

# **METODE DOPPLER RADIO UNTUK MENGUKUR KECEPATAN ROKET RX200 [RADIO DOPPLER METHOD FOR MEASURING VELOCITY OF ROCKET RX200]**

**Wahyu Widada**

Peneliti Bidang Telemetri dan Muatan Roket, LAPAN  
e-mail: w\_widada@yahoo.com

## **ABSTRACT**

This paper discusses the methods and design of radio Doppler to measure the speed of the rocket type RX200. Doppler system consists of a radio transponder to emit a continuous radio signal from the rocket and the radio base station to measure the change in frequency of the radio signal. A change in the frequency of the radio signal caused by the speed of the rocket is used to measure the speed and position of the rocket. The design of radio frequency is 880 MHz transponder adapted to the design speed of the rocket RX200. This method is relatively easy to implement compared with the radar transponder system that has been developed. A simulation of Doppler frequency is performed using the radar data transponder rocket launch experiment RX200 and recommendation of bandwidth radio receiver should be 4000 Hz. The combination of these two systems will make a more accurate and reliable tracking system.

Key words: *Doppler tracking, Radio transponder, Frequency variation*

## **ABSTRAK**

Tulisan ini membahas metode dan desain Doppler radio untuk mengukur kecepatan roket tipe RX200. Sistem Doppler ini terdiri dari radio transponder untuk memancarkan signal radio secara kontinyu dari roket dan radio *base-station* untuk mengukur perubahan frekuensi sinyal radio. Perubahan frekuensi sinyal radio yang disebabkan oleh adanya kecepatan roket ini digunakan untuk mengukur kecepatan dan posisi roket. Desain frekuensi radio transponder ini adalah 880 MHz disesuaikan dengan desain kecepatan maksimum roket RX200. Metode ini relatif lebih mudah diimplementasikan untuk mengukur posisi dibandingkan dengan sistem radar transponder yang telah dikembangkan. Simulasi perubahan frekuensi Doppler dilakukan dengan data radar transponder eksperimen peluncuran roket RX200 dan rekomendasi lebar-pita *receiver* sebaiknya 4000 Hz. Kombinasi kedua sistem ini akan membuat sistem tracking menjadi lebih handal dan akurat.

Kata kunci: *Doppler tracking, Radio transponder, Perubahan frekuensi*

## **1 PENDAHULUAN**

Posisi dan kecepatan roket sangat penting diukur pada saat uji peluncuran. Data tersebut digunakan untuk menganalisa unjuk kerja motor roket.

Karena kecepatan yang melebihi suara, maka dalam pengukuran harus menggunakan media gelombang radio yang lebih cepat ribuan kali. Radar transponder telah dikembangkan untuk mengukur

jarak dan posisi peluncuran roket. Sistem ini telah berhasil dikembangkan hingga kemampuan tracking 3 Dimensi (Haris Setyawan, 2010). Metode ini lebih kompleks untuk dapat mengukur posisi dan kecepatan roket, disebabkan oleh pengukuran yang terpusat pada *base-station* dan saling terkait dengan signal dari repeater radar. GPS telemetri juga dapat digunakan untuk pelacak posisi roket, cara ini relatif mudah tetapi mempunyai kelemahan, yaitu hanya dapat mengukur hingga ketinggian 18 km dan sampling data yang lambat (Markgraf, M.; Montenbruck, O.; Hassenpflug, F.; Turner, P.; Bull, B.; Bauer, Frank, 2009). Metode lain yang dapat digunakan untuk mengukur trayektori roket adalah dengan menggunakan efek Doppler pada gelombang radio (Bull, Barton; Bjelland, B., 1963; Martin-Loef, 1967; Dean, E. A., 1960; Seddon, J. C., 1963; Jackson, J. E., 1963; Spafford, M., 1965; Hudgins, J. I., 1969; Effendi D.A, 2008).) Sebuah radio *transmitter* yang ditempatkan roket dan memancarkan terus-menerus, maka jika ada perubahan kecepatan baik mendekat atau menjauh dari stasiun penerima, maka terjadi perubahan frekuensi dibandingkan dari frekuensi awal. Jika menjauh maka frekuensi yang diterima semakin turun dan sebaliknya akan semakin bertambah jika bergerak mendekat. Dengan menggunakan metode tersebut maka kecepatan roket dapat dihitung, dan jika 3 buah titik, maka koordinat 3 Dimensi trayektori roket juga dapat diukur dengan prinsip titik potong tiga buah bola.

Tulisan ini membahas secara detail metode Doppler radio untuk *tracking* roket LAPAN RX200 secara 3 dimensi. Tiga buah titik lokasi yang berbeda untuk mengukur perubahan frekuensi dan dirubah ke perubahan kecepatan dengan prinsip Doppler dan

dirubah ke posisi atau jarak dengan cara proses integral. Ketiga titik tersebut secara independen dapat diukur, sehingga tidak memerlukan sinkronisasi instrumen, hanya diperlukan sinkronisasi sampling waktu yang fungsinya sangat penting agar lebih akurat. Sinkronisasi tersebut dapat dilakukan melalui gelombang radio atau disebut Doppler repeater.

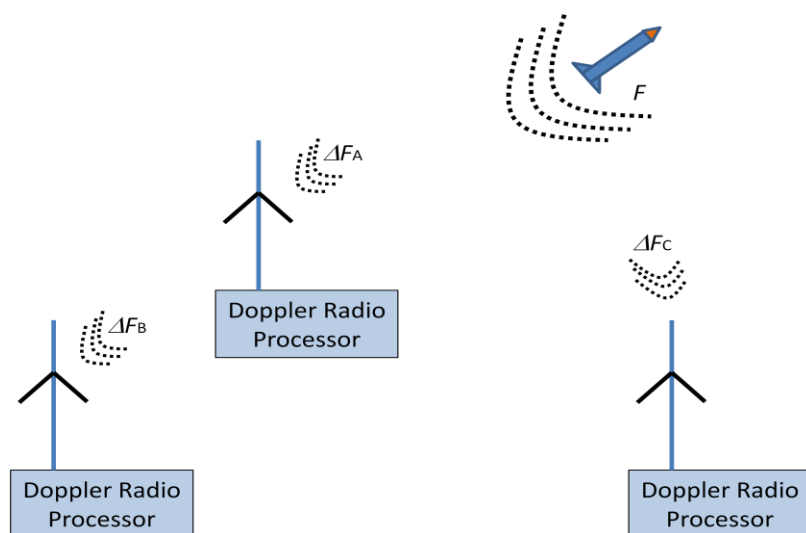
## 2 Metode Doppler Tracking

Metode Doppler radio adalah mengukur perubahan frekuensi sinyal pembawa radio yang disebabkan oleh kecepatan roket pada saat menjauh dari titik peluncuran. Frekuensi sinyal radio yang diterima pada stasiun pengamat  $f_A$  akan sedikit menurun dibandingkan dengan frekuensi sinyal radio yang dipancarkan di roket  $f$ . Persamaan yang digunakan untuk mengukur adalah sebagai berikut.

$$f_A = f - \frac{fV}{C} \quad (2-1)$$

Disini  $C$  adalah kecepatan rambat sinyal radio  $C = 3 \times 10^8$  m/s<sup>2</sup> dan  $V$  adalah kecepatan roket (meter/detik). Dari persamaan di atas, jika roket dalam keadaan diam, atau tidak mempunyai kecepatan, maka frekuensi radio pada roket dan frekuensi radio pada titik stasiun pemantau akan menjadi sama. Posisi diam antara roket dengan stasiun pengamat tidak mempengaruhi perubahan frekuensi. Oleh karena itu, perhitungan posisi roket dihitung dari akumulasi kecepatan yang diukur. Dari persamaan (2-1) di atas, maka kecepatan roket dapat ditulis kembali dengan persamaan berikut ini

$$V = \frac{(f - f_A)C}{f} \quad (2-2)$$



Gambar 2-1: Tracking 3 dimensi menggunakan Doppler radio

Dari persamaan (2-1) dan (2-2), maka parameter yang mempengaruhi perubahan frekuensi adalah kecepatan roket (m/detik) dan nilai frekuensi pemancar radio transponder (Hz). Semakin tinggi frekuensi yang digunakan, maka perubahan frekuensi terhadap kecepatan juga semakin tinggi dan sensitif. Oleh karena itu, prinsip ini digunakan untuk menentukan frekuensi sinyal radio yang akan digunakan yang cocok untuk kecepatan roket RX200 yang akan diukur. Jika radio penerima diletakkan pada tiga titik seperti pada gambar diatas, maka masing-masing jarak dari *receiver* ke roket dapat dihitung sebagai berikut. Pada titik pengamatan A (*slant range from ground station A to transmitter*) dihitung dengan jarak sebagai berikut,

$$r_A = r_{A0} + \int_{t_0}^t \lambda (f - f_A) dt \quad (2-3)$$

Untuk titik B dengan jarak dari titik awal roket meluncur  $r_{b0}$  maka persamaannya adalah;

$$r_B = r_{B0} + \int_{t_0}^t \lambda (f - f_B) dt \quad (2-4)$$

Dan untuk jarak pada titik pengamatan C dengan jarak dari titik awal roket meluncur  $r_{c0}$  menjadi sebagai berikut

$$r_C = r_{C0} + \int_{t_0}^t \lambda (f - f_C) dt \quad (2-5)$$

Disini  $\lambda$  adalah panjang gelombang radio pemancar *payload* roket. Dari ketiga titik dengan jarak ke roket sebagai jari-jari bola, maka koordinat roket dalam tiga dimensi ( $x, y, z$ ) dapat dihitung.

Persamaan koordinat bola pada titik A adalah

$$r_A^2 = (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 + (z - z_A)^2 \quad (2-6)$$

Sedangkang pada titik B adalah

$$r_B^2 = (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 + (z - z_B)^2 \quad (2-7)$$

Dan pada titik C adalah sebagai berikut.

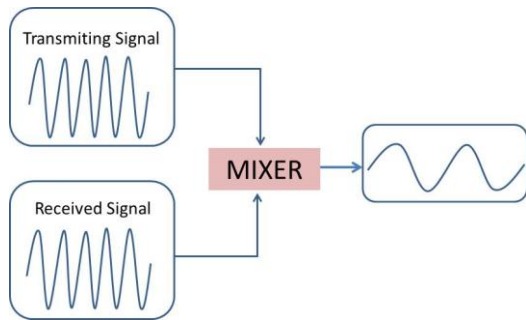
$$r_C^2 = (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 + (z - z_C)^2 \quad (2-8)$$

Disini  $(x_A, y_A, z_A)$  adalah lokasi titik A dilihat dari titik awal roket meluncur. Dari persamaan (2-6) hingga (2-8), jika asumsi jarak antara ketiga titik A, B, C telah diketahui sebagai referensi posisi, maka dapat kita hitung koordinat ( $x, y, z$ ). Posisi titik A, B, dan C dapat diatur menjadi segitiga dengan luas area yang optimal agar pengukuran menjadi lebih akurat.

### 3 DESAIN RADIO DOPPLER TRACKING UNTUK RX200

Roket tipe RX200 didesain dengan kecepatan lebih dari 2 Mach atau 680 m/detik. Radio *receiver* yang digunakan mempunyai *bandwidth mixer* 4.0 kHz, sehingga berdasarkan persamaan (2-2) di atas, frekuensi yang optimal digunakan dalam sistem Doppler ini adalah 880 MHz. Seperti terlihat pada Gambar 3-1, perubahan frekuensi efek Doppler dapat dihitung dengan menggunakan *mixer* pada rangkaian elektronik radio *receiver* pada *base-station*. Perbedaan antara

frekuensi sinyal yang diterima dari roket dan sinyal referensi pada stasiun penerima akan menjadi keluaran dari *mixer*. Nilai frekuensi maksimum sinyal dari *mixer* dapat diprediksi dari persamaan (2-1) dengan kecepatan roket yang juga sudah diprediksi dari simulasi berbasis data uji statik motor roket. Frekuensi sinyal ini didesain kurang dari 5 kHz, sehingga *sound-card* PC dapat digunakan untuk memproses sinyal, akan tetapi aplikasi *Analog to Digital Converter* (ADC) *high speed* dapat meningkatkan akurasi dan kecepatan sampling data.



Gambar 3-1: Ekstraksi perubahan frekuensi signal efek Doppler

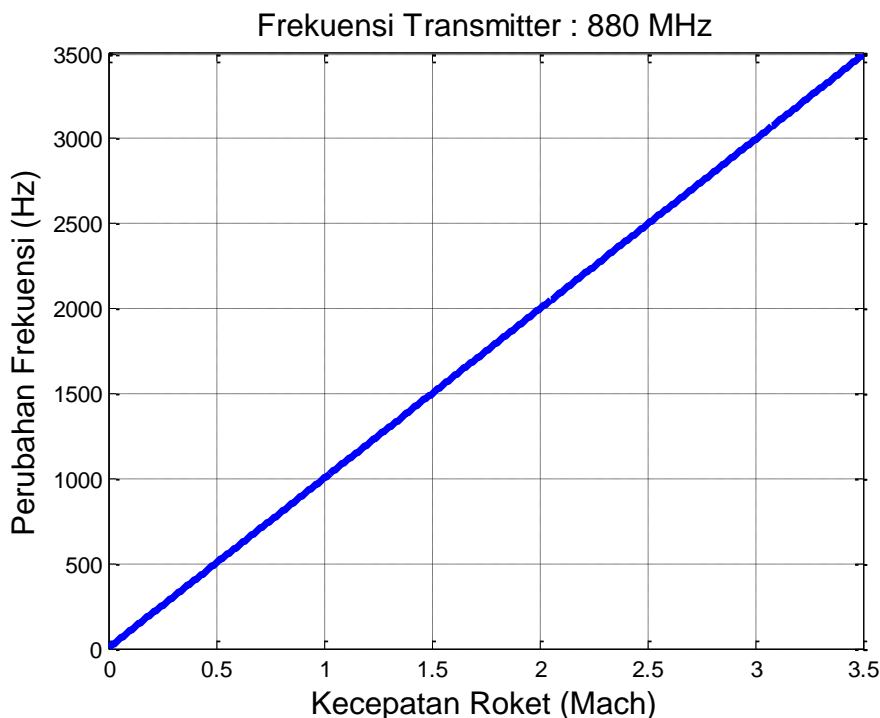
Dari persamaan (2-1) tersebut jika kita gunakan frekuensi pemancar 880 MHz, maka grafik hubungan antara kecepatan dengan perubahan frekuensi adalah

sebagai berikut. Semakin tinggi frekuensi pemancar, maka akan semakin besar batas perubahan frekuensinya. Berdasarkan persamaan (2-1) di atas, maka perhitungan frekuensi tersebut dapat ditulis kembali dengan persamaan berikut ini.

$$\Delta f = \pm f_{rocket} \frac{V_{rocket}}{C} \tag{3-1}$$

Semakin lebar perubahan frekuensi terhadap kecepatan roket, maka akurasi semakin meningkat dan respon menjadi semakin sensitif. Oleh karena itu frekuensi semakin tinggi semakin lebih baik, tetapi harus memperhatikan kemampuan lebar-pita radio penerima, maksimum kecepatan, dan jarak jangkauan yang akan diukur.

Dengan menggunakan persamaan (3-1), maka kita dapat merancang parameter Doppler sesuai dengan kecepatan maksimum roket, frekuensi yang digunakan, dan lebar pita radio receiver. Gambar 3-2 berikut adalah respon perubahan frekuensi Doppler terhadap kecepatan roket pada frekuensi 880 MHz dengan maksimum kecepatan 3.5 Mach.



Gambar 3-2: Kecepatan roket vs perubahan frekuensi pada transmitter 880 MHz

Tabel 3-1 adalah hasil analisa dan desain parameter untuk sistem Doppler roket RX200.

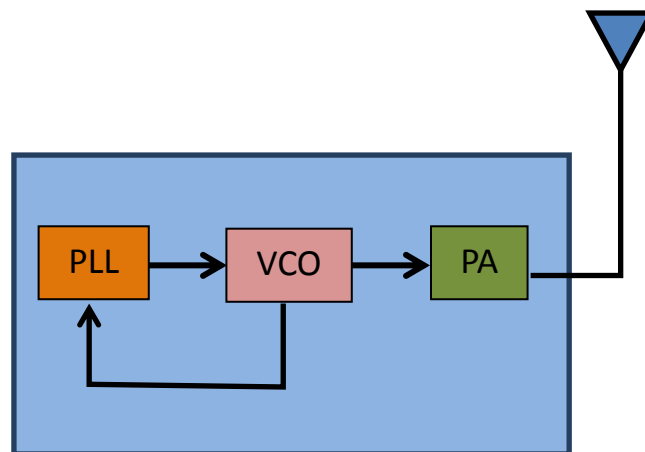
Radio transmitter pada roket dapat menggunakan radio komersial dengan frekuensi 880 MHz atau mendekati sama. Jika tidak diperoleh radio dengan frekuensi yang cocok, maka dapat membuat radio sendiri dengan merakit komponen osilator radio,

bandpass filter, dan *power amplifier* radio yang terlihat seperti pada Gambar 3-3.

Untuk memproses data Doppler ini, memerlukan perhitungan *Fast Fourier Transform* (FFT) satu algoritma untuk merubah signal berbasis waktu ke signal berbasis frekuensi.

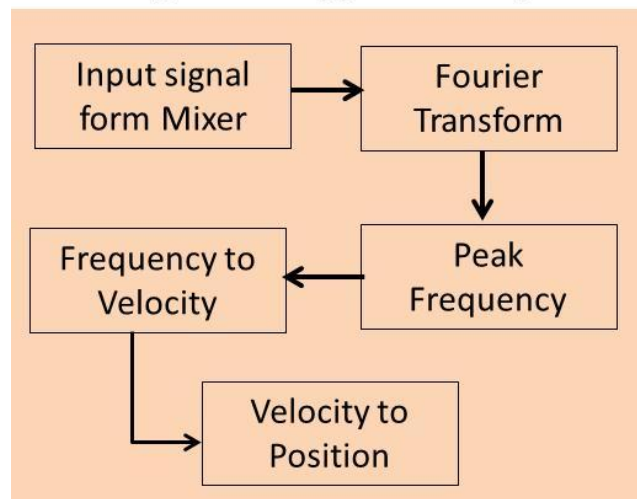
Tabel 3-1: PARAMETER SISTEM DOPPLER UNTUK RX200

No	Parameter	Nilai
1	Kecepatan pengukuran roket RX200	< 3.5 Mach
2	Frekuensi transponder	880 MHz
3	Maksimum perubahan frekuensi	4000 Hz
4	Bandwidth receiver	>4000 Hz
5	Bandpass filter	0 - 6000 Hz
6	Sampling rate ADC	1 MSPS
7	Resolusi ADC	10 bit



Gambar 3-3: Radio doppler pada muatan roket

### Algoritma Doppler Tracking



Gambar 3-4: Algoritma pemrosesan sinyal doppler tracking

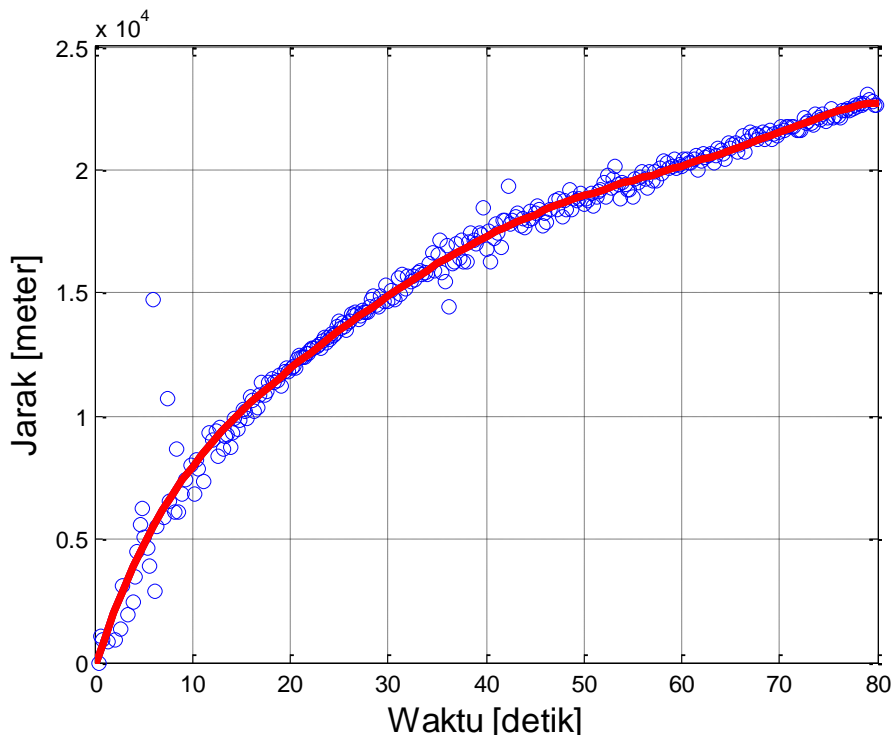
Lagoritma ini sangat memerlukan kecepatan dan memori yang cukup, untuk mempercepat dapat menggunakan *software* Matlab (<http://www.mathworks.com/help/toolbox/signal/ref/spectrogram.html>). *Software* ini dapat dikombinasikan dengan *Visual Basic* (VB) agar menjadi mudah dioperasionalkan dan waktu proses yang pendek. Algoritma yang diimplementasikan dari persamaan (2-1) dan (2-2) adalah seperti pada gambar 3-4. Hasil akhir dari algoritma ini adalah kecepatan roket. Dari kecepatan ini dapat dikalkulasi posisi dan dengan persamaan (2-3) hingga (3-1) kita juga dapat menghitung koordinat trayektori roket dalam 3 Dimensi. Dari landasan teori, desain parameter *hardware*, dan algoritma pemrosesan sinyal pada tulisan ini, maka prototipe uji sistem Doppler pengukur kecepatan roket ini dapat dibuat.

#### 4 SIMULASI FREKUENSI DOPPLER DATA PELUNCURAN RX-200

Simulasi frekuensi Doppler dilakukan dengan menggunakan data radar transponder percobaan peluncuran roket RX-200 bulan Oktober 2012. Data jarak dari radar transponder

adalah seperti pada Gambar 3-5, kurva titik-titik merupakan data jarak dari radar dan garis lurus merupakan kurva yang sudah diperhalus dengan menggunakan polinomial pangkat enam.

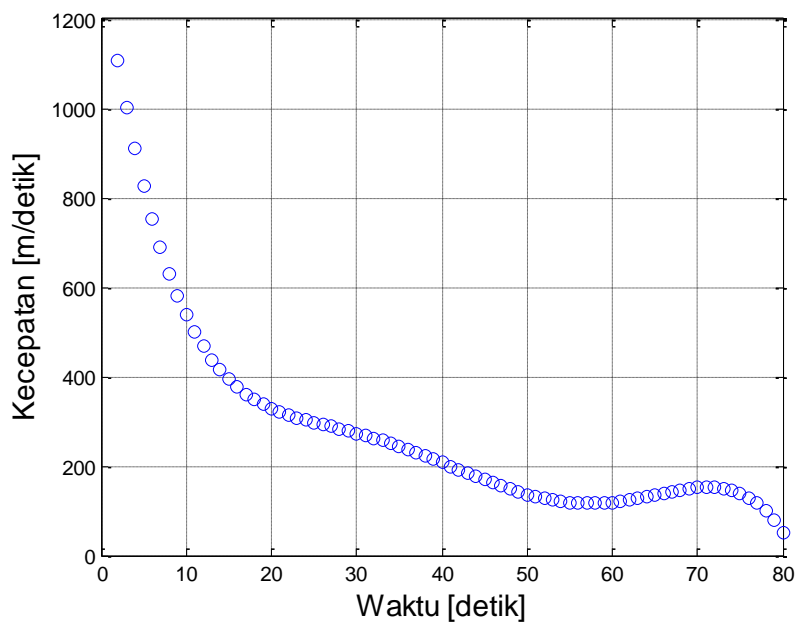
Dari data di atas, jika kita hitung diferensial, maka akan kita peroleh data kecepatan roket, seperti terlihat pada Gambar 3-6. Akan tetapi data kecepatan ini merupakan turunan dari data jarak (*line of sight radar*), sehingga besar kemungkinan ada penurunan akurasi nilai kecepatan roket. Hal ini tergantung akurasi sampling waktu dan jarak dari data radar transponder yang digunakan. Dari data kecepatan roket ini maka dapat kita simulasikan nilai perubahan frekuensi Doppler yang telah dirancang dengan parameter diatas (Tabel 3-1). Hasil perhitungan perubahan frekuensi Doppler dapat kita lihat seperti pada gambar 3-8 dibawah. Disini perubahan frekuensi dari nol hingga sekitar 3600 Hz. Oleh karena itu, lebar pita radio penerima harus lebih dari 3600 Hz, yaitu sebesar 4000 Hz agar dapat mencakup semua perubahan frekuensi Doppler yang disebabkan kecepatan roket.



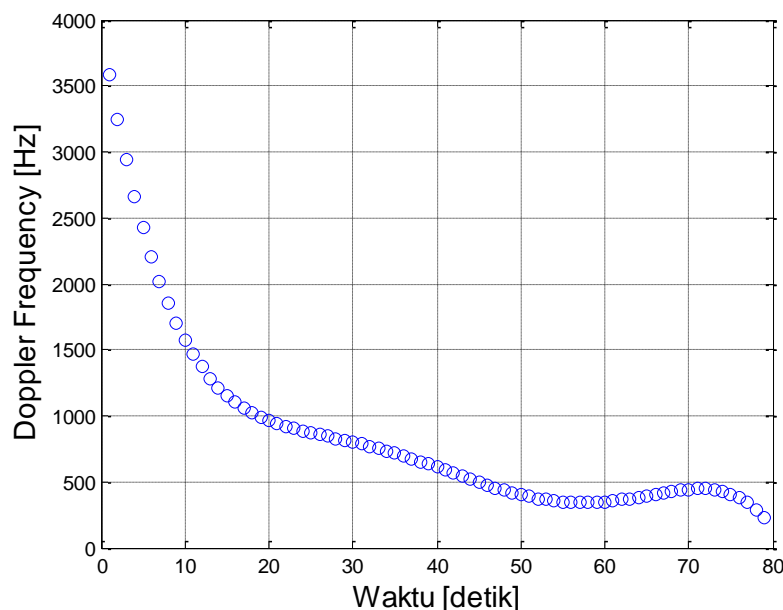
Gambar 3-5: Data peluncuran RX-200 Oktober 2012

Data kecepatan (Gambar 3-6) diplot dengan *sampling* satu Hz atau satu data tiap detik, hal ini supaya perhitungan kecepatan lebih mudah dengan waktu perubahan meter tiap detik. Kecepatan roket berdasarkan radar transponder ini melebihi 2 Mach, sehingga semakin lebar lebar-pita radio receiver akan semakin aman untuk berbagai pengukuran roket atau dengan cara menurunkan frekuensi radio transmitter ke sekitar 440 MHz atau separuhnya. Jika frekuensi Doppler dapat diukur secara langsung, maka

pengukuran kecepatan roket dapat dilakukan lebih akurat daripada dari hasil pengukuran dari radar transponder, hal ini disebabkan konversi nilai dari kecepatan roket langsung pada perubahan frekuensi. Kedua data dari radar dan Doppler tersebut dapat dijadikan perbandingan dalam analisa performa motor roket. Metode radar transponder dan Doppler ini berpotensi dapat dikombinasikan menjadi satu sistem dan akan dikembangkan pada penelitian yang akan datang.



Gambar 3-6: Kecepatan roket RX-200 dari perhitungan diferensial



Gambar 3-7: Perubahan frekuensi Doppler data roket RX-200

## 5 KESIMPULAN

Telah dijelaskan metode pengukur kecepatan roket dengan menggunakan prinsip radio Doppler. Dari data kecepatan roket ini dapat dikembangkan menjadi pelacak posisi dalam koordinat 3 dimensi dengan pengukuran tiga titik seperti pada radar transponder. Berdasarkan uraian dan hasil simulasi ini akan dikembangkan *prototipe* sistem Doppler untuk mengukur kecepatan roket RX200 dengan frekuensi *transmitter* 880 MHz dan lebar pita radio penerima minimal 4000 Hz. Untuk tipe roket LAPAN yang lain, seperti RX550 atau yang lebih kecil, maka perlu analisa agar frekuensi transponder dan lebar pita radio penerima yang digunakan sesuai dengan maksimum kecepatan yang akan diukur.

Percobaan dasar metode Doppler ini akan dilakukan di laboratorium Lapan dan akan dilaporkan lebih detail dalam tulisan ilmiah berikutnya. Kombinasi sistem Doppler dan radar transponder menjadi satu sistem ter-integrasi akan menghasilkan data yang saling mendukung akurasi pengukuran performa motor roket.

## DAFTAR RUJUKAN

- Bjelland, B., 1963. *A Doppler Tracking System for Small Rocket Trajectories*, Norwegian Defence Research Establishment Kjeller 1963.
- Bull, Barton et al., *Flight Performance Evaluation of Three GPS Receivers for Sounding Rocket Tracking*, Goddard Space Flight Center.
- Dean, E. A., 1960. *A Sound-Ranging System for the Rocket-Grenade Experiment at Wallops Island, Virginia*, Schellenger Research Lab., Texas Western College, El Paso, Texas, September 1960.
- Effendi D. A., 2008. *Mengukur Kecepatan Benda Bergerak dengan Metode Shift Doppler*, Prosiding SIPTEKGAN XII-2008 ISBN: 978-979-1458-19-1.
- Haris Setyawan, 2010. *Studi Algoritma TDOA Untuk Pengukur Jarak Roket Berbasis Radar Sekunder*, thesis S2 teknik elektro UGM 2010.
- <http://www.mathworks.com/help/toolbox/signal/ref/spectrogram.html>.
- Hudgins, J. I.; Lease, J. R., 1969. *The Tone Range/Telemetry Interferometer Tracking System for Support of Sounding Rocket Payloads*, NASA JAN 1, 1969.
- Jackson, J. E., 1965. *Determination of Rocket Trajectories from Minimal CW Tracking Data*, NASA-TM-X-66239, X-615-65-281 1965.
- Markgraf, M.; Montenbruck, O.; Hassenpflug, F.; Turner, P.; Bull, B.; Bauer, Frank, 2009. *A Low Cost GPS System for Real-Time Tracking of Sounding Rockets*, May 21, 2009.
- 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 1963.
- Spafford, M.; Wiack, R.; Woodman, R., 1965. *The Rocket Interferometer Tracking RIT System*, NASA-TN-D-2682 1965.