

Kaji Teoritis dan Eksperimental Efek Giroskopik pada Sistem Getaran Rotor Menjulur Kasus Putaran Kritis

Alexander Tompodung¹ dan Indra Nurhadi²

¹Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado

E-mail: alexander_tompodung@yahoo.com

²Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung

Abstrak

Efek giroskopik atau Coriolis pada sistem rotor menjulur atau overhang rotor adalah bagian yang penting untuk diperhitungkan pada kecepatan putar kritis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek giroskopik pada rotor menjulur terhadap frekuensi pribadi, kecepatan putar kritis dan tanggapan getaran. Dalam pelaksanaannya penelitian ini dibagi dua bagian, pertama perhitungan secara teoritis memakai metode elemen hingga dan kedua dengan metode eksperimental. Penelitian ini menggunakan poros diameter 8,0 mm, piringan berdiameter 121,0 mm dan tebal 16,0 mm dan dengan tiga model juluran yakni 31,0, 53,0 dan 87,0 mm. Pengukuran putaran kritis dilakukan dengan membuat peta spektrum dengan rentang putaran yang mencakup putaran kritis.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa frekuensi pribadi statis hasil teoritis ternyata tidak berbeda jauh dengan frekuensi pribadi statis hasil pengukuran fungsi tanggapan frekuensi. Selisih hasil teoritis dan pengukuran, untuk juluran 31,0 mm adalah 8,5 Hz atau 9,4% dan juluran 53,0 mm adalah 1,75 Hz atau 3,18%.

Hasil pengukuran menunjukkan kecenderungan yang tidak sesuai dengan pertambahan panjang juluran. Hal ini karena defleksi yang terlalu besar ketika putaran mendekati putaran kritis sehingga hasilnya tidak dapat dipertanggungjawabkan.

Kata kunci: efek giroskopik, rotor menjulur, kecepatan putar kritis, peta spektrum.

Abstract

The gyroscopic effect or Coriolis on overhung rotors is an important aspect to be computed in critical speed calculation. This research is aimed to find out the effect of gyroscopic in the overhung rotor base on natural frequency, critical speed and rotor respon. The research had been carried out in two ways; first, it was carried out using theoretical calculation with finite element method and the second by experiment. In this research a 8,0 mm diameter shaft, with 121,0 mm diameter and 16,0 mm thick of disc was used; and had been performed in three overhung models; 31,0, 53,0, and 87,0 mm. Measurement of critical speed have been done by making spectral map with speed range that covers critical speed.

From results of this research, it can be seen that static natural frequency resulted from the calculation does not differ significantly with that measured from frequency respon function. The difference between theoretical and measurement results for the overhung 31,0 mm is 8,5 Hz or 9,4% and overhung 53,0 mm is 1,75 Hz or 3,18%.

The results of measurement show that the critical speed does not in accordance with variation of the length of overhung because the deflection is too large when the speed approaching critical speed so the results is not acceptable.

Keywords: gyroscopic effect, overhung rotor, critical speed, spectral map.

1. Pendahuluan

Rotor menjulur atau *overhung rotor* merupakan komponen mesin yang banyak digunakan pada industri sebagai pemindah daya atau putaran. Secara umum sistem rotor menjulur sederhana terdiri dari sebuah poros, dua buah bantalan dan sebuah piringan atau roda yang terpasang pada salah satu ujung poros.

Saat beroperasi, rotor menjulur akan berputar dan berinteraksi dengan struktur sehingga menghasilkan getaran. Pada saat frekuensi putaran sama dengan frekuensi pribadi struktur maka akan terjadi amplitudo getaran yang besar yang dapat mengakibatkan kerusakan. Keadaan ini dikenal dengan resonansi atau putaran kritis. Oleh karena itu perlu untuk diketahui tentang keadaan resonansi atau keadaan kritis tersebut khususnya untuk sistem rotor menjulur agar dapat terhindar dari kerusakan.

Tujuan kajian ini adalah untuk mengetahui pengaruh giroskopik terhadap perilaku dinamik sistem rotor menjulur terutama terhadap putaran kritis. Kajian ini meliputi pemodelan dan perhitungan rotor menjulur dengan metode elemen hingga dan dilanjutkan dengan kajian eksperimental.

2. Dinamika dan Efek Giroskopik Piringan

Secara umum urutan pemodelan dinamika sistem rotor dapat dituliskan sebagai berikut (Lalanne 1990, Dewanto W 1993, Irwanto, et al ..., Kato, et all 1992, Widodo A 2002 dan Santika IKJ 2000):

- 1) Menyusun energi kinetis (T), energi regangan (U) dan kerja semu gaya-gaya luar.
- 2) Menerapkan persamaan energi pada persamaan Lagrange dalam bentuk:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = F_{q_i} \quad (1)$$

dimana i ($1 \leq i \leq N$) adalah jumlah derajat kebebasan, q_i adalah koordinat umum yang independent, F_{q_i} adalah gaya-gaya luar yang digeneralisasi, T adalah energi kinetis dan U adalah energi regangan.

Model elemen piringan ditunjukkan pada Gambar 1. Model ini dibentuk dengan menganggap:

- o piringan adalah kaku sehingga karakteristiknya hanya dipengaruhi oleh energi kinetis saja
- o $Ro(X, Y, Z)$ dan $Ro(x, y, z)$ adalah koordinat referensi dan koordinat piringan
- o koordinat sistem x, y, z dihubungkan ke koordinat sistem X, Y, Z melalui sudut ψ, θ dan ϕ
- o untuk sampai pada orientasi akhir piringan, maka mula-mula piringan diputar sebesar ψ terhadap sumbu Z , kemudian sebesar θ terhadap sumbu X dan kemudian sebesar ϕ terhadap sumbu y
- o R adalah radius dan h adalah tebal piringan.

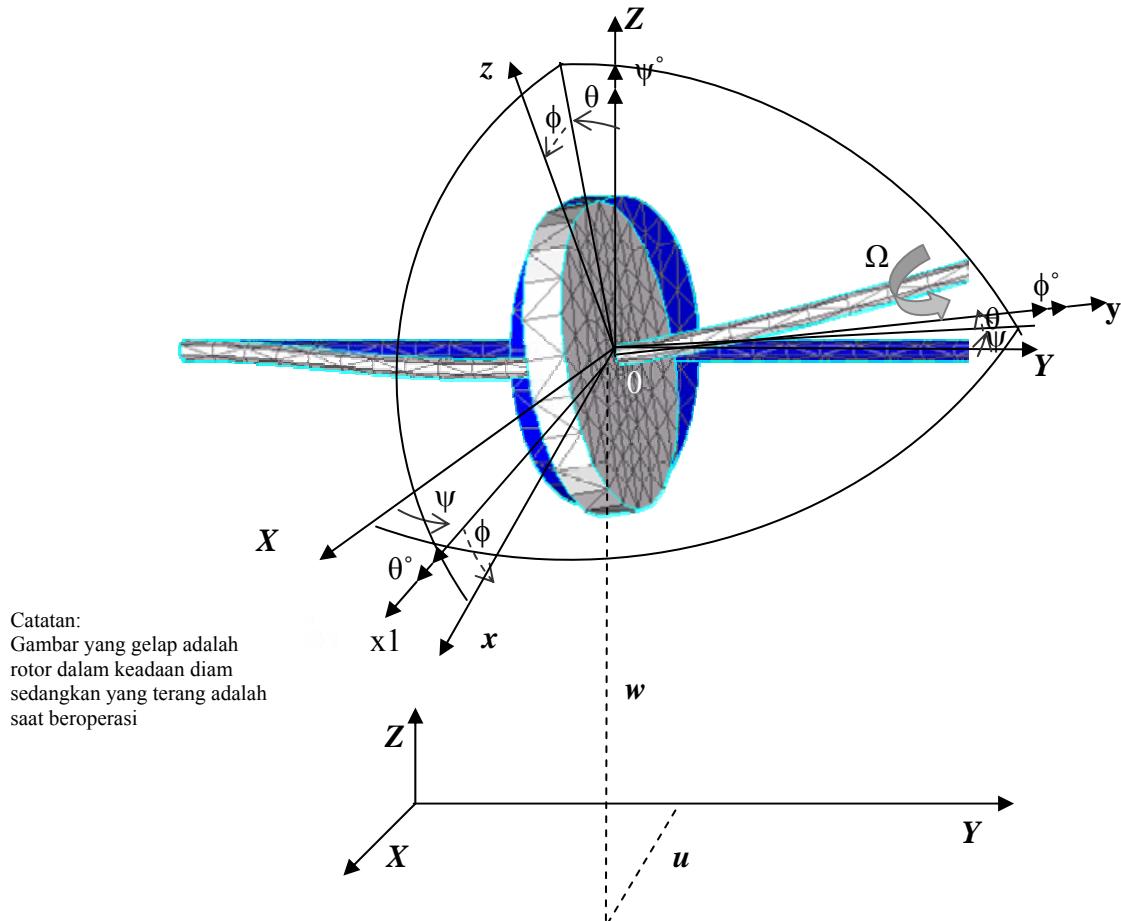
maka energi kinetis piringan dapat dituliskan:

$$T_D = \frac{1}{2} M_D (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) + \frac{1}{2} (I_{Dx} \omega_x^2 + I_{Dy} \omega_y^2 + I_{Dz} \omega_z^2) \quad (2)$$

dimana vektor kecepatan sudut sesaat adalah $\omega_x = -\dot{\Psi} \cos \theta \sin \phi + \dot{\theta} \cos \phi \quad \omega_y = \dot{\phi} + \dot{\Psi} \sin \theta \quad \omega_z = \dot{\Psi} \cos \theta \cos \phi + \dot{\theta} \cos \phi$ dan I_{Dx}, I_{Dy}, I_{Dz} adalah momen inersia massa piringan terhadap sumbu xyz . Untuk piringan simetri, $I_{Dx} = I_{Dz}$, sudut θ dan ψ diasumsikan kecil pada kecepatan putar konstan ($\dot{\phi} = \Omega$). Sehingga persamaan (2) dapat dituliskan:

$$T_D = \frac{1}{2} M_D (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) + \frac{1}{2} I_{Dx} (\dot{\theta}^2 + \dot{\Psi}^2) + \frac{1}{2} I_{Dy} (\Omega^2 + 2\Omega \dot{\Psi} \theta) \quad (3)$$

catatan: $\frac{1}{2} I_{Dy} \Omega^2$ adalah konstan atau bukan fungsi perpindahan, yang menunjukkan energi rotasi dari piringan pada kecepatan putar Ω dengan simpangan-simpangan lain sama dengan nol. $I_{Dy} \Omega \dot{\Psi} \theta$, menunjukkan efek giroskopik atau Coriolis.



Gambar 1 Sistem koordinat piringan pada poros fleksibel.

Penerapan persamaan Lagrange terhadap persamaan energi kinetis piringan (Lalanne 1990, Dewanto W 1993, Irwanto, et al ..., Widodo A 2002 dan Santika IKJ 2000) diperoleh:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\delta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \delta} = \begin{bmatrix} M_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{Dx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{Dx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{Dy} \\ 0 & 0 & I_{Dy} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

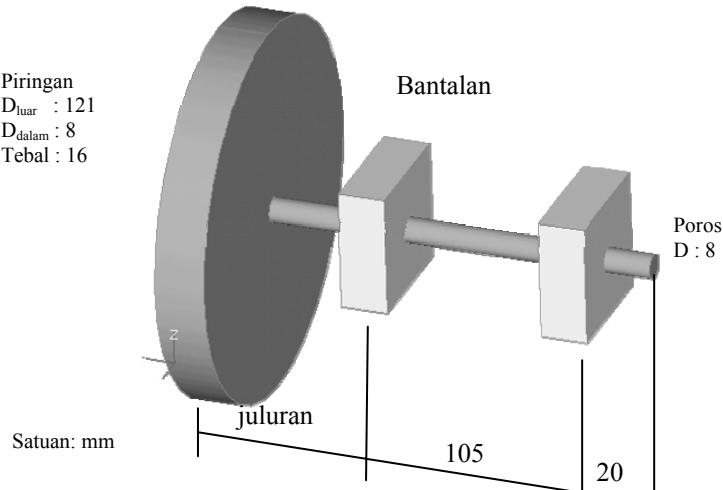
Vektor perpindahan nodal pusat piringan: $\delta = [u, w, \theta, \psi]^t$

Catatan, matriks 4×4 yang pertama adalah matriks massa dan kedua adalah matriks efek giroskopik atau Coriolis.

Solusi Persamaan Gerak. Metode *pseudo modal* (Lalanne 1990) digunakan untuk penyelesaian persamaan gerak karena memiliki keuntungan dalam reduksi waktu dan memori saat perhitungan numerik.

3. Studi Kasus Rotor Menjulur

Berdasarkan data-data pada Gambar 2, selanjutnya dirancang perhitungan sistem rotor menjulur dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dipilih panjang juluran 31,0, 53,0 dan 87,0 mm dan data perhitungan lainnya sama. Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2 Model rotor menjulur

4. Kaji Eksperimental

Kaji eksperimental sistem rotor menjulur dengan efek giroskopik meliputi pertama, pengukuran spektrum saat beroperasi (*spectral map*). Kedua, pengujian fungsi tanggapan frekuensi (*FRF*) akibat pukulan. Pengujian *FRF* dimaksudkan untuk mendapatkan frekuensi pribadi sistem rotor keadaan terpasang statis.

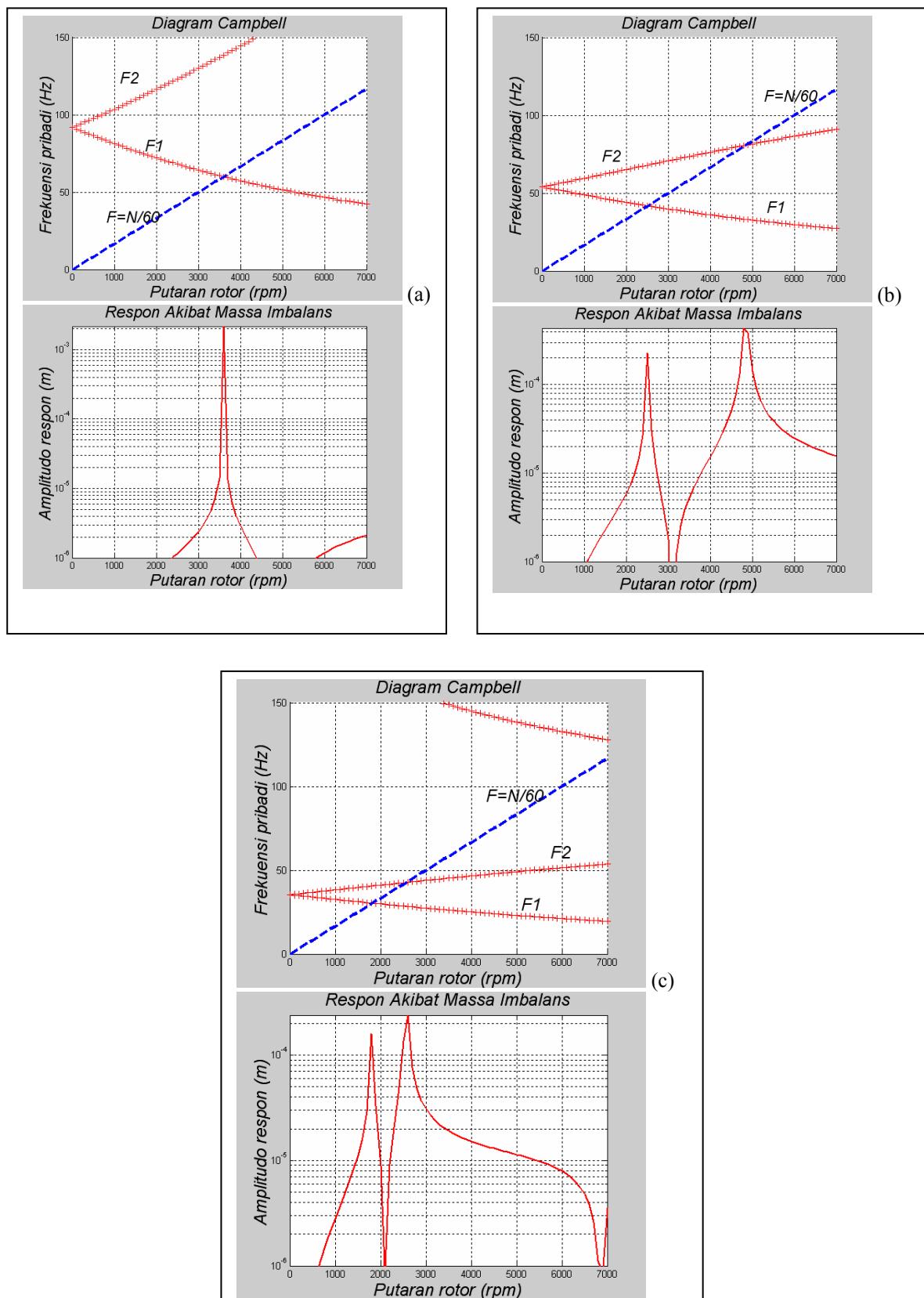
Sebelum eksperimen dilakukan, terlebih dahulu dibuat alat uji model rotor menjulur dimana data alat berdasarkan data kaji teoritis (Gambar 4 dan 5). Alat ini memiliki diameter piringan 121 mm, tebal 16 mm dan dengan diameter poros 8 mm, terbuat dari bahan baja. Alat uji ini menggunakan bantalan jenis bola (*deep groove ball bearing*) SKF #608, diameter lubang 8 mm dan diameter luar 22 mm.

Perangkat pengukuran terdiri dari accelerometer, *charge amplifier* (dari Brüel and Kjaer) dan pengolah data *multi channel spectrum analyzer* (MSA) HP3562A. Setting dan parameter pengukuran mengacu pada hasil kaji teoritis. Pengujian ini dilakukan di Lab Dinamika Pusat Rekayasa Industri ITB dengan susunan kedua jenis pengukuran diperlihatkan pada Gambar 6 dan 7.

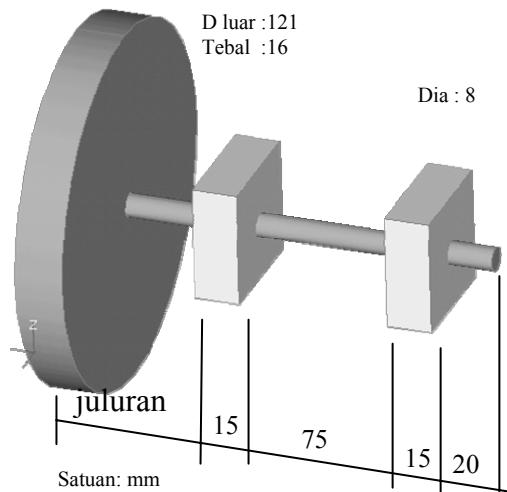
Hasil pengukuran *FRF* untuk juluran 31 mm diberikan pada Gambar 8 dan 9 dan pengukuran peta spektrum ditunjukkan pada Gambar 10.

5. Perbandingan Kajian Teoritis dan Eksperimental

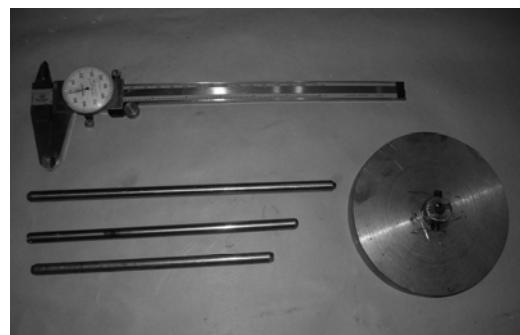
Berdasarkan diagram Campbell kaji teoritis untuk ketiga juluran maka diperoleh frekuensi pribadi statis f_{no} dan kecepatan putar kritis n_c terendah (Gambar 3 dan Tabel I dan II). Sedangkan untuk kaji eksperimental diperoleh frekuensi pribadi statis f_{no} dan kecepatan putar kritis n_c terendah (Gambar 11, Tabel III dan IV). Berikut ini adalah kajianya:



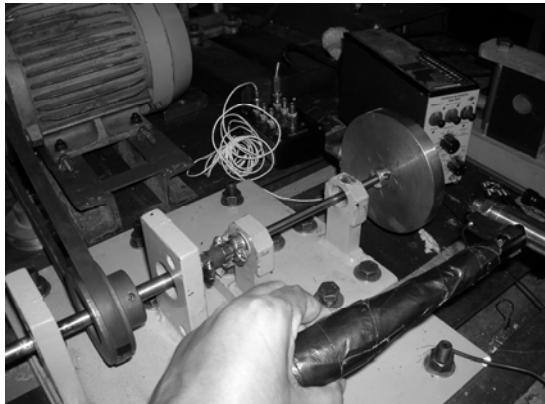
Gambar 3. Diagram Campbell dan tanggapan massa tak seimbang:
 (a) juluran 31mm, (b) juluran 53 mm dan (c) juluran 87 mm dengan efek giroskopik.



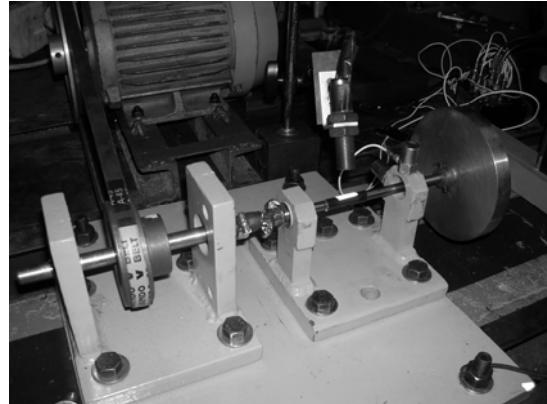
Gambar 4. Konstruksi rotor menjulur.



Gambar 5. Bentuk poros dan piringan.



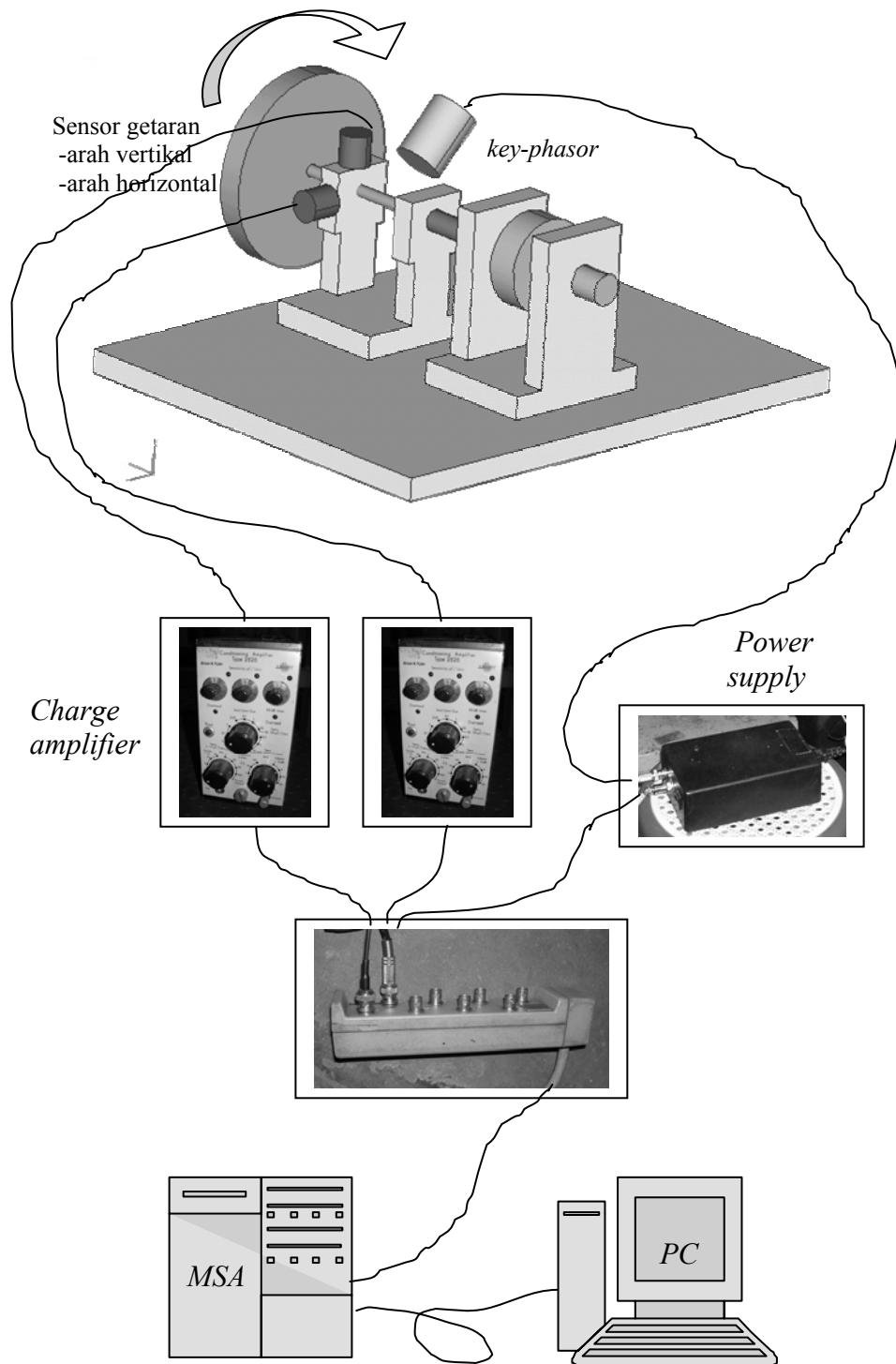
(a)



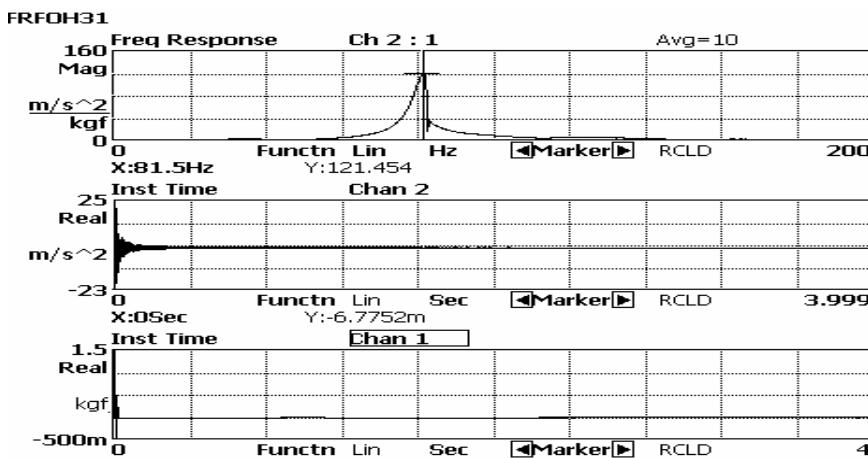
(b)

Gambar 6. Photo suasana pengukuran:
(a) pengukuran *FRF* dan (b) pengukuran peta spektrum.

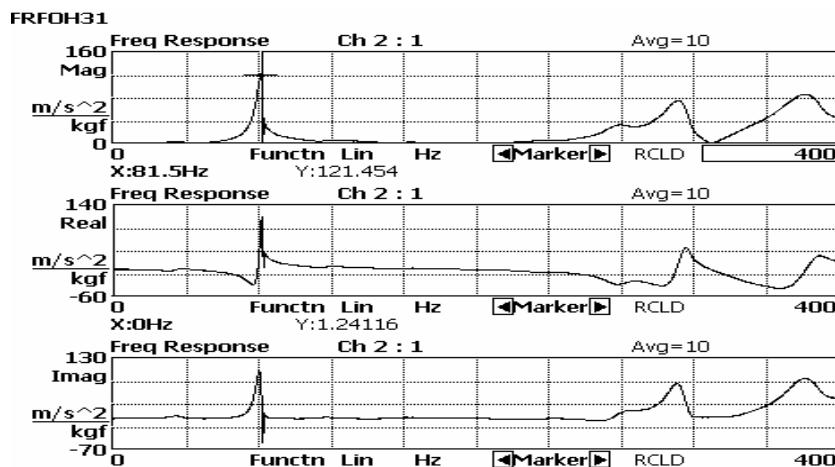
- 1) Terlihat bahwa makin kaku suatu rotor maka frekuensi pribadi statisnya f_{no} akan semakin besar (Tabel I). Juluran 31 mm lebih kaku dibandingkan dengan juluran 53 mm dan 87 mm. Hal yang sama ditunjukkan pula oleh hasil eksperimental (Tabel II).
- 2) Terlihat bahwa frekuensi pribadi statis f_{no} hasil teoritis ternyata tidak berbeda jauh dengan hasil pengukuran *FRF* (Tabel I dan II). Selisih hasil teoritis dan pengukuran untuk frekuensi pribadi statis f_{no} untuk juluran 31 mm adalah 8,5 Hz atau 9,4% dan juluran 53 mm adalah 1,75 Hz atau 3,18% (Tabel III).
- 3) Terlihat bahwa semakin panjang juluran maka perbedaan antara hasil teoritis dan pengukuran, khusus untuk kecepatan putar kritis terendah n_{c1} , cenderung semakin kecil (Tabel I dan IV). Untuk juluran 87 mm selisih n_{c1} adalah 0 RPM atau 0%, juluran 53 mm 250 RPM atau 34% dan juluran 31 mm adalah 900 RPM atau 25%, (Tabel V).



Gambar 7. Skema pengukuran peta spektrum.



Gambar 8. FRF dan Inst Time juluran 31mm



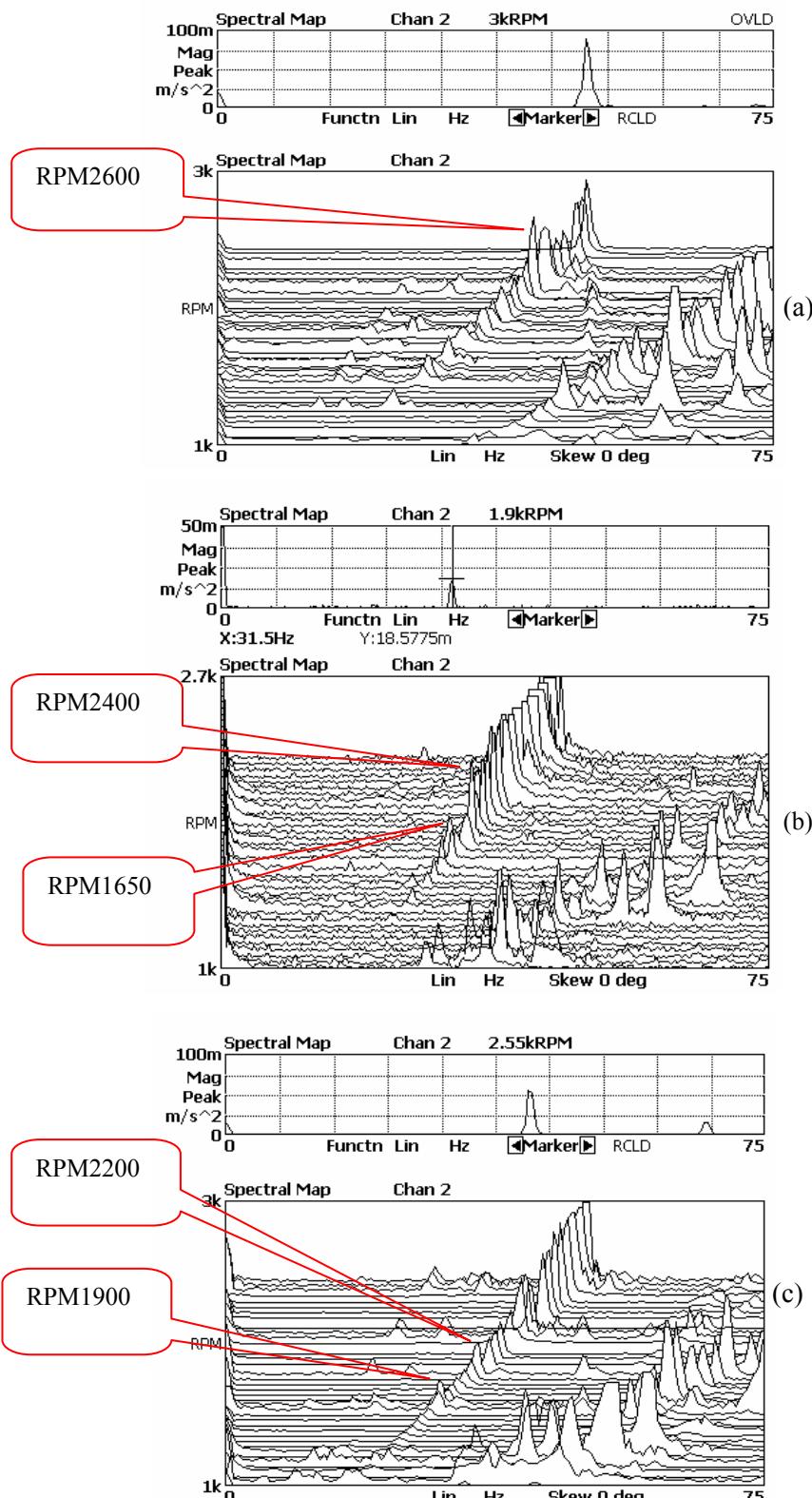
Gambar 9. FRF Mag, Real dan Imag juluran 31mm

- 4) Sudut antara garis pusaran maju dan mundur yang dibentuk oleh titik n_{c2} , f_{no} dan n_{c1} menandakan efek giroskopik atau Corioli. Berdasarkan hal tersebut ternyata sudut antara garis pusaran (whirling) maju F_2 dan mundur F_1 dari peta spektrum lebih kecil dibandingkan dengan hasil teoritis. Hal ini diperkirakan antara lain akibat pemodelan elemen hingga dimana bantalan dimodelkan bekerja pada sebuah titik sedangkan mestinya bekerja pada sebuah permukaan sebagai mana permukaan bantalan. Kedua, pengkajian teoritis solusi persamaan gerak dengan metode pseudo modal hasilnya cenderung mendekati keadaan sebenarnya (Lalanne 1990). Ketiga, karena efek langsing pada batang dimana semakin panjang batang semakin kecil reaksi tumpuan dan semakin mudah tertekuk. Semakin panjang juluran semakin kecil getaran yang dirasakan oleh sensor ditumpuan. Dan keempat, melesatnya asumsi seperti masalah kelurusan poros pada kaji eksperimen.

6. Kesimpulan

Telah dilakukan kajian efek giroskopik pada rotor menjulur. Dari kajian yang telah dilakukan dihasilkan beberapa kesimpulan, pertama, putaran kritis pertama n_{c1} , kedua n_{c2} dan seterusnya dipengaruhi oleh efek giroskopik atau Corioli. Hal ini jelas diperlihatkan oleh kaji teoritis. Kedua, pada keadaan statis frekuensi pribadi hasil kaji eksperimental hampir sama dengan hasil kajian teoritis. Ketiga, hasil kaji teoritis pada keadaan dinamis menunjukkan adanya sedikit perbedaan terhadap hasil eksperimental. Hal ini diperkirakan disebabkan oleh beberapa faktor seperti faktor bentuk atau

konstruksi, termasuk faktor kelurusan, faktor internal seperti material. Keempat, pada kaji eksperimental untuk memperoleh kecepatan kritis melalui pembuatan peta spektrum belum dapat menunjukkan hasil yang baik.



Gambar 10. Hasil eksperimen peta spektrum:
(a) juluran 31mm, (b) juluran 53mm dan (c) juluran 87mm

Tabel I Frekuensi pribadi statis f_{no} dan kecepatan putar kritis n_c

Juluran 31mm	f_{no}	90,0 Hz
	n_{c1}	60,0 Hz (3600 RPM)
	n_{c2}	>
Juluran 53mm	f_{no}	55,0 Hz
	n_{c1}	41,6 Hz (2500 RPM)
	n_{c2}	81,6 Hz (4900 RPM)
Juluran 87mm	f_{no}	35,0 Hz
	n_{c1}	31,6 Hz (1900 RPM)
	n_{c2}	45,0 Hz (2700 RPM)

Tabel II Frekuensi pribadi statis f_{no} dari pengukuran FRF

	f_{no} (Hz)
Juluran 31mm	81,5
Juluran 53mm	53,25
Juluran 87mm

Tabel III Selisih frekuensi pribadi statis f_{no} teoritis dan eksperimental

	f_{no} teoritis	f_{no} eksp	selisih
Juluran 31mm	90,0 Hz	81,5 Hz	8,5 Hz (9,4%)
Juluran 53mm	55,0 Hz	53,25 Hz	1,75 Hz (3,18%)
Juluran 87mm	35,0 Hz

Tabel IV Kecepatan putar kritis n_c dari pengukuran peta spektrum

	n_{c1} (RPM)	n_{c2} (RPM)
Juluran 31mm	2600	>
Juluran 53mm	1650	2400
Juluran 87mm	1900	2200

Tabel V Selisih kecepatan putar kritis n_{c1} dari teoritis dan eksperimental

	n_{c1} teoritis (RPM)	n_{c1} eksp (RPM)	Selisih
Juluran 31 mm	3600	2600	900 RPM (25 %)
Juluran 53 mm	2500	1650	250 RPM (34 %)
Juluran 87 mm	1900	1900	0 RPM (0 %)

Daftar Pustaka

1. Dewanto.W, (1993) *Kaji Teoritik dan Experimental Sistem Getaran Poros Kasus Massa Tak Seimbang*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin ITB.
2. Irwanto, Iskandar.I.S, Bagiasna.K and Abidin. Z, (....) *Theoretical and Experimental Studies on Dynamic Characteristics of Rotating Rotor*, Dynamics Lab, IUC Engineering Sciences, ITB.
3. Kato.M, Ota.H, and Nakamura.S, (1992) *Equations of Motion of a Shaft-rotor System With Variable Rotating Speed*, ImechE **C432/101**.
4. Lalanne.M and Ferraris.G, (1990) *Rotordynamics Prediction in Engineering*, John Wiley and Sons Inc.
5. Santika.I.K.J, (2000) *Penyusunan Program Bantu Berbasis Metode Elemen Hingga dan Metode Pseudo Modal untuk Analisis Dinamik Sistem Poros Rotor*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, ITB.
6. Widodo.A, (2002) *Prediksi Numerik Perilaku Dinamik Sistem Poros Rotor di Industri Dengan Metode Elemen Hingga*, Tesis, Program Magister Jurusan Teknik Mesin, ITB.