

## DAFTAR LAMPIRAN

### 1. PROGRAM *listing* algoritma *Fast Fourier Transform*

#### L.1.1 Menghitung PSD

```
function sayuti(fname)
Imge = im2double(imread(fname, 'bmp'));
Imge = rgb2gray(Imge);
dim_Imge = size(Imge);
tmp = dim_Imge (1)/2;
row_tgh = uint16(tmp);
Row = Imge(row_tgh,:);
fs = 200;
h = spectrum.welch;
Freqres = psd (h, Row, 'Fs', fs);
plot (Freqres);
```

#### L.1.2 Menghitung beda fasa ( $\phi$ )

```
function sayuti(fname)
% read data rowxcoulom
% fourier transform
Imge = im2double(imread('frinji-7', 'bmp'));
Imge = rgb2gray(Imge);
dim_Imge = size(Imge);
tmp = dim_Imge (1)/2;
tmp2 = dim_Imge (2)/2;
dim_Imge;
tmp2;
row_tgh = uint16(tmp);
fs = 200;
Len = 512;
ham = hamming(Len);
Row_tgh = Imge(row_tgh,:);
Row = Row_tgh (207:Len+206); Rowh = Row.*ham';
%h = spectrum.welch;
% Freqres = psd (h, Row, 'Fs', fs);
% plot (Freqres);
y=fft(Row,Len );yh=fft(Rowh,Len );
ang = angle(y); angh = angle(yh);
prad=unwrap(ang); pradh=unwrap(angh); % Phase
% plot (max(prad));
pdeg = prad*180/pi; pdegh = pradh*180/pi;
% f=(0:length(y)-1)/length(y)*100;
f1 = (0:Len-1)*fs/2/Len; f2 = f1;
plot(f1,pdeg,'- ',f2,pdegh, '- ');
title('- : without hamming          -- : with hamming');
% text(50,3500,'without window', 50,7500,'with hamming window');
xlabel('Frekuensi (Hz)')
ylabel('Fasa(deg)')
```

(lanjutan)

### L.1.3 Menghitung pola spasial frinji *per frame*

```
function frinji()
% read data rowxcoulom
% fourier transform

Imge = im2double(imread('PDVD_391', 'bmp'));
Imge = rgb2gray(Imge);
dim_Imge = size(Imge);

tmp = dim_Imge (1)/2;
row_tgh = uint16(tmp);
Row = Imge(row_tgh,:);

%Yang diubah angka 30 sesuai nomor frame/file.
Row391 = Row
save ('fr391.mat', 'Row391');
plot (Row391);

xlabel('Position(x)')
ylabel('Intensity')
```

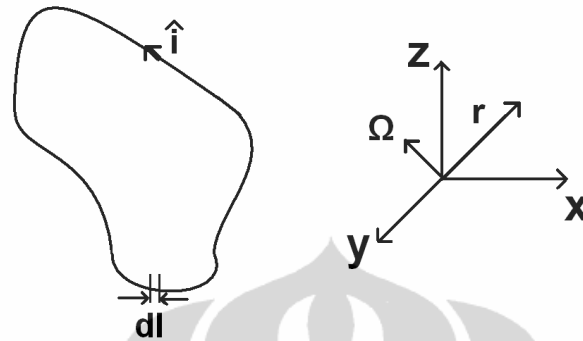
### L.1.4 Menghitung pola spasial 3 Dimensi

```
[x,y]=meshgrid(-4:0.2:4);
k=57.32*2*3.14/75;
omeg=57.32*2*10*x;
z=2*(1+cos(2*k*x));
mesh(x,y,z);
xlabel('\bfx');
ylabel('\bfy');
zlabel('\bfz');
```

## L.2. TEOREMA *Stoke's* untuk mengetahui formula *Sagnac*

Penurunan persamaan matematika apabila suatu *laser ring* bergerak rotasi dengan kecepatan sudut rotasi (*angular velocity*)  $\Omega$  pada sumbu  $x, y, z$  di mana  $dl$  adalah perjalanan berkas cahaya pada lintasan dengan keliling  $\Delta S$ . Waktu ( $t$ ) yang diperlukan sebesar  $dl/c$  dan komponen kecepatan ( $v_{\text{path}}$ ) sepanjang lintasan berkas cahaya pada suatu titik di *resonator*. Persamaan matematika (L.2.1) merupakan komponen kecepatan di mana  $\Omega$  terlihat seperti pada Gambar L.2.1.

(lanjutan)

Gambar L.2.1 Ring laser yang bergerak rotasi dengan kecepatan sudut rotasi  $\Omega_L$  [9].

$$v_{path} = (\bar{\Omega}x\bar{r})\bar{i} \quad (L.2.1)$$

di mana

$$\bar{\Omega} = \Omega_x \bar{x} + \Omega_y \bar{y} + \Omega_z \bar{z} \quad (L.2.2)$$

 $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  dan  $\bar{z}$ : vektor unit sepanjang sumbu x, y dan z. $\bar{r}$  : vektor posisi pada titik *resonator* dengan koordinat (x,y,z).

$$\bar{r} = x\bar{x} + y\bar{y} + z\bar{z} \quad (L.2.3)$$

 $\bar{i}$  : unit vektor tangensial ke lintasan cahaya pada titik (x,y,z).

$$\Delta S = \oint_{ring} [(\bar{\Omega}x\bar{r})\bar{i}] \frac{dl}{c} = \frac{1}{c} \oint_{ring} (\bar{\Omega}x\bar{r})\bar{d}l \quad (L.2.4)$$

(lanjutan)

Gunakan teorema *Stoke's* di mana vektor  $\bar{dl} \equiv \bar{idl}$

$$\oint_{ing} (\bar{\Omega} \bar{x} \bar{r}) \cdot d\bar{l} = \iint_{area}^{ing} [\nabla \cdot (\bar{\Omega} \bar{x} \bar{r})] \cdot d\bar{A} \quad (L.2.5)$$

Sehingga diperoleh persamaan

$$\Delta S = \frac{1}{c} \iint_{area}^{ing} [\nabla \cdot (\bar{\Omega} \bar{x} \bar{r})] \cdot d\bar{A} \quad (L.2.6)$$

Melalui persamaan identitas maka persamaan (L.4.6) di atas menjadi:

$$\Delta S = \frac{1}{c} \iint_{area}^{ing} 2\bar{\Omega} \cdot d\bar{A} = \frac{2}{c} \bar{\Omega} \cdot \bar{A} \quad (L.2.7)$$

Pergeseran frekuensi resonansi yang disebabkan oleh perubahan panjang lintasan adalah  $\Delta v/v = \Delta S/S$  sehingga diperoleh:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta S}{S} = \frac{2\bar{\Omega} \cdot \bar{A}}{cS} \quad (L.2.8)$$

Maka diperoleh persamaan *beat frequency* atau *Sagnac frequency* sebagai berikut:

$$f_{beat} = f_{sagnac} = 2\Delta v = \frac{4\bar{\Omega} \cdot \bar{A}}{\lambda S} = \frac{4\Omega_L A}{\lambda S} \quad (L.2.9)$$

# ALAT UKUR KECEPATAN SUDUT ROTASI INTERFEROMETER SAGNAC PASIF BERBASIS OPTIK

Sayuti Syamsuar

Peneliti di Pusat Pengkajian Teknologi Industri dan Sistem Transportasi,  
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

## Abstract

*The Sagnac Interferometer as Ring Laser Gyro's was setup on the rotation platform while the wave of laser gas He Ne beam,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  was transmitted to the collimator, beam splitter and mirrors have been received by beam splitter. And then reflected to detector in the ring resonator. The image data of fringe pattern as red and black colour have been observed on the layer. The beat frequency,  $f_b$  at static and dynamic translation during rotation were observed on the histogram display. The analysis of Power Spectral Density, PSD by using Fast Fourier Transform algorithm, FFT to known the Magnitude in dB versus fundamental frequency,  $f$  in Hz. The lock-in phenomenon as characteristic of Ring Laser Gyro's are presented to known the beat frequency ( $f_b$ ) versus rotation speed of fringe pattern,  $\Omega_L$  tendency. That  $\Omega_L$  calculated by mathematical equation and data measurement by using histogram display of fringe video recording data. These concept only use by transversal wave form but not by photonic.*

*Key words : rotation rate of fringe pattern, Sagnac interferometer, beat frequency, ring resonator, RLG and IFOG.*

## LATAR BELAKANG

Alat ukur sudut arah digunakan orang pada umumnya sebagai alat pemandu dalam sistem navigasi pesawat udara berbadan lebar ataupun kecil. Alat ukur ini pada umumnya berbasis mekanikal dan akhirnya berkembang berbasis optik. Penelitian ini menggunakan konfigurasi optik cermin datar, pemisah berkas dan layar dengan menggunakan Interferometer Sagnac sebagai sensor pada Ring Laser Gyroscope. Tahap lanjutan penelitian ini adalah penggunaan prisma sebagai pengganti cermin datar dan penggunaan sistem transmisi data O Ring agar data dapat dikirimkan secara kontiniu ke layar. Konfigurasi serat optik sebagai Interferometer Fiber Optic Gyro (IFOG) cukup menjanjikan untuk menghasilkan ketelitian tinggi, lebih ringan, kompak dan dengan harga murah jika diproduksi di dalam negeri. Apabila konfigurasi kedua alat ukur ini dipasang 2 accelerometer maka alat ukur menghasilkan sudut arah (heading) yang

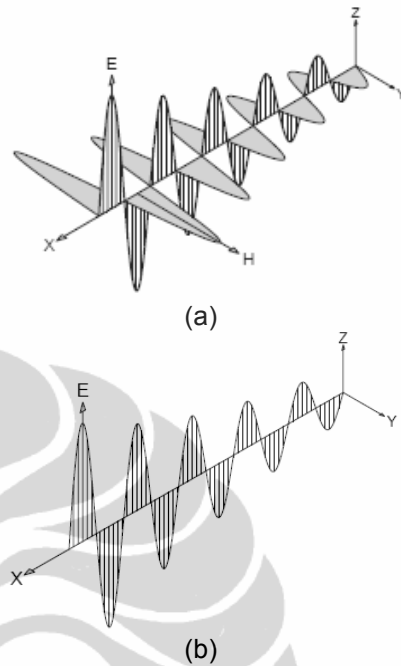
termasuk ke dalam kategori Strapdown Inertial Navigation [1], [2] dan [9].

## PENDAHULUAN

Efek Sagnac juga dikenal sebagai Interferensi Sagnac, di mana efek ini ditemukan oleh seorang fisikawan Perancis, bernama Georges Sagnac. Fenomena interferensi yang terjadi pada lingkaran tertutup, adalah akibat beda fasa absolut gelombang berdiri monokromatik yang ditimbulkan oleh gerak rotasi platform,  $\Omega$ . Efek Sagnac berkembang dari awalnya yaitu dengan ditemukannya konfigurasi set up yang sering disebut ring interferometry. Suatu gelombang berdiri monokromatik dipisahkan menjadi 2 berkas gelombang dengan arah yang saling berlawanan dengan amplituda sekitar separuh aslinya. Lintasan berkas laser membentuk ring resonator yang berada pada daerah yang berdekatan antara satu komponen optika utama seperti cermin, sumber Laser, pemisah berkas dan layar dengan komponen optika pendukung lainnya. Sehingga terjadi interferensi membentuk

perbedaan sudut fasa yang konstan pada setiap putaran rotasi *platform*. Lintasan yang dilalui berkas *laser* ini disebut *ring resonator*. Pada titik masuk berkas cahaya pertama yang juga disebut sebagai titik keluar berkas cahaya kedua dan titik keluar berkas cahaya pertama yang juga disebut sebagai titik masuk berkas cahaya kedua, secara kontinu melalui peralatan optika dan merupakan lintasan berkas cahaya monokromatik sehingga terjadi pola interferensi di layar. Posisi dan pola interferensi frinji tergantung dari kecepatan sudut rotasi *platform*,  $\Omega$ , *setup* dan *setting* pada ke-tiga cermin. *Setup* peralatan seperti ini disebut Interferometer Sagnac yang terdiri dari cermin datar, kolimator dan pemisah berkas di atas *platform* gerak rotasi. Pemisah berkas berfungsi untuk membagi sumber menjadi 2 berkas gelombang monokromatik yang melintasi ketiga cermin (konfigurasi *triangle*) pada dua arah yang berlawanan. Interferometer Sagnac pasif ditempatkan pada *platform* yang digerakkan oleh motor dengan kecepatan sudut rotasi *platform*,  $\Omega$ .

$$C = \frac{C_0}{n}$$



Gambar 1  
Gelombang elektromagnetik dengan polarisasi E saja [3]

### TEORI GELOMBANG

Berkas sinar monokromatik terkolimasi dengan polarisasi linier seperti terlihat pada Gambar 1. Pada gambar tersebut komponen gelombang elektrik digambarkan sebagai  $E_z$  di mana  $E_z$  berpropagasi searah sumbu x [3]. Seiring dengan  $E_z$ , akan terjadi  $H_z$  komponen gelombang elektromagnetik yang memiliki polarisasi tegak-lurus terhadap  $E_z$  seperti terlihat pada Gambar 1 (a). Komponen optik pada eksperimen ini hanya gelombang elektrik polarisasi vertikal saja [3] seperti terlihat pada Gambar 1 (b).

Persamaan gelombang umum dinyatakan sebagai berikut

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1)$$

$$\Psi(r, t) = C_i e^{-(j\omega t - kr)} \quad (1.2)$$

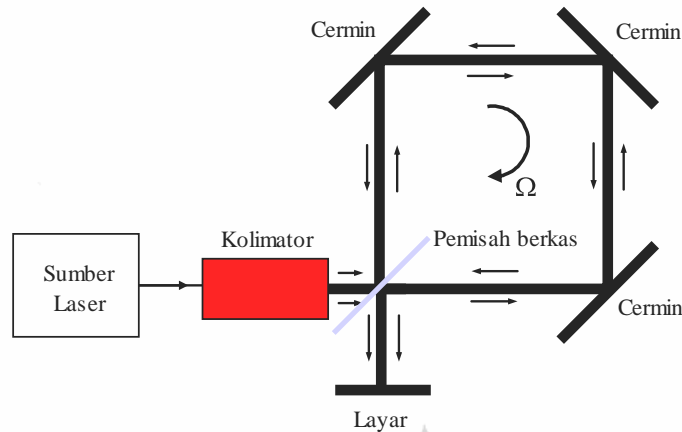
di mana

C : kecepatan cahaya pada medium  
n : indeks refraksi

### SETUP INTERFEROMETER SAGNAC

Pada saat *platform* bergerak rotasi, maka pola garis interferensi bergeser dari pola interferensi sebelumnya dalam keadaan diam sebagai referensi awal menjadi gerak translasi di detektor. Jumlah pergeseran frekuensi proporsional dan berbanding lurus dengan kecepatan sudut rotasi *platform*,  $\Omega$ . Hal ini diketahui sebagai efek *Doppler*. Sumbu rotasi tidak harus berada di dalam daerah titik pusat *ring resonator*, berada di mana saja di dalam *platform* disebut sebagai prinsip *Aronowitz*.

Pada Gambar 2 (a) dan (b) terlihat skematik dan *setup* Interferometer Sagnac pasif (karena sumber berada di luar *ring resonator*) yang mempunyai 3 cermin datar, 1 *beam splitter*, 1 sumber *Laser* gas He Ne dan 1 layar. Pada bagian bawah *platform* dilengkapi oleh motor sebagai penggerak rotasi *platform*.



Gambar 2 (a)  
Skematik Interferometer *Sagnac* Pasif.



Gambar 2 (b)  
Setup Interferometer *Sagnac* Pasif.

*Platform* pada mulanya dalam keadaan diam dan kemudian mulai bergerak rotasi secara perlahan. Kondisi transisi ini disebut waktu,  $t$  transien dari berkas cahaya gelombang monokromatik, di mana terjadi pergerakan gelombang dari titik masuk/ keluar berkas cahaya monokromatik di dalam sistem optik secara keseluruhan. *Setup* komponen optik dipasang tetap pada *platform*, sehingga satu berkas mengalami lintasan lebih pendek dari pada berkas yang lain. Hal ini mengakibatkan pergeseran frekuensi optik pada pola interferensi. Pola interferensi dan *lock-in* terjadi untuk setiap kecepatan sudut rotasi *platform*,  $\Omega$  yang diberikan, sehingga ada perbedaan/ pergeseran fasa oleh adanya kecepatan sudut rotasi *platform*  $\Omega$ . Pada percobaan *setup* Interferometer *Sagnac* pasif diperoleh pola gelap terang frinji yang tajam. Penggunaan kolimator sebagai penyearah dipasang di depan sumber *Laser* sehingga menghasilkan tingkat *visibility* yang tinggi

pula. Pengukuran dan pengamatan pola interferensi dilakukan sebanyak 5 titik pengukuran putaran rotasi *platform* konstan untuk menghasilkan daerah *lock-in*. Kemudian data perhitungan algoritma *Fast Fourier Transform* menghasilkan beda fasa absolut ( $\varphi_a$ ) pada pola intrferensi frinji.

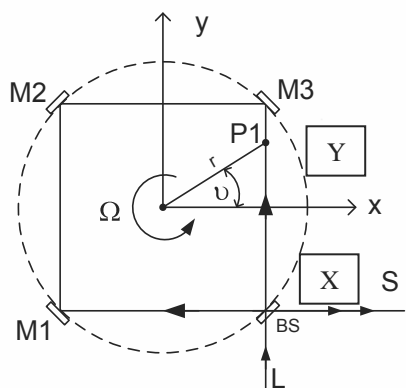
### **RING RESONATOR**

Pada setiap seksi dari *ring resonator*, cahaya mengalami propagasi dengan kecepatan yang sama dan arah yang berbeda. Notasi searah putaran jarum jam, adalah (+) dan berlawanan arah putaran jarum jam, adalah (-). Fenomena ini seperti diperlihatkan oleh Gambar 2. Pada *ring resonator* frekuensi optik masing-masing molekul bergerak searah putaran jarum jam (+) dan sebaliknya (-) sehingga mempunyai kecepatan yang sama pada lintasan yang berbeda (titik X dan Y). Photon mengalami stimulasi emisi dari molekul yang dieksitasi

dan hanya terjadi, jika frekuensi dari photon secara eksak sesuai dengan frekuensi photon yang siap diemisikan di dalam *ring resonator*.

Sebuah photon diemisikan dalam arah yang berlawanan dengan putaran jarum jam (-), sehingga terjadi pergeseran rata-rata *Doppler* ke frekuensi yang lebih tinggi. Photon yang lain bergerak searah putaran jarum jam (+) sesuai dengan pergeseran rata-rata *Doppler* ke frekuensi yang lebih rendah. Bagian atas pergeseran *Doppler* menghasilkan stimulasi emisi, sehingga terjadi interaksi dengan molekul-molekul yang di belakangnya.

Pada bagian bawah, pergeseran photon dengan cara yang sama mengalami stimulasi emisi juga, sehingga terjadi interaksi dengan molekul-molekul yang ditemui di depannya. Kecepatan cahaya,  $c$  dengan latar belakang konstan dan adanya pengaruh molekul-molekul pada bagian dalam *ring resonator* menghasilkan kecepatan sudut pola interferensi frinji ( $\Omega_L$ ) yang berbanding lurus dengan kecepatan cahaya ( $c = 3 \times 10^8$  m/det). Kejadian ini direferensikan sebagai ruang inersial. Cahaya *laser* merupakan suatu fraksi dari berkas cahaya gelombang monokromatik yang keluar dari *ring resonator*. Kedua frekuensi optik pada Gambar 3 menggiring cahaya *laser* ke pola interferensi yang menarik disebut *beat frequency*,  $f_B$  yang berada di dalam *ring resonator* tempat terjadinya pola citra frinji. Terjadi perubahan frekuensi pada kedua frekuensi tersebut sebagai akibat perbedaan fasa absolute ( $\varphi_a$ ) dari gelombang berdiri monokromatik tersebut.



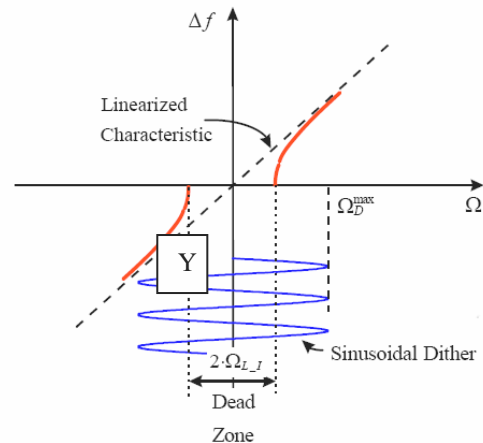
Gambar 3  
Bentuk *ring resonator* pada Interferometer Sagnac.

*Beat frequency*,  $f_B$  mempunyai pola interferensi sebagai fungsi waktu,  $t$  dan respons frekuensi,  $f$ . Terdapat banyak pola

interferensi frinji dari Interferometer Sagnac misal sebagai pola spasial dan lain-lainnya. *Beat frequency*,  $f_B$  mendekati nol pada saat tidak ada gerak rotasi di ruang inersial. Muncul sedikit perubahan pola interferensi apabila ada perbedaan jarak geometrikal pada susunan peralatan optik di mana sebesar  $\lambda/4$  saja sudah menghasilkan interferensi.

### KURVA LOCK IN

Berkas laser yang dihasilkan tergantung dari perancangan peralatan sumber *laser* menghasilkan berkas cahaya gelombang monokromatik dari *ring resonator* secara presisi. Kecenderungan untuk tidak terjadinya pelepasan dari ikatan pola interferensi frinji semula sebagai *beat frequency*,  $f_B$  awal untuk bergerak translasi di permukaan layar yang disebut *lock-in*. Pada keadaan *lock-in* tidak terjadi perubahan pola frinji di mana gerak rotasi *platform* kecil tidak memberikan respons dan daerah ini disebut *dead zone*. Peralatan Interferometer Sagnac pasif pada percobaan ini disusun di atas *platform* berbentuk lingkaran yang bergerak rotasi pada sumbunya. Terjadi pola interferensi yang berubah-ubah dalam bentuk gerak translasi di layar. Perubahan frekuensi optik pada pola frinji berbanding lurus dengan perubahan kecepatan sudut rotasi *platform*,  $\Omega$ . Peralatan yang dirancang mempunyai karakteristik *lock-in*, seperti diperlihatkan pada Gambar 4. Apabila, frekuensi optik cukup tinggi dengan kecepatan sudut rotasi *platform*,  $\Omega$  yang cukup tinggi pula, maka terjadi respons perubahan dengan batas maksimum gerak translasi pola frinji di layar.

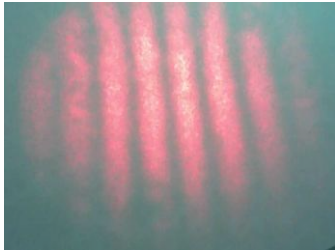


Gambar 4  
*Lock In* pada Interferometer Sagnac [7].



## ANALISIS DATA DAN HASIL

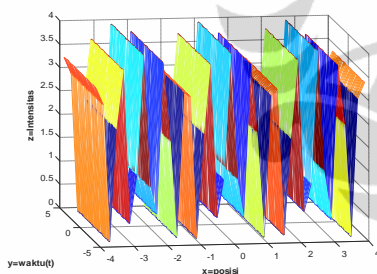
Pola interferensi frinji yang terjadi pada kecepatan sudut rotasi 18 rpm diperlihatkan oleh Gambar 5. Terlihat pola gelap terang yang dapat dimodelkan sebagai persamaan gelombang transversal.



Gambar 5

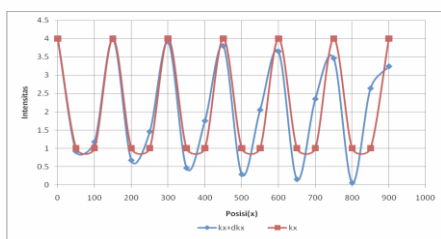
Pola interferensi frinji yang terjadi pada kecepatan sudut rotasi platform 18 rpm.

Hasil pemodelan dari teori gelombang monokromatik diperlihatkan sebagai pola spasial 2 D dan 3 Dimensi seperti pada Gambar 6 dan Gambar 7. Terlihat bahwa pengaruh perubahan bilangan gelombang  $k = 2\pi/\lambda$  mengakibatkan gerak translasi pola interferensi frinji di layar.



Gambar 6

Pola spasial 3 Dimensi dari pemodelan.

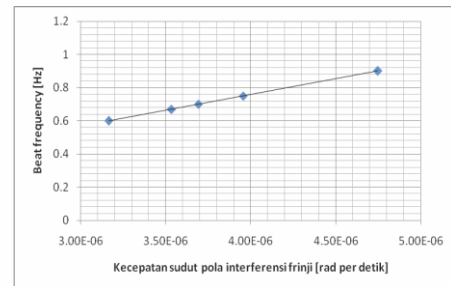


Gambar 7

Pola spasial 2 Dimensi dari pemodelan.

Pada Gambar 8 terlihat kurva *lock in* hasil percobaan. Hasil ini jika dibandingkan

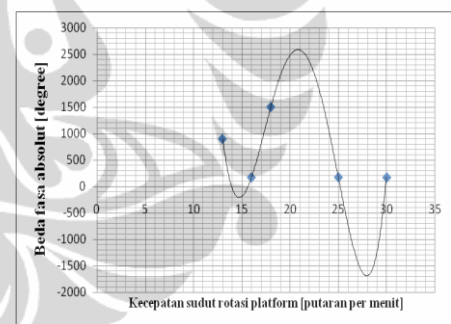
dengan percobaan luar negeri maka kurva ini masih berada di bawahnya [3].



Gambar 8

Kurva *lock in* hasil percobaan.

Pada Gambar 9 terlihat kurva beda fasa absolut ( $\phi_a$ ) yang diperoleh dari percobaan dengan 5 titik data pengukuran. Pada kecepatan sudut rotasi platform 18 rpm terdapat kesalahan percobaan di mana terjadi perubahan nilai yang sangat tinggi. Kemungkinan hal ini disebabkan terjadi perubahan kedudukan platform secara tiba-tiba.



Gambar 9

Kurva beda fasa absolut hasil percobaan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan di laboratorium dengan menggunakan setup Interferometer *Sagnac* pasif konfigurasi cermin datar maka disimpulkan bahwa

1. Pada penelitian Interferometer *Sagnac* Pasif telah dibuktikan secara teori dan eksperimental bahwa kecepatan putaran/rotasi platform yang semakin cepat menghasilkan pola frinji yang lebih rapat.
2. Pola frinji interferensi dideteksi dengan kamera 2-D dan untuk mengurangi konsumsi waktu komputasi maka penelitian ke depan disarankan untuk menggunakan kamera 1-D.

3. Pendeteksian perubahan kecepatan sudut pola interferensi frinji dilakukan dengan menganalisa perubahan perioda frinji. Pada percobaan ini digunakan metoda *Fast Fourier Transform* secara *Finite Impulse Response (FIR)* untuk mendeteksi perioda frinji tersebut.

Bekerja di BPP Teknologi sejak bulan September 1983.

Pendidikan S1 di jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Bandung, lulus tahun 1982.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sayuti Syamsuar, P. S Priambodo, *Flight Control System Based on Laser Gyro's Technique Applied to Takeoff Phase in Surface Effect Craft (WiSE-craft)*, Proceeding 10 th. International Conference on Quality in Research (QIR), 4-6 th. December 2007, Faculty of Engineering, Engineering Center, University of Indonesia, Depok, 2007.
- [2] Sayuti Syamsuar, P. S Priambodo, *The Speed Schedule Data Monitoring System by using Optical Airspeed and Ring Laser Gyro's Sensory System on WiSE Craft Type C Class*, Sixth Regional Conference on Marine Technology 2008, MARTEC 2008, 26-27 th. August 2008, University of Indonesia, Depok, 2008.
- [3] Prof. Dr. Klaus Dickmann, *Experiment 16 Laser Gyro*, Laserzentrum FH Muenster University of Appl. Sciences, Dept. Engineering Physics, January 2000.
- [4] Eugene Hecht, *OPTICS*, 2 nd. Edition, Addison Wesley Publishing Co., England, 1987.
- [5] *Sagnac Effect*, Answers.com Technology, Wikipedia.
- [6] David H. Titterton, John L. Weston, *Strapdown Inertial Navigation*, 2 nd. Edition, Institution of Electrical Engineers, AIAA, USA, 2004.
- [7] R. Dorobantu, C. Gerlach, *Investigation of a Navigation Grade RLG SIMU type I NAV-RQH*, TU Muenchen, Germany, 2004.
- [8] Dr. James H Sharp, journal *Laser Gyroscopes*.
- [9] Ashwin Arunkumar Seshia, *Integrated Micromechanical Resonant Sensors for Inertial Measurement Systems*, dissertation Doctor of Philosophy in Electrical Berkeley, 1996.

## Riwayat Hidup

Sayuti Syamsuar dilahirkan di Rumbai, Pekanbaru pada tanggal 18 Maret 1956.

