakan antena yang sesuai frekuensi gelombang radio. Batas perubahan frekuensi yang dapat diukur oleh *mixer* yang digunakan dalam prototipe percobaan ini adalah 2500 Hz, maka dengan menggunakan persamaan (2-1) di atas, batas kecepatan roket yang dapat diukur oleh masing-masing transponder adalah seperti pada Tabel 2-1.



Gambar 2-1: Metode radio Doppler dua frekuensi untuk tracking kecepatan roket

Tabel 2-1: FREKUENSI DOPPLER DAN BATAS PENGUKURAN KECEPATAN

No	Frekuensi	Batas Kecepatan
A	$f_A = 2400 \text{ MHz}$	$V_A = 0 - 0.7 \text{ Mach}$
B	$f_B = 465 \text{ MHz}$	$V_B = 0 - 3.8 \text{ Mach}$

Masing-masing persamaan kecepatan untuk frekuensi radio yang berbeda adalah sebagai berikut.

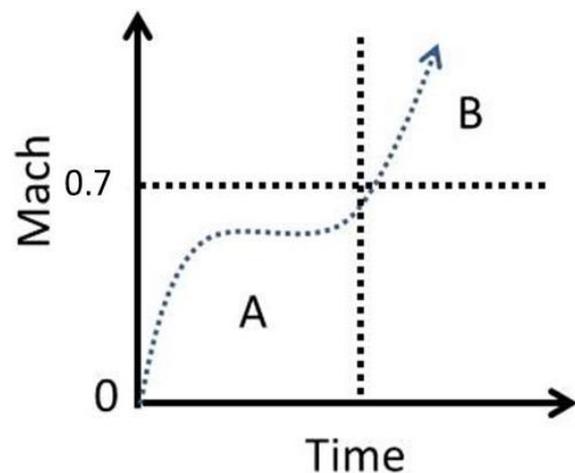
$$V_A = \frac{\Delta f_A \times C}{f_A} \quad (2-2)$$

dan

$$V_B = \frac{\Delta f_B \times C}{f_B} \quad (2-3)$$

Masing-masing frekuensi mempunyai batas pengukuran, frekuensi yang lebih tinggi f_A (2400 GHz) hingga 0.7 Mach, sedangkan frekuensi yang lebih rendah f_B (465 MHz) sekitar 3.8 Mach, hal ini menunjukkan radio dengan frekuensi tinggi lebih cocok dan lebih akurat untuk pengukuran kecepatan rendah. Penggunaan sensor berdasarkan kecepatan roket dapat diilustrasikan

seperti terlihat pada Gambar 2-2, algoritma tersebut menunjukkan bahwa saat kecepatan rendah menggunakan radio Doppler A dan saat kecepatan lebih tinggi dari 0.7 Mach menggunakan radio B.



Gambar 2-2: Ilustrasi pemilihan frekuensi Doppler pada pengukuran kecepatan roket

Jika kecepatan roket yang diujicoba kurang dari 0.7 Mach, maka cukup hanya menggunakan radio tipe A. Tetapi jika diperlukan pemantauan kecepatan yang lebih akurat, maka diperlukan penambahan radio *Doppler* dengan frekuensi yang lebih tinggi, misalnya 4.8 GHz dengan maksimum kecepatan roket hanya 0.38 Mach. Akan tetapi hasil pengukuran menjadi lebih akurat terhadap kecepatan rendah tersebut. Radio yang digunakan pada sistem ini frekuensinya dapat dirubah-ubah sesuai dengan *range* masing-masing, oleh hal tersebut untuk mencari frekuensi yang bersih tanpa gangguan.

3 PERCOBAAN DAN ANALISA

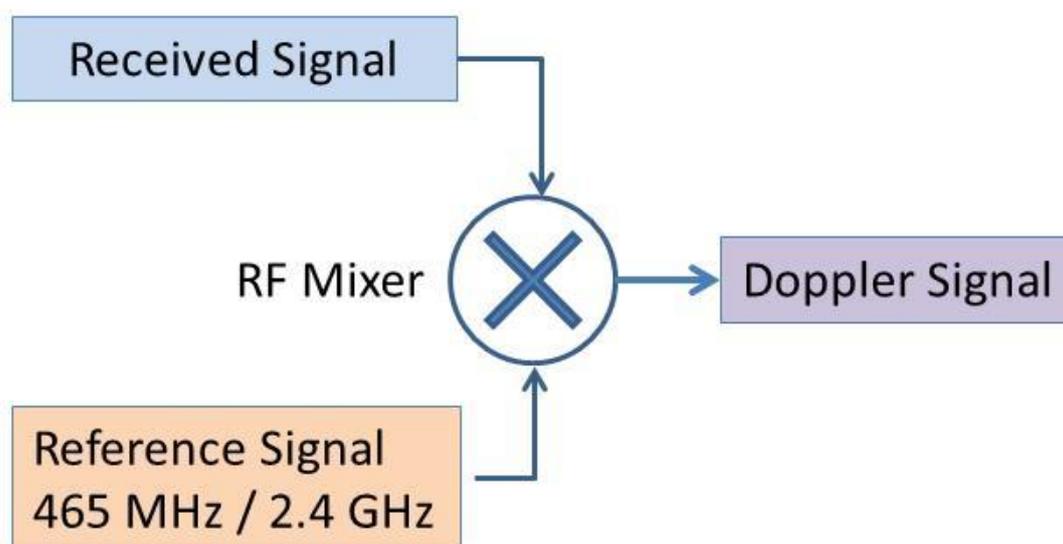
Percobaan prototipe ini dilakukan dengan menggunakan dua buah frekuensi, yaitu frekuensi 465 MHz dan 2.400 GHz, *transceiver* sistem ini telah tersedia prototipenya. Untuk transponder ini, supaya lebih mudah dan handal, maka menggunakan dua buah radio *transmitter* dengan daya baterai yang berbeda, sehingga jika kegagalan terjadi hanya sebagian yang tidak berfungsi. Untuk frekuensi 2.400 GHz, berdasarkan persamaan di atas maka perubahan

satu Hz senilai dengan kecepatan sekitar 0.119 m/detik, sedangkan frekuensi 465 MHz adalah 0.646 m/detik. Semakin tinggi frekuensi yang digunakan, maka secara umum hasilnya akan menjadi lebih akurat sesuai dengan perbandingan frekuensi pemancar radio. Percobaan dilakukan untuk mengetahui kestabilan secara menyeluruh pada sistem *Doppler* (*transponder, receiver, frequency counter*). Berdasarkan percobaan dengan prototipe yang sudah ada, ketidakstabilan frekuensi *Doppler* tercatat maksimum 10 Hz.

Sehingga parameter ini digunakan sebagai *random noise* pada simulasi perubahan frekuensi *Doppler* Δf_T dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta f_T = \Delta f_{A,B} + \text{rand}(10) \quad (3-1)$$

Gambar 3-1 berikut adalah bagan *Doppler receiver* yang digunakan untuk uji kestabilan pengukuran frekuensi berbasis *mixer*. Frekuensi referensi adalah 465 MHz dan 2.400 MHz, sehingga jika frekuensi sinyal radio yang diterima berbeda, keluaran dari *mixer* adalah sinyal sinus dengan frekuensi selisihnya. Sedangkan prototipe yang digunakan dalam percobaan ini adalah seperti terlihat pada Gambar 3-2.



Gambar 3-1: Bagan *Doppler receiver* untuk uji kestabilan frekuensi



Gambar 3-2: Prototipe *Doppler transceiver* untuk uji kestabilan pengukuran frekuensi

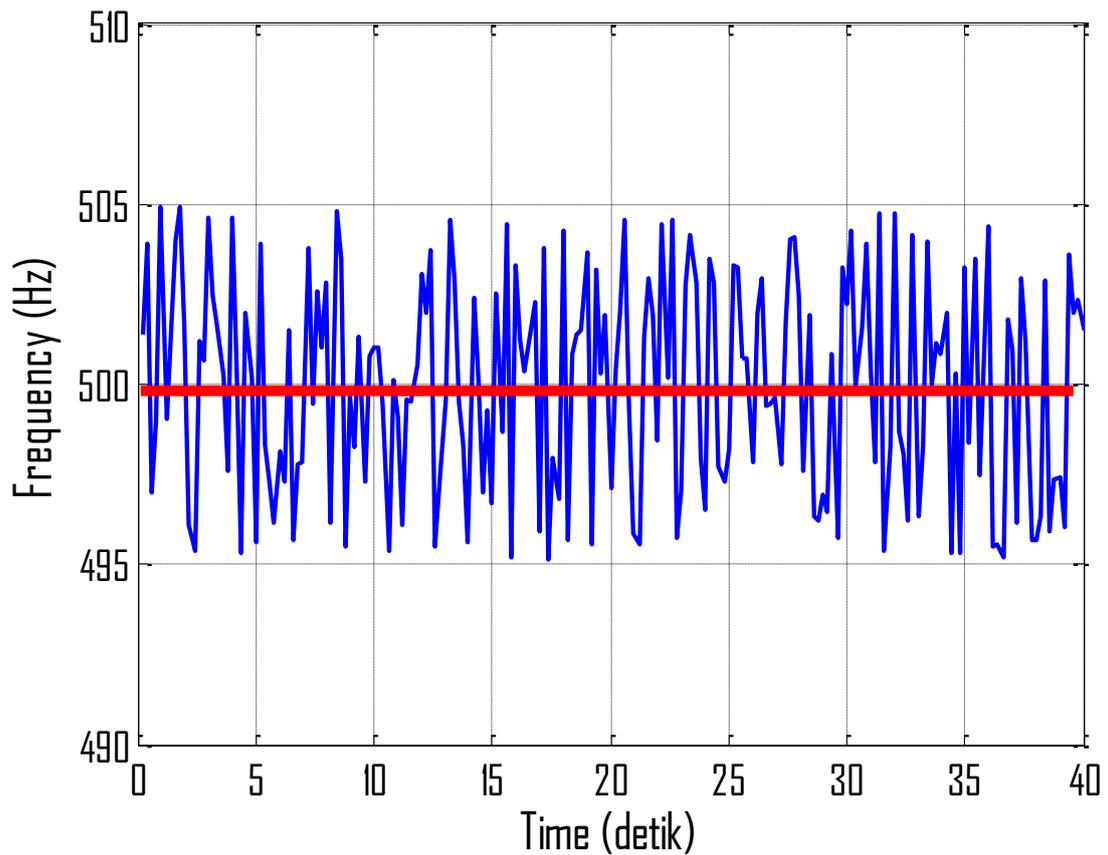
Hasil uji kestabilan frekuensi ditunjukkan pada Gambar 3-3. Frekuensi referensi dipilih pada 500 Hz, supaya mudah didengar dan masih ada *range* 2000 Hz untuk perubahan frekuensi *Doppler*.

Kestabilan sistem secara keseluruhan saat diam terlihat sekitar kira-kira 10 Hz pada kondisi jarak dekat dan dengan sampling *Analog to Digital Converter* (ADC) 8 bit, dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) resolusi 1 Hz. Peningkatan kestabilan ini dapat dilakukan dengan menggunakan komponen yang lebih stabil atau radio dengan spesifikasi kestabilan yang lebih baik. Pada percobaan ini disimulasikan kecepatan roket bergerak dari nol hingga 10 meter/detik dan kembali ke nol lagi, pada frekuensi 2.4 GHz (warna hijau) terlihat perubahan frekuensi berubah hingga hampir 100 Hz dan terlihat jelas (Gambar 3-4). Akan tetapi pada frekuensi rendah, perubahan frekuensi hanya sampai dengan sekitar 15 Hz, dan terlihat tidak banyak berubah, *Signal to Noise Ratio* (SNR) juga lebih kecil dan nyaris sama dengan *noise*. Kemudian percobaan dilakukan dengan gerak hingga mendekati 3 Mach atau sekitar 1000 meter/detik (Gambar 3-5).

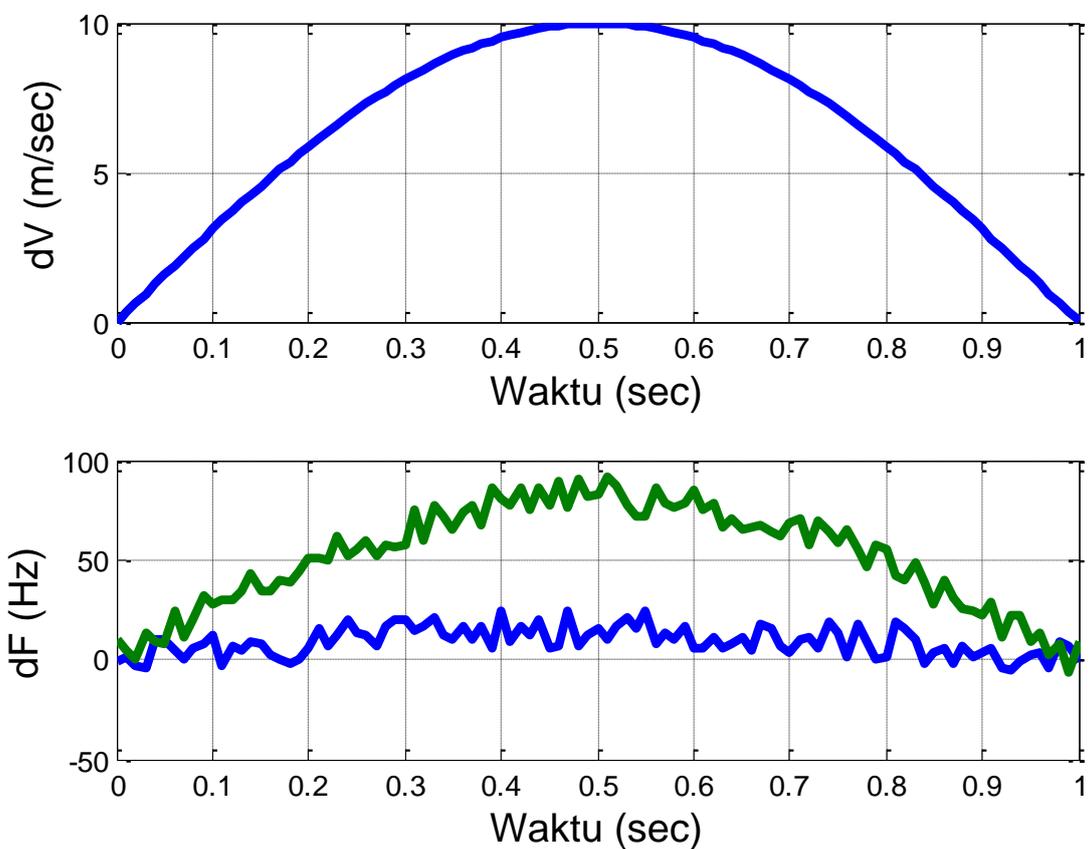
Pada saat itu terlihat perubahan frekuensi sinyal 2.4 GHz melebihi 2000 Hz, sehingga melebihi kemampuan *bandwidth Doppler receiver* yang digunakan, akan tetapi pada frekuensi 465 MHz (warna biru), perubahan frekuensi hanya sampai

dengan kira-kira 1500 Hz. Dari hasil ini dapat dikatakan kecepatan roket masih dapat dideteksi dengan perubahan *Doppler* pada radio 465 MHz. Gerak roket pada saat motor masih menyala akan mempunyai kecepatan yang sangat tinggi, sedangkan pada saat jatuh bebas akan terlihat lebih lambat, apalagi jika diukur dengan posisi *receiver* yang tidak secara langsung linier pada pergerakan roket. Pada kondisi tersebut pengukuran *Doppler* sangat memerlukan *multi-frekuensi* (dua atau lebih), sehingga saat pengukuran akan selalu sensitif pada kecepatan roket secara keseluruhan, baik saat tinggi maupun rendah.

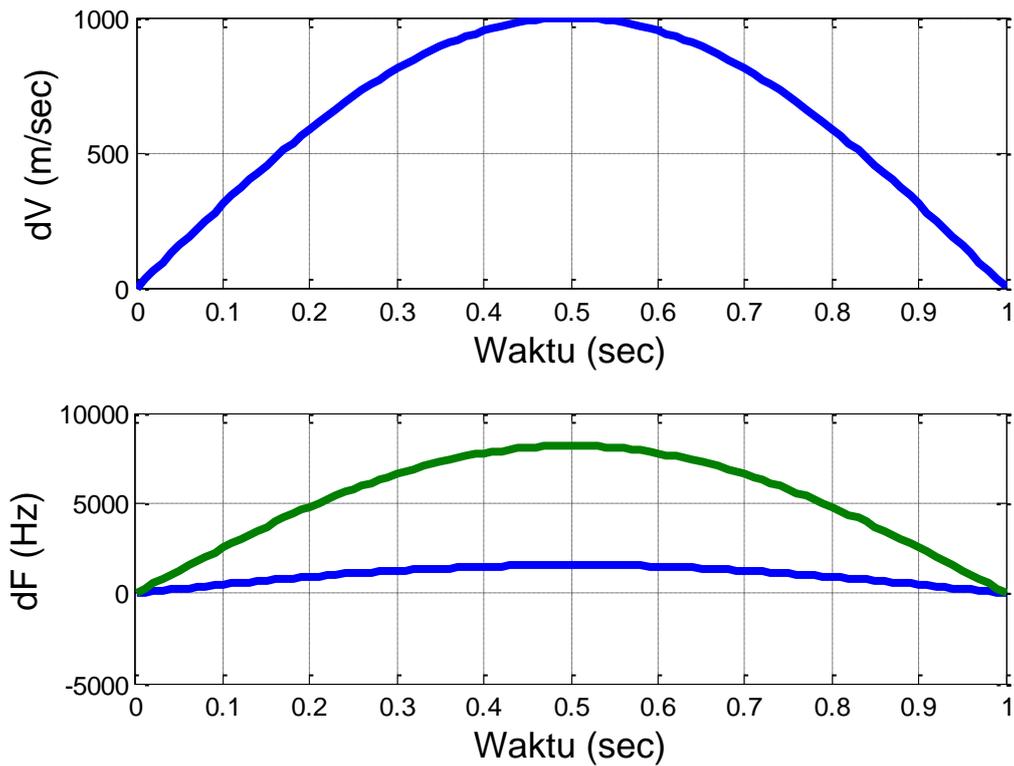
Simulasi ini sangat penting untuk menentukan frekuensi sinyal radio *Doppler* yang akan digunakan pada setiap tipe roket yang mempunyai kecepatan maksimum yang berbeda-beda. Berdasarkan hasil analisis di atas maka algoritma yang digunakan untuk sistem dua frekuensi *Doppler* adalah seperti pada Gambar 3-6, algoritma komputer ini akan memilih secara otomatis frekuensi *Doppler* yang sesuai dengan kecepatan roket yang sedang dimonitor. Saat perubahan Δf_A kurang dari 2000 Hz, maka menggunakan frekuensi 2.40 GHz, jika lebih maka menggunakan frekuensi 465 MHz. Jika ditambah satu frekuensi lagi (misal VHF 150 MHz), maka jangkauan kecepatan roket yang dapat diukur semakin tinggi (11.7 Mach).



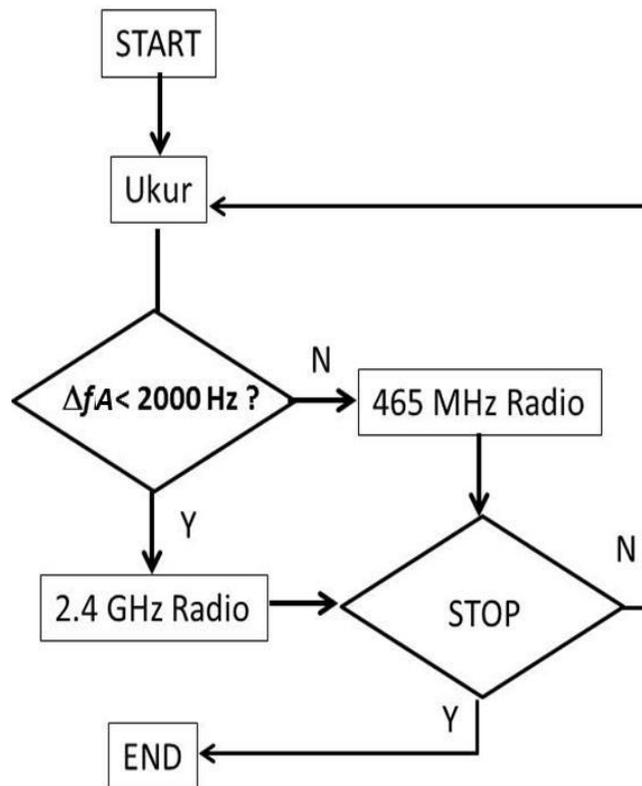
Gambar 3-3: Kestabilan frekuensi Doppler pada base-frequency 500 Hz sekitar 10 Hz



Gambar 3-4: Simulasi pada kecepatan 0 hingga 10 meter/detik



Gambar 3-5: Simulasi pada kecepatan 0 hingga 1000 meter/detik



Gambar 3-6: Algoritma sistem dua-frekuensi Doppler untuk tracking roket

4 KESIMPULAN

Telah dikembangkan metode Doppler radio dengan dua frekuensi untuk mengukur kecepatan roket secara

real-time. Dua buah frekuensi radio yang dipilih yaitu 465 MHz dan 2400 MHz digunakan sebagai parameter simulasi dan komponen prototipe radio ini disebabkan

kan mudah didapat secara komersial dan cocok dengan batas kecepatan roket yang akan diukur. Aplikasi radio *Doppler* dua frekuensi ini sangat berguna untuk meningkatkan deteksi kecepatan roket baik pada saat kecepatan tinggi dan kecepatan rendah, serta pada arah gerak roket yang tidak bergerak menjauh secara *linier*. Frekuensi transmitter 2.4 GHz digunakan untuk mengukur kecepatan di bawah 240 m/detik dengan resolusi 0.119 m/sec/Hz dan kecepatan di atasnya menggunakan frekuensi 465 MHz dengan resolusi 0.646 m/sec/Hz. Metode ini akan diimplementasikan pada uji peluncuran roket RX550 mendatang. *Noise* dari sistem ini dapat direduksi dengan menggunakan komponen radio yang lebih stabil dan juga dengan algoritma *digital filtering* yang akan dibahas pada tulisan tersendiri.

DAFTAR RUJUKAN

- Bjelland, B., 1963. *A Doppler Tracking System for Small Rocket Trajectories*, Norwegian Defence Research Establishment Kjeller.
- Jackson, J. E., 1965. *Determination of Rocket Trajectories from Minimal CW Tracking Data*, NASA-TM-X-66239, X-615-65-281.
- Martin-Loef, J., 1967. *Method for Rocket Trajectory Determination from Multistation Doppler Tracking Data*, Apr. 1967 30 P Refs Sponsored by NASA And Swed. Space Res. Com.
- Seddon, J. C., 1963. *Preliminary Report on The Single Station Doppler-Interferometer Rocket Tracking Technique*, NASA-TN-D-1344.
- Wahyu Widada, 2012. *Metode Doppler Radio Untuk Mengukur Kecepatan Roket RX200*, Jurnal Teknologi Dirgantara Desember.
- Wahyu Widada, 2013. *Integrasi Radar dan Doppler Transponder Untuk Tracking Roket*, paten Indonesia dalam pengajuan.