

ANALISIS PENGUKURAN KETIDAKSTABILAN *BIAS* DARI SENSOR GYRO μ FORS-4 SATELIT LAPAN-A2

Hasan Mayditia, Gunawan S. Prabowo

Mechatronics Division, Indonesian Space and Aeronautics Institute, LAPAN

Email: mayditia@lapan.go.id

ABSTRACT

Bias instability (drift or offset) is one of the measurement deviations (error) which must be found in the inertial sensors such as rate-gyro. This error value will be different from one to another, so the direct measurements to each sensor have to be done. The aim of this is to get some units with the best performance. These bias measurements have been done to all six units of the sensor using the earth rotation as reference. Furthermore, four unit sensors have been selected from six to be used in LAPAN-A2 satellite.

Keywords: *Bias drift, Earth rotation, Data resolution, Data Acquisition*

ABSTRAK

Bias instability (drift atau offset) merupakan salah satu jenis deviasi (*error*) pengukuran yang pasti ditemukan di dalam sensor-sensor inersial seperti halnya rate-gyro. Nilai *error* ini berbeda untuk setiap unit sensor, sehingga pengukuran nilai bias untuk masing-masing unit harus dilakukan. Ini dilakukan untuk memperoleh unit-unit sensor dengan performa yang terbaik. Pengukuran nilai *error* bias (*drift*) telah dilakukan pada keenam unit sensor gyro (tipe μ FORS-4) dengan memanfaatkan pergerakan rotasi bumi sebagai nilai referensi. Empat dari enam unit sensor gyro telah dipilih untuk selanjutnya digunakan dan diterbangkan pada satelit LAPAN-A2.

Kata Kunci : *Bias drift, Rotasi bumi, Resolusi data, Akuisisi data*

1 PENDAHULUAN

Bias instability merupakan fluktuasi nilai pengukuran kecepatan sudut yang terjadi pada temperatur konstan ketika sensor gyro dalam keadaan tidak berotasi ($a = 0$) atau berotasi dengan kecepatan konstan ($\omega = \text{konstan}$) yang diketahui. Bias pada pengukuran ini sering juga disebut *bias drift* atau *bias offset*.

Nilai *error bias* berbeda untuk setiap unit sensor. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

- *error* pada kalibrasi;
- variasi bias terhadap temperatur;
- *switch-on to switch-on*;
- *mechanical miss-alignment*.

Penentuan *error* bias tidak dapat dilakukan dengan data yang diambil dalam waktu singkat (< 1 menit) oleh

karena data tersebut akan sangat dipengaruhi oleh *error random walk*.

Random walk dapat didefinisikan sebagai nilai standar deviasi dan output kenaikan sudut $\sigma \sqrt{t}$ fungsi dari periode pengukuran. Sehingga, *error* bias merupakan sifat terakumulasi dari data pengukuran sensor, dan tidak diketahui jika hanya dengan data tunggal.

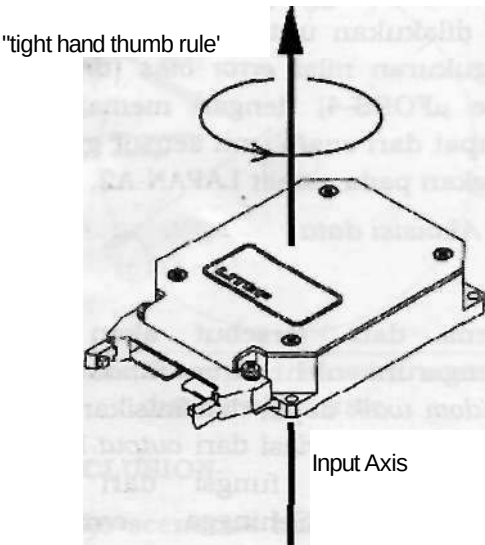
Untuk dapat mengukur nilai bias, data dalam selang waktu Δt panjang harus dilakukan, dan dibandingkan dengan data referensi yang telah diketahui. Ketika waktu akuisisi ditingkatkan, maka nilai pengukuran bias yang lebih baik akan diperoleh.

2 DASAR TEORI DAN μ FORS-4

Gyro μ FORS-4 merupakan sensor gyro satu sumbu (Gambar 2-1) dengan

kontruksi lilitan serat optik sebagai medium pendeteksi kecepatan sudut.

Sensor ini bekerja dengan prinsip efek *Sagnac*, dimana cahaya koheren (laser) dibagi menjadi dua dengan menggunakan *beam splitter* sehingga merambat berlawanan arah pada lilitan serat optik. Ketika sensor mengalami gerak rotasi pada sumbu sensitifnya, setengah bagian dari cahaya yang terbagi tersebut akan merambat lebih jauh dari setengah bagian lainnya relatif terhadap pengamat di luar lilitan serat optik. Kedua cahaya tersebut akan ditangkap oleh sebuah foto-detektor, kemudian dilakukan pengukuran terhadap perbedaan fasa di antara kedua cahaya koheren tersebut. Beda fasa yang terukur akan sebanding dengan kecepatan rotasi yang dialami oleh sistem lilitan itu.



Gambar2-1: Nilai *output* kecepatan sudut positif pada sumbu rotasi u-FORS-4

Konfigurasi format data dan resolusi pengukuran dari gyro u.FORS-4 dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Adapun konfigurasi nFORS-4 yang digunakan dalam LAPAN-A2 adalah sama seperti pada LAPAN-TUBSAT, antara lain:

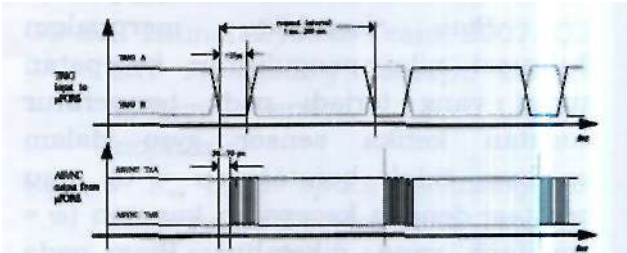
• **Mode Angle Increment:**

HFORS-4 akan memberikan data perubahan sudut untuk setiap data yang diminta

- **Interface komunikasi:**
Asynchkronous RS422, baud-rate 76800 bps, Odd parity, 1 bit-stop, dan Hardware Trigger untuk request data
- **Resolusi data:** 16 bit (2 Byte)
- **Rentang pengukuran:** $\pm 8^\circ$
- **Resolusi pengukuran** (dari poin 2 dan 3): $16^\circ / 65536 = 0.000244^\circ/\text{bit}$

Dari keterangan di atas, diperoleh bahwa nFORS-4 ini memiliki *interface asynchronous* yang beroperasi dalam mode *Hardware Trigger*. Dalam hal ini, pengguna (*host system*), harus memberikan dua sinyal diskrit, TRIG A dan TRIG B, untuk inisialisasi transfer data pada *interface asynchronous*, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-2.

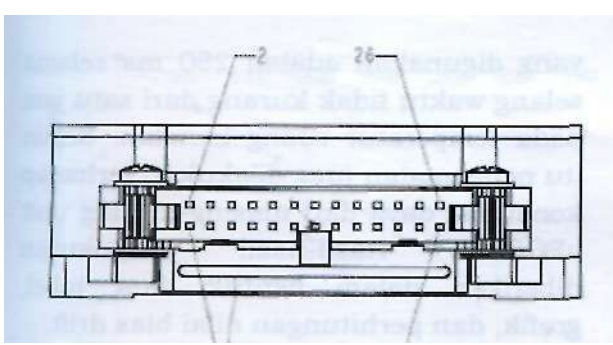
Transfer dari blok data akan dimulai setelah 30 s.d 70 us setelah batas tepi turun (*falling edge*) dari sinyal trigger (TRIG A) pada saat ^FORS-4 beroperasi, *system host* harus menjaga line data *receive* dari *interface* asinkronous (ASYNC RxA, ASYNC RxB) pada kondisi logika "1" atau kondisi impedansi tinggi. Line transmit harus tetap dalam logika "1" (ASYNC TxA = high terhadap ASYNC TxB) setelah transmisi data request diberikan. Interface koneksi dari nFORS-4 diberikan dalam Tabel 2-1.



Gambar 2-2: Timing diagram untuk Mode Hardware Trigger

Tabel 2-1: INTERFACE KONEKSI DARI μ FORS-4 DALAM MODE HARWARE TRIGGER

Gyro	Pin No.	Function	Description	Input/Output
uFORS-36, -40, -41, -42	1	+ 5 V	Supply voltage	input
	3	GND	Supply ground	-
	25	RESET ¹	External reset	input
	15	ASYNC TxA	Transmit data	output
	2	ASYNC TxB	Transmit data	output
	6	TRIG A	Trigger signal, positive	input
	8	TRIG B	Trigger signal, negative	input
	7	GND	Signal ground	-



Gambar 2-3: Lokasi pin-pin dari iFORS-4

Struktur data dan perhitungan nilai sudut hasil pengukuran bergantung pada resolusi bit data yang dipilih. Dalam hal ini resolusi data yang dipilih adalah 16 bit (2 byte), maka data yang akan dikirim oleh iFORS sebanyak 4 byte, antara lain, dua byte data sudut, satu byte status, dan satu byte *checksum* seperti ditunjukkan dalam Gambar 2-4.

Four-Byte Block				
Byte No.	1	2	3	4
Content	Most significant byte (Data)	Least significant byte (Data)	Status Byte	Checksum Byte

Gambar 2-4: Struktur dari Byte data

3 PENGUKURAN NILAI BIAS MENGGUNAKAN ROTASI BUMI

iFORS-4 memiliki sensitivitas pengukuran kecepatan sudut yang sangat tinggi. Dalam hal ini, dengan resolusi 16 bit dan rentang pengukuran $\pm 8^\circ$ diperoleh nilai perubahan sudut minimum yang mampu diukur adalah 0.000244° . Kuantisasi dari pembacaan data sudut untuk tiap detiknya adalah $(2.44 \times 10^{-4})^\circ$, sehingga kuantisasi pengukuran kecepatan sudut yang dapat diukur adalah

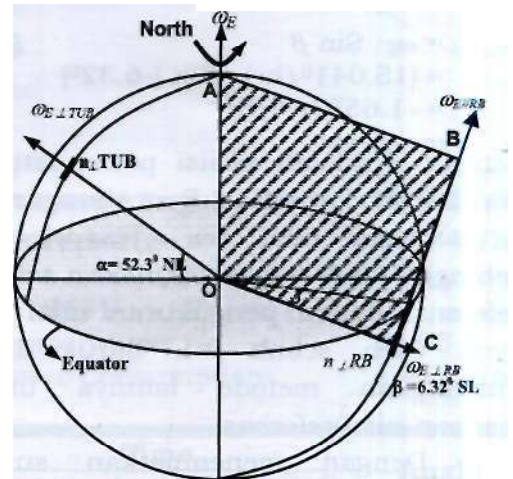
$$\%_{mm} = (9.76 \times 10^{-4})^0/s \ ((3.5136)^\circ/jam) \quad (3-1)$$

pada sampling rate 4 Hz (250 ms). Sehingga sensor ini dapat digunakan pula untuk mengukur kecepatan rotasi dari bumi pada posisi tertentu.

Pada Gambar 3-1 diberikan ilustrasi dari rotasi bumi pada sumbu putarnya (*COB*). Periode waktu yang dibutuhkan untuk satu rotasi penuh didefinisikan sebagai satu hari atau

sekitar 23 jam : 56 Menit : 4.1 detik atau 86164.1s, sehingga nilai kecepatan sudutnya adalah

$$COB = 360^\circ/86164.1 = 0.0042^\circ/s \\ = 15.041^\circ/jam \quad (3-2)$$



Gambar 3-1: Ilustrasi dari rotasi bumi dan beberapa proyeksi di beberapa lokasi di permukaan bumi

Untuk kecepatan rotasi di beberapa lokasi dan orientasi di permukaan bumi, dapat diperoleh dengan mencari komponen vektor (tangensial) dari kecepatan sudut yang bersesuaian dengan arah vektor rotasi bumi. Besar vektor tersebut bergantung dari posisi di permukaan bumi atau bergantung langsung pada posisi latitudenya. Sebagai contoh, untuk proyeksi vektor *COB* pada posisi normal terhadap Universitas Teknik Berlin (TU-Berlin/ $\phi > \phi_{Ein/B}$), dapat dituliskan

$$COEITVB = COB \cdot \sin a \\ = (15.041^\circ/hr) \cdot \sin 52.3^\circ \\ = 11.9^\circ/hr \quad (3-3)$$

dengan a adalah posisi latitude dari TU-Berlin.

Nilai *COBITUB* ini dapat dijadikan nilai referensi dan akan terukur oleh iFORS-4 sebagai nilai kecepatan sudut dengan menempatkan sensor di permukaan normal terhadap bumi sehingga sumbu rotasi sensor berhimpit dengan sumbu normal bumi seperti ditunjukkan dalam Gambar 3-1. Nilai ini dapat dikatakan sesuai untuk pengukuran p.FORS-4, oleh karena nilai *COBITUB* masih jauh lebih besar dibanding dengan nilai

kuantisasi minimum kecepatan sudut yang dapat diukur oleh μ FORS-4.

Dengan cara yang sama, nilai referensi ini pun dapat diperoleh di LAB Mekatronika, Rancabungur normal terhadap permukaan bumi

$$\begin{aligned}\omega_{E/RB} &= \omega_E \cdot \sin \beta \\ &= (15.041^\circ/\text{hr}) \cdot \sin (-6.32^\circ) \\ &= -1.65574^\circ/\text{hr}\end{aligned}\tag{3-4}$$

kuantisasi minimum kecepatan sudut yang dapat diukur oleh nFORS-4.

Dengan cara yang sama, nilai referensi ini pun dapat diperoleh di LAB Mekatronika, Rancabungur normal terhadap permukaan bumi

$$\begin{aligned}(\omega_{E/RB} = G > E \cdot \sin \beta) \\ &= (15.041^\circ/\text{hr}) \cdot \sin (-6.32^\circ) \\ &= -1.65574^\circ/\text{hr}\end{aligned}\tag{3-4}$$

dengan β adalah posisi latitude dari LAB Mekatronika, Rancabungur.

Besar nilai $|\omega_{E/RB}| < |\omega_{gmm}|$ sehingga tidak dapat digunakan sebagai referensi dalam pengukuran nilai bias gyro. Oleh sebab itu, harus diper-timbangkan metode lainnya untuk mencari nilai referensi.

Dengan menempatkan sumbu gyro normal terhadap permukaan bumi, yang merupakan cara paling mudah, dengan asumsi bahwa permukaan normal yang digunakan untuk menempatkan gyro telah diukur dengan baik sehingga

vektor normalnya berhimpit dengan vektor normal permukaan bumi. Selain itu, metode lainnya adalah dengan memposisikan sumbu rotasi gyro parallel terhadap sumbu rotasi bumi. Namun

$\omega_{E/RB}$ dapat didefinisikan sebagai besar oleh karena posisi Rancabungur, Bogor vektor kecepatan rotasi bumi tegak lurus tidak tepat tegak lurus dengan sumbu vektor normal bumi pada arah utara. rotasi bumi, maka perlu diperhitungkan Nilai ini digunakan sebagai nilai komponen proyeksi $\omega_{E/RB}$ referensi pada pengukuran nilai bias dari uFORS-4.

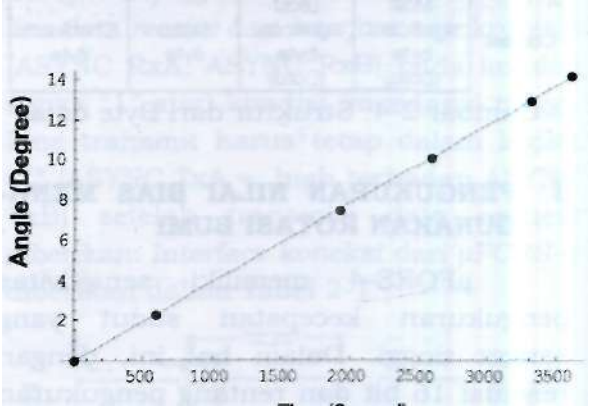
4 HASIL DAN ANALISIS

Pengukuran nilai *bias drift* dengan menggunakan referensi rotasi bumi telah dilakukan terhadap keenam unit gyro nFORS-4. Pengetesan dilakukan pada masing-masing unit untuk sumbu rotasi positif dan negatif. Sampling rate

yang digunakan adalah 250 ms selama selang waktu tidak kurang dari satu jam pada temperatur ruang konstan. Selain itu pengamatan juga dilakukan terhadap konsumsi daya dari masing-masing unit μ FORS-4. Hasil-hasil pengukuran diberikan dalam bentuk data tabel, grafik, dan perhitungan nilai bias drift.

SN: 2519 (Rotasi Positif)
Temperature: 26 °C
Power Consumption: 1.435 Watt

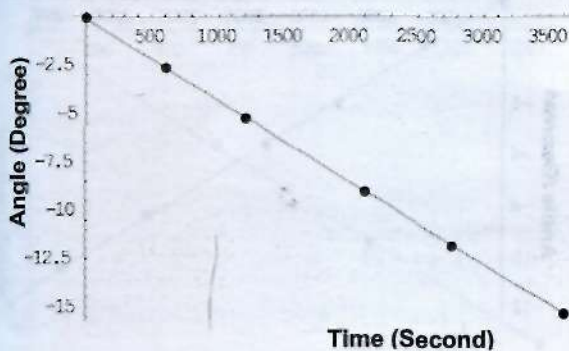
Time		Angle
Actual	Second	
11:22:00	0	0
11:32:00	600	2.296943
11:54:00	1920	7.467376
12:05:00	2580	10.065020
12:17:00	3300	12.934010
12:22:00	3600	14.125080



Measured Angular Rate: 14.098°/hr
Bias error: - 0.852°/hr

SN: 2519 (Rotasi Negatif)
Temperature: 26 °C
Power Consumption: 1.435 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
12:23:00	0	0
12:33:00	600	-2.602900
12:43:00	1200	-5.136340
12:58:00	2100	-9.024920
13:09:00	2760	-11.793900
13:23:00	3600	-15.335900



Measured Angular Rate: $-15.368^{\circ}/\text{hr}$

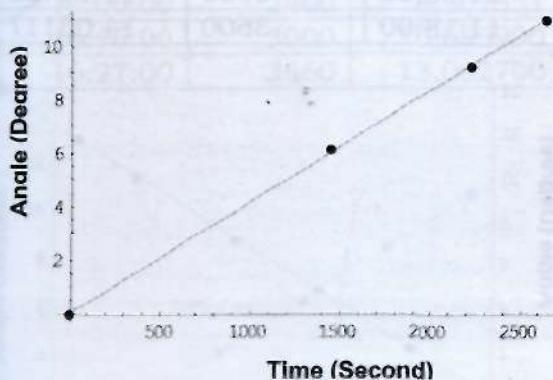
Bias error: $-0.418^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2572 (Rotasi Positif)

Temperature: 26°C

Power Consumption: 1.410 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
14:14:00	0	0
14:38:00	1440	6.146285
14:51:00	2220	9.298303
14:58:00	2640	10.978400



Measured Angular Rate: $14.038^{\circ}/\text{hr}$

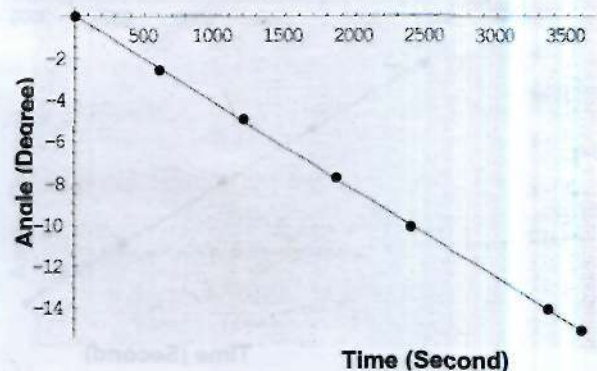
Bias error: $-0.088^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2572 (Rotasi Negatif)

Temperature: 26°C

Power Consumption: 1.410 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
9:44:00	0	0
9:54:00	600	-2.498507
10:04:00	1200	-4.889550
10:15:00	1860	-7.662578
10:24:00	2400	-9.992373
10:40:00	3360	-14.003410
10:44:00	3600	-15.002860



Measured Angular Rate: $-14.984^{\circ}/\text{hr}$

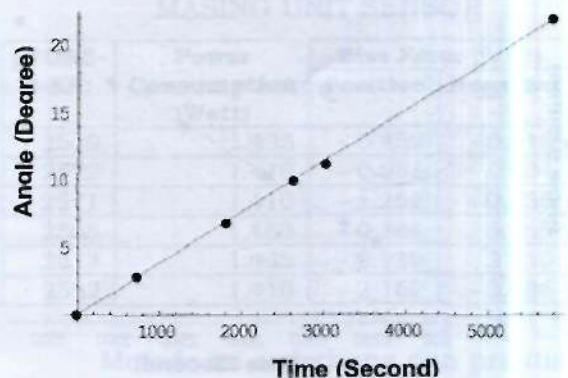
Bias error: $-0.034^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2571 (Rotasi Positif)

Temperature: 26°C

Power Consumption: 1.410 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
10:59:00	0	0
11:11:00	720	2.828614
11:29:00	1800	6.869369
11:43:00	2640	9.951252
11:49:00	3000	11.26684
12:35:00	5760	21.99406



Measured Angular Rate: $13.688^{\circ}/\text{hr}$

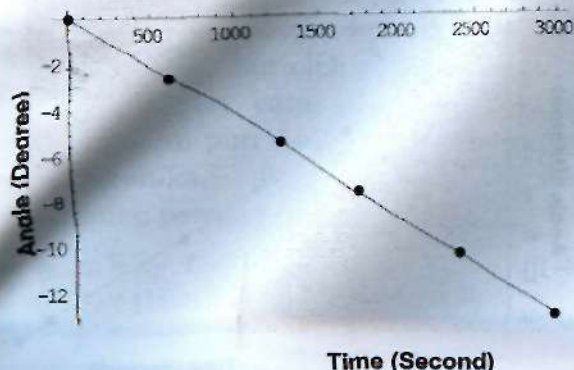
Bias error: $-1.262^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2571 (Rotasi Negatif)

Temperature: 26°C

Power Consumption: 1.410 Watt

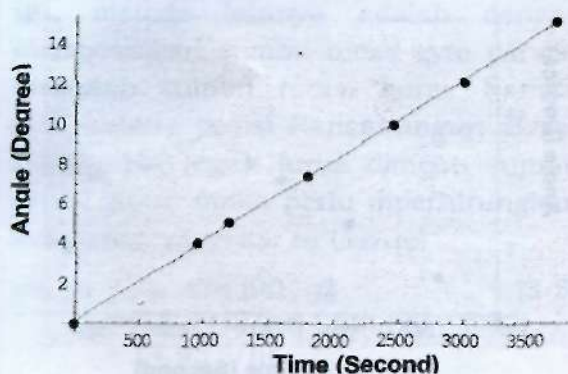
Time		Angle
Actual	Second	
12:37:00	0	0
12:47:00	600	-2.569989
12:58:00	1260	-5.398465
13:07:00	1800	-7.667677
13:17:00	2400	-10.31527
13:27:00	3000	-12.97111



Measured Angular Rate: $15.506^{\circ}/\text{hr}$
Bias error: $0.556^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2568 (Rotasi Positif)
 Temperature: 26°C
 Power Consumption: 1.460 Watt

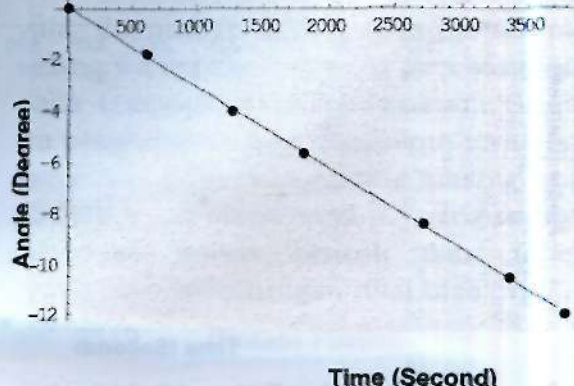
Time		Angle
Actual	Second	
14:00:00	0	0
14:16:00	960	4.071231
14:20:00	1200	5.043462
14:30:00	1800	7.393421
14:41:00	2460	9.966603
14:50:00	3000	12.08817
15:02:00	3720	15.09186



Measured Angular Rate: $14.586^{\circ}/\text{hr}$
Bias error: $-0.364^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2568 (Rotasi Negatif)
 Temperature: 26°C
 Power Consumption: 1.460 Watt

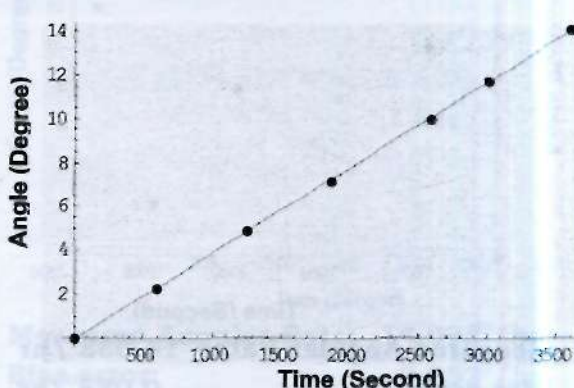
Time		Angle
Actual	Second	
15:04:00	0	0
15:14:00	600	-1.77458
15:25:00	1260	-3.968013
15:34:00	1800	-5.605058
15:49:00	2700	-8.412869
16:00:00	3360	-10.50442
16:07:00	3780	-11.90295



Measured Angular Rate: $-11.285^{\circ}/\text{hr}$
Bias error: $3.665^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2513 (Rotasi Positif)
 Temperature: 26°C
 Power Consumption: 1.435 Watt

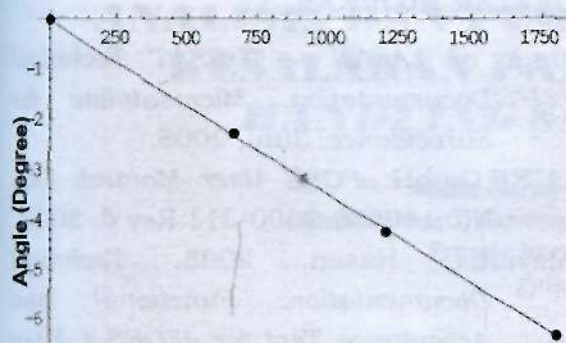
Time		Angle
Actual	Second	
10:18:00	0	0
10:28:00	600	2.286954
10:39:00	1260	4.8424
10:49:00	1860	7.161585
11:01:00	2580	9.99889
11:08:00	3000	11.71426
11:18:00	3600	14.03117



Measured Angular Rate: $14.011^{\circ}/\text{hr}$
Bias error: $-0.939^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2513 (Rotasi Negatif)
 Temperature: 26°C
 Power Consumption: 1.435 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
16:32:00	0	0
16:43:00	660	-2.297931
16:52:00	1200	-4.268816
17:02:00	1800	-6.294259



Time (Second)

Measured Angular Rate: $-12.640^{\circ}/\text{hr}$

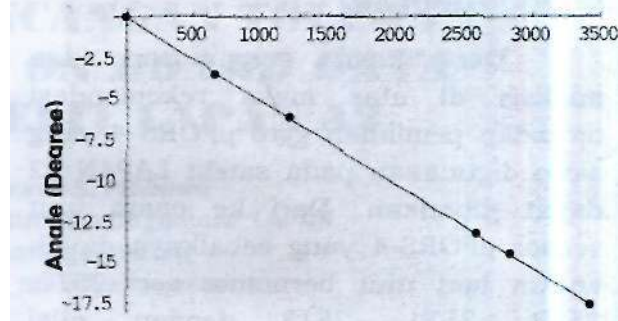
Bias error: $2.310^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2582 (Rotasi Positif)

Temperature: 26°C

Power Consumption: 1.410 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
15:26:00	0	0
15:39:00	780	2.724894
15:46:00	1200	4.211470
15:56:00	1800	6.344944
16:06:00	2400	8.507351
16:16:00	3000	10.685900
16:27:00	3660	13.002700



Time (Second)

Measured Angular Rate: $-18.538^{\circ}/\text{hr}$

Bias error: $-3.588^{\circ}/\text{hr}$

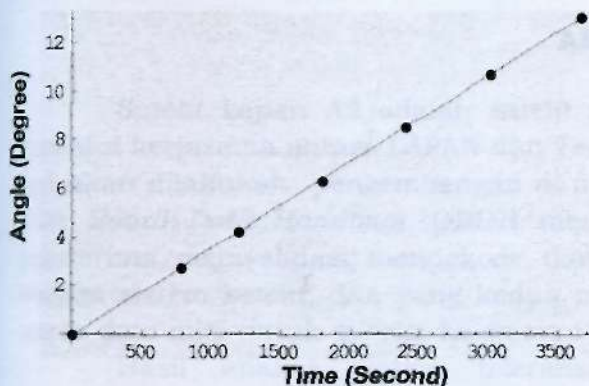
Dari data hasil pengukuran tersebut, diperoleh grafik linier dan fungsi hasil interpolasi yang bersesuaian. Dari grafik dan fungsi tersebut diperoleh nilai kecepatan sudut hasil pengukuran yang selanjutnya dibandingkan dengan nilai referensi dari perhitungan rotasi bumi. Dari hasil fungsi interpolasi, diperoleh nilai-nilai ketidakstabilan bias seperti diberikan pada Tabel 4-1.

Tabel4-1: DATA HASIL PENGUKURAN NILAI BIAS DRIFT MASING-MASING UNIT SENSOR

P.FORS-4-SN:	Power Consumption (Watt)	Bias Error ($^{\circ}/\text{hr}$)	
		Positive	Negative
2519	1.435	- 0.852	-0.418
2572	1.410	- 0.088	- 0.034
2571	1.410	- 1.262	- 0.556
2568	1.460	- 0.364	3.665
2513	1.435	- 0.939	2.310
2582	1.410	-2.162	- 3.588

Metode ini sederhana dan praktis, namun tetap memperhatikan keakuratan dalam pengukuran untuk menentukan nilai *error* bias sensor jiFORS-4. Rotasi bumi yang diambil sebagai referensi, memberikan keuntungan dalam hal stabilitas kecepatan rotasi setiap saat, dimana perhitungan terhadap nilai eksaknya menjadi faktor penentu utama terhadap kesesuaian nilai yang diperoleh.

Dari Tabel 4-1 di atas dapat dilihat bahwa ke enam unit nFORS-4 telah memenuhi persyaratan yang diberikan oleh vendor, yaitu dengan toleransi konsumsi daya (1.1 - 2.36) Watt dan toleransi pada nilai bias drift (-6.0 - 6.0) $^{\circ}/\text{Jam}$.



Measured Angular Rate: $12.789^{\circ}/\text{hr}$

Bias error: $- 2.162^{\circ}/\text{hr}$

SN: 2582 (Rotasi Negatif)

Temperature: 26°C

Power Consumption: 1.410 Watt

Time		Angle
Actual	Second	
14:28:00	0	0
14:39:00	660	-3.454907
14:48:00	1200	-6.209113
15:11:00	2580	-13.299610
15:15:00	2820	-14.505850
15:25:00	3420	-17.616150

5 KESIMPULAN

Dari hasil pengukuran dan analisis di atas maka rekomendasi terhadap pemilihan gyro nFORS-4 yang akan digunakan pada satelit LAPAN-A2 dapat diberikan. Dari ke enam unit sensor (iFORS-4 yang sebaiknya dipilih antara lain unit bernomor seri 2572, 2519, 2571, 2513 dengan nilai ketidakstabilan bias terkecil.

DAFTAR RUJUKAN

- Draft of LAPAN - TUBSAT Technical Documentation, Microsatellite for Surveillance.* Juni, 2005.
- LITEF GmbH: *jxFORS User Manual*, Doc No. 140650-2000-311 Rev d. 2007.
- Mayditia, Hasan, 2008. *Technical Documentation: Functional and Acceptance Test for nFORS-4 Fiber Optic Gyro*, Doc No. LFORS-04-TD-D01.