

# SIMULASI PENGUKURAN PERUBAHAN FREKUENSI DOPPLER ULTRASONIK PADA BENDA YANG BERGERAK

Margi Sasono<sup>1</sup>, Ishafit<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pusat Studi Fisika Terapan (Pusfit) dan Program Studi Fisika  
Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta

<sup>2</sup>Pusat Studi Fisika Terapan (Pusfit) dan Program Studi Pendidikan Fisika  
Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta

## Abstrak

Simulasi dari skema pengukuran perubahan frekuensi Doppler ultrasonik telah ditunjukkan. Skema ini digunakan untuk mendeteksi kelajuan dari suatu benda yang sedang bergerak. Sinyal gelombang ultrasonik ditimpakan pada benda yang sedang bergerak dan sinyal yang terpantul kemudian diolah untuk mengidentifikasi spektrum perubahan frekuensi Doppler ultrasoniknya dengan menggunakan algoritma FFT (Fast Fourier Transform). Sebagai parameter masukan adalah frekuensi transmiter, frekuensi sampling, kecepatan ultrasonik, kelajuan obyek dan sudut efektif antara berkas ultrasonik dengan lintasan linear gerak obyek. Implementasi simulasi dilakukan dengan MATLAB berbasis GUI (Graphical User Interface). Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan frekuensi transmiter 200 kHz dan kelajuan obyek sekitar 144 km/jam dalam bidang transportasi, spektrum perubahan frekuensi Doppler ultrasonik nampak jelas dan nilai terukurnya sekitar 38 kHz. Namun, dalam bidang medis untuk pengukuran akelajuan aliran darah dengan frekuensi transmiter 10 MHz dan kelajuan benda 7 m/s, spektrum beda frekuensi Doppler ultrasonik tidak begitu jelas tetapi nilai terukurnya sekitar 73,54 kHz.

**Kata Kunci:** perubahan FREKUENSI Doppler ultrasonik, algoritma FFT

## Abstract

A simulation of Doppler ultrasound frequency shift measuring scheme has been introduced to detect on speed of the a moving object. The ultrasound signal was impinged onto the a moving object and the reflected signal was processed by a FFT algorithm to identify the spectrum of Doppler ultrasound frequency shift. As the input parameters are the transmitter of frequency, sampling of frequency, velocity of ultrasound, speed of object and effective of angle between the beam of ultrasound and the linear path of a moving object. This simulation was implemented by MATLAB based on GUI (Graphical User Interface). The result of simulation showed that the spectrum of Doppler frequency has been obviously shifted at the 200 kHz of transmitter frequency and 144 km/h of speed object (transportation field), and the its measured value is about 38 kHz. However, in the medical field, it has been not obviously shifted at 1 MHz of transmitter frequency and 7 m/s of speed object (blood flow), but the its measured value is about 73,54 kHz.

**Key Word:** Doppler ultrasound frequency shift, FFT algorithm

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu keunggulan dalam pengukuran fisis benda adalah pengembangan suatu sistem deteksi yang tak merusak (*non destructive*) dan tak kontak (*contactless*) dengan benda. Dalam bidang perminyakan, misalnya, metode ini digunakan untuk mendeteksi kebocoran pipa yang terpendam dengan tanpa membongkarnya [1]. Sistem deteksi yang demikian ini, menjadi sangat penting dalam dunia medis. Proses diagnosis dan monitoring suatu penyakit sangat membutuhkan metode yang tidak membawa dampak samping (tak merusak) bagi pasien [2].

Pengukuran berbasis Doppler ultrasonik merupakan salah satu metode tak merusak dan tak kontak. Metode ini telah banyak dikembangkan dalam bidang transportasi untuk mendeteksi kelajuan tinggi suatu mobil dan keretakan (cacat permukaan) rel kereta api [3]. Di dalam bidang medis, metode ini dimanfaatkan untuk mendeteksi kelajuan aliran darah, meskipun dengan kelajuan kecil sekitar 0,2 – 7 m/s [4].

Dalam makalah ini, skema pengukuran berbasis Doppler ultrasonik ditunjukkan dengan simulasi interaktif GUI Matlab Versi 5. Sinyal ultrasonik yang terpantul dari benda diinterferensikan dengan sinyal transmiter (sinyal awal) dan diolah dengan algoritma FFT (*Fast Fourier Transform*) untuk menunjukkan spektrum FREKUENSInya. Nilai perubahan frekuensinya akan sebanding dengan nilai pergeseran spektrum FREKUENSInya. Dari hasil simulasi ini diharapkan menjadi langkah awal untuk merancang bangun sistem pengukuran berbasis Doppler ultrasonik, terutama untuk kepentingan medis.

## 2. DASAR TEORI

### 2.1 Sinyal Doppler

Jika bunyi dengan FREKUENSI  $\nu_s$  ditransmisikan oleh sumber bunyi yang bergerak dengan kelajuan  $u_s$  dan diterima oleh pendengar yang bergerak dengan  $u_o$ , maka FREKUENSI yang diterima oleh pendengar  $\nu_o$  dapat dinyatakan dengan persamaan Doppler

$$\nu_o = \frac{c - u_o}{c - u_s} \nu_s \quad (1)$$

dengan  $c$  kecepatan bunyi pada medium tertentu. Untuk kelajuan (baik  $u_s$  maupun  $u_o$ ) yang melawan arah gerak kecepatan bunyi, maka tanda negatif harus disubstitusikan ke dalam kelajuan pada Persamaan (1).

Pada eksperimen Doppler ultrasonik, transduser stasioner berperan sebagai pemancar (*transmitter*) gelombang ultrasonik kontinu dengan FREKUENSI  $\nu_T$ . Ultrasonik menimpa benda yang sedang bergerak menjauh dari sumber dengan kelajuan  $u$ . Menurut Persamaan (1) FREKUENSI efektif yang diterima oleh benda (sebagai pendengar) dinyatakan sebagai

$$\nu_{eff} = \frac{c - u}{c} \nu_T \quad (2)$$

Berkas ultrasonik akan dipantulkan oleh benda, dan sekarang benda berperan sebagai sumber yang bergerak menjauh dari pendengar (dalam hal ini transduser yang memiliki peran ganda baik sebagai pemancar maupun penerima). FREKUENSI efektif  $\nu_R$  yang diterima oleh *receiver* (penerima) dinyatakan sebagai

$$\nu_R = \frac{c}{c + u} \nu_{eff} \quad (3)$$

Kombinasi Persamaan (2) dan (3) memberikan persamaan FREKUENSI yang diterima oleh *receiver*, dan dapat dinyatakan sebagai

$$\nu_R = \frac{c - u}{c + u} \nu_T \quad (4)$$

Untuk kasus  $\frac{u}{c} \ll 1$  dan dengan manipulasi aljabar, Persamaan (4) mereduksi menjadi

$$\nu_R = \left(1 - 2\frac{u}{c}\right) \nu_T \quad (5)$$

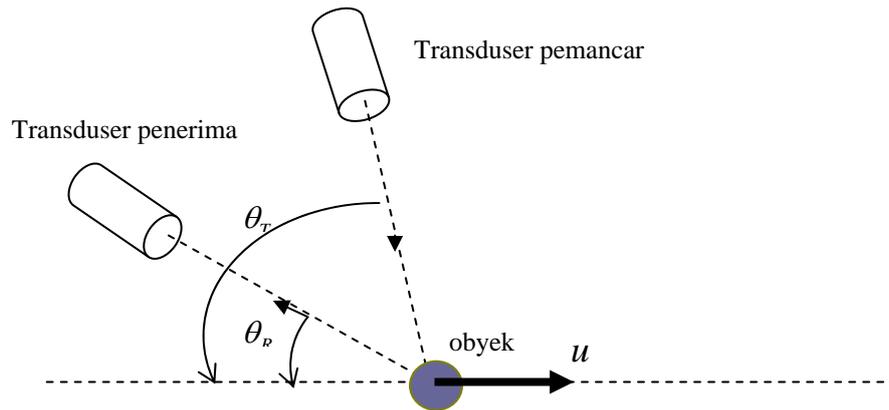
Dengan Persamaan (5) ini, pergeseran (perubahan) FREKUENSI Doppler dapat didefinisikan sebagai

$$\Delta\nu = \nu_R - \nu_T = -\frac{2u\nu_T}{c} \quad (6)$$

Persamaan (6) menyatakan bahwa perubahan FREKUENSI berbanding lurus dengan kelajuan benda.

Pada eksperimen Doppler ultrasonik, transduser pemancar dan penerima dalam kondisi stasioner. Gambar 1 menunjukkan bahwa kedua transduser dapat tidak dalam satu garis. Misalkan,  $\theta_T$  sudut yang dibentuk oleh pemancar terhadap arah gerak obyek dan  $\theta_R$  sudut yang dibentuk penerima terhadap arah gerak obyek, maka kecepatan relatif obyek terhadap pemancar dan penerima, masing-masing dapat dinyatakan sebagai

$$u \cos(\theta_T) \text{ dan } u \cos(\theta_R) \tag{7}$$

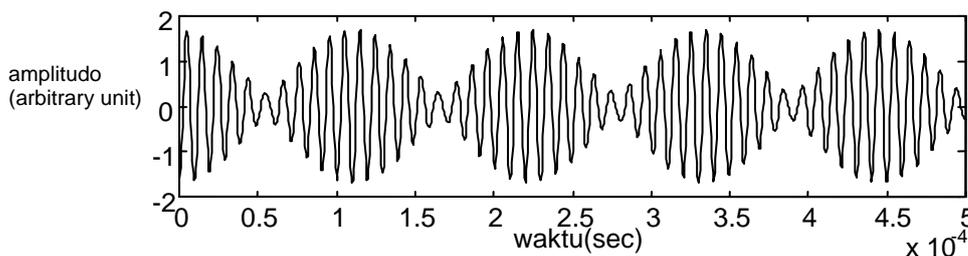


Gambar 1. Susunan eksperimen pengukuran berbasis Doppler ultrasonik

Namun untuk kepentingan efisiensi, transduser berperan ganda baik sebagai pemancar maupun penerima. Dengan demikian berlaku  $\theta_T \approx \theta_R = \theta$  dan Persamaan (6) menjadi

$$\Delta \nu = \nu_R - \nu_T = -\frac{2u \cos(\theta) \nu_T}{c} \tag{8}$$

dengan  $u \cos(\theta)$  adalah kecepatan benda relatif terhadap transduser. Secara khusus jika  $\theta = 90^\circ$ , yaitu transduser tegak lurus terhadap arah gerak obyek, nilai perubahan FREKUENSInya akan nol.



Gambar 2. Ilustrasi sinyal hasil interferensi atau sinyal Doppler

Karena di dalam eksperimen selalu berlaku  $u \ll c$ , maka perubahan FREKUENSI Doppler sangat kecil jika dibandingkan dengan FREKUENSI transmiter dan oleh karena itu sulit untuk diukur secara langsung [5]. Masalah ini dapat diatasi dengan menjumlahkan (interferensi) sinyal dari pemancar dengan sinyal yang diterima. Jika sinyal yang terpancar berbentuk sinusoidal

$$S_T(t) = A \sin(2\pi \nu_T t) \tag{9}$$

maka sinyal yang diterima akan berbentuk

$$S_R(t) = A \sin\{2\pi(\nu_T + \Delta\nu)t\} \quad (10)$$

dengan  $A$  amplitudo sinyal (diasumsikan sama untuk kedua sinyal) dan  $t$  adalah waktu. Interferensi sinyal dapat diperoleh dengan menjumlahkan secara matematik kedua sinyal tersebut. Dengan manipulasi aljabar, sinyal interferensi dapat dinyatakan sebagai

$$S(t) = 2A\{\cos[2\pi(\frac{1}{2}\Delta\nu)t]\}\sin[2\pi(\nu_T + \frac{1}{2}\Delta\nu)t] \quad (11)$$

Persamaan (11) merupakan sinyal Doppler dan suku  $\cos[2\pi(\frac{1}{2}\Delta\nu)t]$  merupakan modulasi amplitudo sinyal. Ilustrasi sinyal inteferensi ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Sinyal (dalam eksperimen riil) merupakan nilai tegangan listrik terhadap waktu. Karakteristik sinyal ini, dapat direkayasa untuk memperoleh beberapa informasi yang dibutuhkan. Suatu sinyal kontinu periodik  $S(t)$  dengan periode  $T_p$  akan dianggap sebagai susunan sinyal sinus dan cosinus dan membentuk deret Fourier

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_k e^{jn2\pi\nu t} \quad (12)$$

dengan  $a_k$  koefisien Fourier. Untuk sinyal non-periodik, periode  $T_p$  dianggap tak hingga. Hal ini membuat Persamaan (12) dapat disusun dalam bentuk integral Fourier atau transformasi Fourier (FT) sebagai berikut

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{j2\pi\nu t} dt \quad (13)$$

dan transformasi baliknya dinyatakan sebagai

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\nu) e^{-j2\pi\nu t} d\nu \quad (14)$$

Dalam pengolahan sinyal digital, data sinyal tidak lagi kontinu tetapi diubah menjadi diskrit, sehingga transformasi Fourier pun berubah menjadi transformasi Fourier diskrit (DFT).

Misalkan, sinyal  $S(t)$  akan dicuplik hanya pada waktu diskrit yang dinyatakan sebagai

$$t_k = k\Delta \text{ dengan } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (16)$$

dengan  $\Delta$  interval cuplikan (sampling) dan  $N$  jumlah cuplikan, maka transformasi Fourier diskrit (DFT) didefinisikan sebagai

$$F_n = F(\nu_n) = \Delta \sum_{k=0}^{N-1} S(t_k) e^{j2\pi kn/N} \quad (17)$$

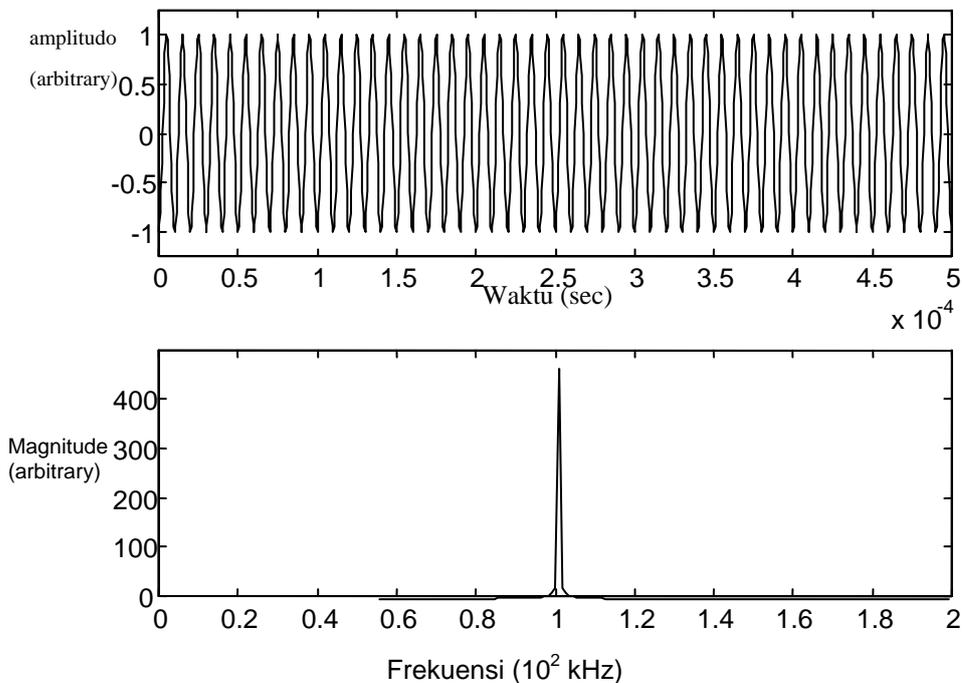
dengan FREKUENSI  $\nu_n$  diberikan sebagai

$$\nu_n = \frac{n}{N\Delta} \text{ dengan } n = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2} + 1, \dots, \frac{N}{2} - 1, \frac{N}{2}. \quad (18)$$

Hal ini mengimplikasikan bahwa kawasan FREKUENSI membentang dari  $-1/\Delta$ , FREKUENSI sentral  $\nu_0$ , sampai  $1/\Delta$ . DFT berguna untuk mentransformasikan data sampling dari daerah waktu ke daerah FREKUENSI, sedemikian rupa sehingga informasi spektrum sinyal secara eksplisit dapat diperoleh.

Teorema sampling sangat diperlukan karena sinyal  $S(t)$ , pada  $|\nu| > \nu_c$  dengan  $\nu_c$  FREKUENSI kritis tertentu, akan berada dalam keadaan pita FREKUENSI terbatas yang transformasinya bernilai  $F(\nu) = 0$ . Teorema sampling menyatakan bahwa sinyal kontinu  $S(t)$  akan didefinisikan secara lengkap oleh nilai cuplikan  $S_k = S(t_k)$  asalkan bahwa interval sampling  $\Delta$  tidak boleh melebihi  $1/2\nu_c$ . FREKUENSI  $\nu_c$  sering juga disebut FREKUENSI Nyquits dan memberikan batas nilai minimum FREKUENSI sampling ketika mendigitalisasi sinyal kontinu.

Persamaan (17) memerlukan perhitungan  $N^2$  perkalian dan  $N(N-1)$  penjumlahan. Namun dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) jumlah perhitungan dapat dikurangi. Penghematan tersebut diperoleh dengan memanfaatkan sifat periodik dan memisahkan deret genap-ganjil dari data  $S(t_k)$ . Dengan demikian, waktu perhitungan lebih pendek jika jumlah cuplikan  $N$  adalah pangkat 2. Pembahasan lebih terperinci tentang FFT dapat diperoleh pada Stearns dan David [6]

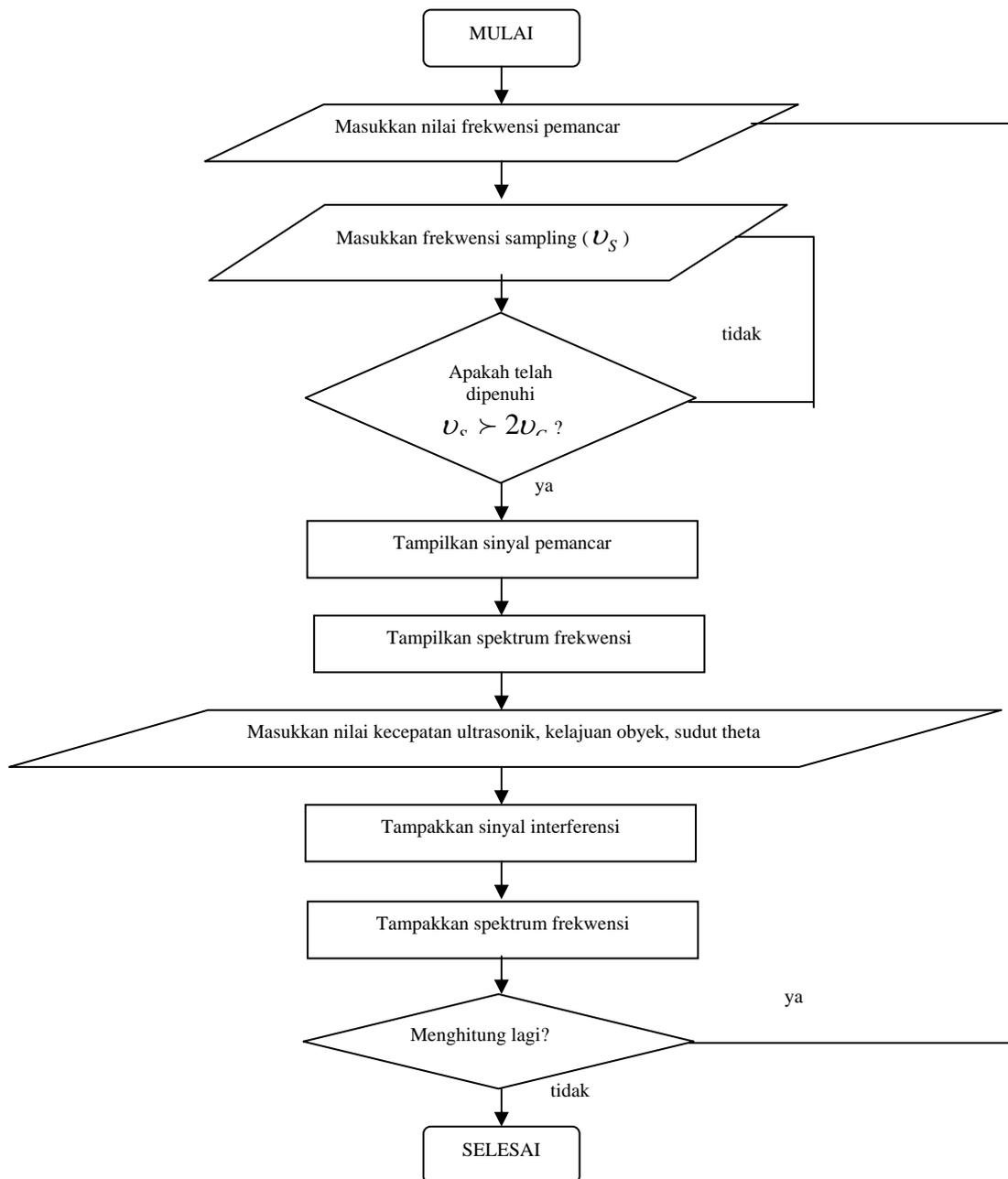


Gambar 3. Dengan *command fft* pada Matlab, sinyal dengan frekuensi 100 kHz diperlihatkan spektrum frekuensinya dengan jelas

### 3. METODE PENELITIAN

Di dalam Matlab Versi 5 atau yang lebih tinggi, algoritma FFT sudah diimplementasikan dalam perintah *fft command*. Untuk membuat spektrum frekuensi dari suatu sinyal periodik, hal ini cukup hanya dengan memanggil kembali *command* tersebut seperti yang diperoleh pada Gambar 3. Simulasi ini menggunakan fasilitas GUI, dimana pengguna dapat berinteraksi dengan paket program untuk memanipulasi dan mengambil informasi dari yang diinginkan. dan *software* ini dapat berlari dengan cepat dalam komputer memori 24 MB atau yang lebih tinggi lagi.

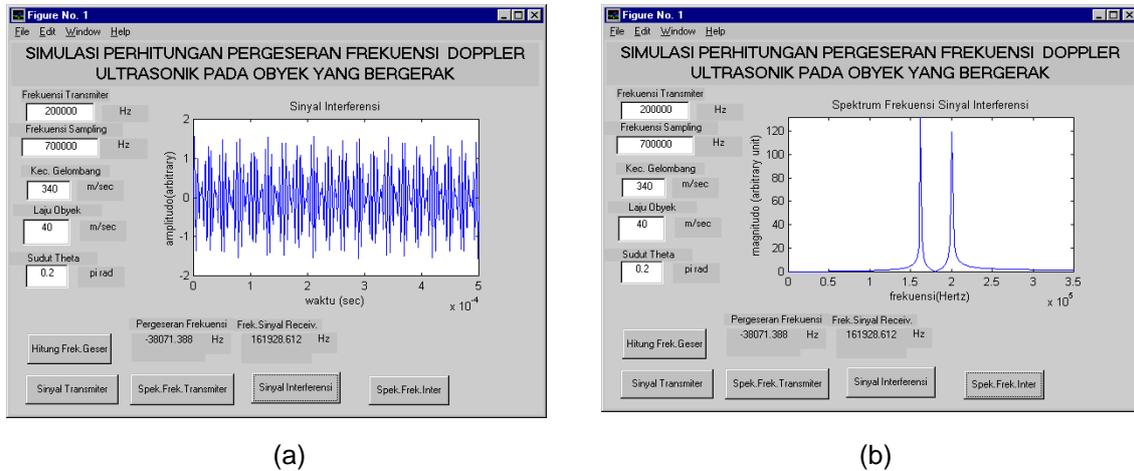
Gambar 4 menunjukkan *flow chart* dari perancangan program simulasi. Perancangan program terdiri atas 5 *edit text* yang berfungsi untuk memasukkan input parameter FREKUENSI pemancar, FREKUENSI sampling, kecepatan ultrasonik, kelajuan obyek dan sudut efektif. Tombol perintah ada 5 yang terdiri atas tombol menghitung perubahan FREKUENSI Doppler, menampilkan sinyal pemancar, menampilkan spektrum FREKUENSI pemancar, menampilkan sinyal interferensi dan menampilkan spektrum FREKUENSI sinyal interferensi. Untuk menampilkan sinyal dan spektrum FREKUENSI hanya ada satu *frame*. Dua *text-box* digunakan dalam simulasi ini untuk menampilkan hasil perhitungan nilai perubahan FREKUENSI dan FREKUENSI sinyal yang diterima.



Gambar 4. Flow Chart perancangan program simulasi

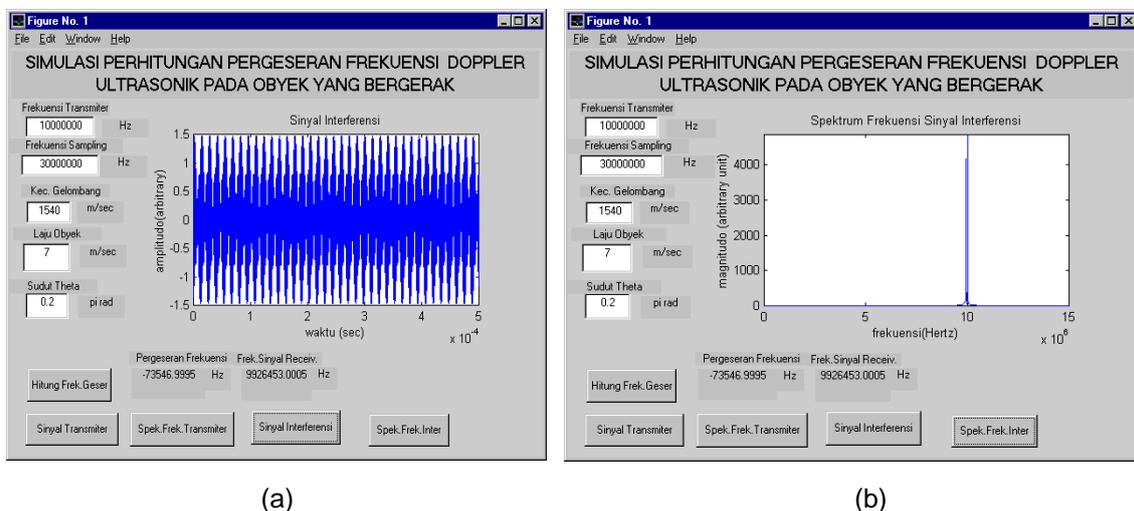
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Di udara, FREKUENSI ultrasonik berkisar 30 kHz –2 MHz dan kecepatannya sekitar 340 m/s [3]. Untuk mendeteksi kelajuan benda di udara, seperti kelajuan tinggi suatu mobil yang berjalan, dalam simulasi ini digunakan FREKUENSI ultrasonik 200 kHz dan kelajuan benda 40 m/s atau 144 km/jam. Dalam eksperimen berbasis Doppler ultrasonik ini, sudut efektif tidak boleh melebihi  $50^{\circ}$  [4]. Di dalam air/jaringan tubuh, FREKUENSI ultrasonik berkisar 200 kHz-15 MHz, kecepatan ultrasonik sekitar 1540 m/s, dan kelajuan aliran darah yang akan dideteksi berkisar 0,2 m/s - 7 m/s [6]. Untuk kepentingan medis, dalam simulasi ini digunakan FREKUENSI pemancar 10 MHz dan kelajuan obyek 7 m/s.



Gambar 5. (a) Hasil simulasi sinyal interferensi untuk benda bergerak dengan kelajuan 40 m/s, (b) spektrum frekuensi sinyal interferensi yang memperlihatkan adanya pergeseran (perubahan) frekuensi

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi eksperimen Doppler ultrasonik untuk mendeteksi kelajuan benda 40 m/s di udara dengan sudut efektif  $0,2\pi$  rad. Gambar 5a menunjukkan hasil sinyal interferensi dan spektrum FREKUENSInya ditunjukkan pada Gambar 5b. Dalam spektrum ini, sangat jelas menunjukkan perubahan (pergeseran) FREKUENSI dari 200 kHz ke sekitar 160 kHz. Di dalam perhitungan, nilai sinyal FREKUENSI yang diterima sekitar 161,929 kHz dan perubahan frekuensinya sekitar 38 kHz. Nilai perubahan FREKUENSInya ini masih dalam jangkauan ultrasonik.



Gambar 6. (a) Hasil simulasi sinyal interferensi untuk benda bergerak, seperti aliran darah dengan kelajuan 7 m/s, (b) spektrum frekuensi sinyal interferensi yang tidak memperlihatkan adanya pergeseran (perubahan) frekuensi dengan jelas

Gambar 6 menunjukkan hasil simulasi eksperimen untuk kepentingan medis. Eksperimen ini menggunakan FREKUENSI pemancar 10 MHz dan kelajuan aliran darah yang akan dideteksi sekitar 7 m/s. Gambar 6a menunjukkan sinyal interferensi dan Gambar 6b memperlihatkan hasil spektrum FREKUENSInya. Perubahan puncak spektrum FREKUENSInya tidak begitu jelas, namun dari hasil perhitungan nilai perubahan FREKUENSInya sekitar 73,54

kHz dan FREKUENSI sinyal yang diterima sekitar 9,93 MHz. Di dalam jaringan tubuh, nilai perubahan FREKUENSI tidak berada dalam jangkauan ultrasonik. Oleh karena itu, dalam mendeteksi kelajuan aliran darah, beberapa penelitian menggunakan audio-amplifier sebagai detektor perubahan FREKUENSI [3]

## 5. KESIMPULAN

Efek Doppler ultrasonik dapat digunakan untuk mendeteksi kelajuan suatu benda tertentu dengan mengamati perubahan frekuensinya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan FREKUENSI transmiter 200 kHz dan kelajuan obyek sekitar 144 km/jam dalam bidang transportasi, spektrum perubahan FREKUENSI Doppler ultrasonik nampak jelas dan nilai terukurnya sekitar 38 kHz. Namun, dalam bidang medis untuk pengukuran kelajuan aliran darah dengan FREKUENSI transmiter 10 MHz dan kelajuan benda 7 m/s, spektrum beda FREKUENSI Doppler ultrasonik tidak begitu jelas tetapi nilai terukurnya sekitar 73, 54 kHz.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengembangan (LPP) Universitas Ahmad Dahlan yang telah mendanai penelitian ini, Drs. Abdul Fadlil, MT dan Nanang Suwondo, S.Pd atas beberapa sarannya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [ 1 ] Jordana J., Gasulla M., dan Areny RP, *Electrical Resistance Tomography to Detect Leaks from Buried Pipes*, Meas. Sci. Tech. 12, 2001.
- [ 2 ] Gencer N.G dan Tek N.M., *Imaging Tissue Conductivity via Contactless Measurement: A Feasibility Study*, Elektrik Vol. 6 No:3, 1998.
- [ 3 ] Wooh S.C, Wei C., dan Clay A., *Short-Time Fourier Transform of Continuous Wave Doppler Signals*, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [ 4 ] Sanchez I., Garcia N.F., dan Fuentes M., *Doppler Ultrasound Blood Flow Detector*, Jour. Of the Maxican Soceity of Instrumentation, 1999.
- [ 5 ] Andrews D.G.H., *An Experiment to Demonstrate the Principles and Processes Involved in Medical Doppler Ultrasound*, Phys. Educ.35(5) , 2000.
- [ 6 ] Stearns S.D dan David R.A., *Signal Processing Algorithms in Matlab*, Prentice Hall PTR, 1995.