

EVALUASI POLA FUNGSI RESPON FREKUENSI PADA RESPON GETARAN BANTALAN GELINDING

R. Monhendri¹, K. Bagiasna²

¹Lab. Dinamika, Pusat Rekayasa Industri, ITB

²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB

Kontak: Komang Bagiasna, kb@dynamic.pauir.itb.ac.id

Ringkasan. Bantalan gelinding adalah bantalan yang umum digunakan pada mesin-mesin di industri. Kondisi kesehatan mesin di industri dapat dipantau menggunakan metode perawatan prediktif berbasis sinyal getaran. Terdapat dua hal penting dalam metode perawatan ini yaitu, analisis spektrum frekuensi untuk diagnosis sumber kerusakan dan *trip control* yang didasarkan pada nilai *root mean square* (RMS) level getaran yang terukur untuk menentukan status kesehatan mesin. Pada banyak pengukuran level getaran bantalan, *floor noise* memberi kontribusi pada kenaikan RMS. *Floor noise* yang terlihat pada kurva spektrum frekuensi bantalan gelinding menyerupai pola yang didapatkan dari pengukuran fungsi respon frekuensi (FRF). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pola FRF yang terekam pada respon getaran bantalan gelinding baru. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran FRF pada bantalan uji, selanjutnya dilakukan pengukuran spektrum frekuensi respon getaran bantalan pada berbagai putaran dan beban statik yang diberikan pada bantalan yang sedang beroperasi. Hasil evaluasi pengukuran spektrum frekuensi respon getaran bantalan menunjukkan adanya pola *floor noise* yang menyerupai pola kurva FRF hasil pengukuran. Hal ini disebabkan adanya fenomena gesekan gelinding yang membangkitkan sinyal eksitasi getaran yang bersifat random untuk rentang frekuensi tertentu.

Abstract. Rolling bearing is a mechanical component which is commonly used in industrial machinery to suppress mechanical losses due to friction. Health condition of those machines are monitored by measuring its vibration responses as normally conducted in predictive maintenance (PdM) technology. There are two important steps in PdM, i.e. frequency spectrum analysis for diagnostic purpose and control trip value which is based on the root mean square (RMS) vibration level evaluation of the machine in operation. The vibration response measuring results show, the floor noise level contributes to the increase in RMS vibration level. Floor noise found in the frequency spectrum of the rolling bearings vibration resembles the pattern obtained from the frequency response function (FRF) measurements of the rolling bearing assembly unit. The objective of this study is to evaluate the FRF patterns detected in the vibration response of a new rolling bearing installed in the measuring set up. The vibration response and FRF measurements were performed and the frequency spectrum is measured for various shaft rotating speeds as well as static loads. Floor noise signal obtained from frequency spectrums measurement shows a pattern which resembles the FRF curve of the roller bearing measuring set up. The FRF pattern of the floor noise is caused by rolling friction phenomena which generates random vibration excitation signals on the tested rolling bearing and its supporting structure.

Keywords: *Rorlling bearing, frequency response function (FRF), adhesive friction, curve fit, floor noise.*

1 Pendahuluan

Bantalan gelinding merupakan elemen mesin yang digunakan sebagai penumpu dalam perangkat transmisi putaran antara komponen diam dan komponen yang berputar serta untuk meminimalkan gesekan yang timbul akibat adanya gerakan relatif antara komponen mesin. Adanya gesekan ini dapat menurunkan efisiensi mesin, meningkatkan temperatur, keausan, dan berbagai efek negatif lain. Apabila dibiarkan lebih jauh maka hal ini dapat mengakibatkan mesin *breakdown* dan proses produksi berhenti sehingga mengakibatkan kerugian yang besar. Mengingat pentingnya peran bantalan gelinding, maka dilakukan metode perawatan prediktif berbasis pemantauan sinyal getaran.

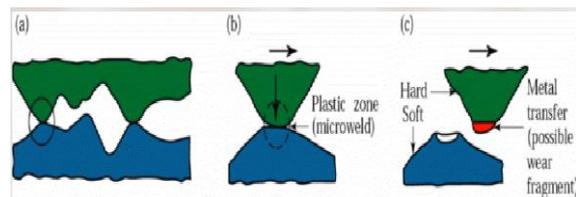
Dalam perawatan prediktif tersebut dilakukan pemantauan sinyal respon getaran berupa simpangan, kecepatan, atau percepatan getaran. Sinyal respon getaran awal yang diperoleh berupa domain waktu (*waveform*). Sinyal ini yang selanjutnya dikonversikan ke dalam domain frekuensi (spektrum frekuensi) menggunakan proses transformasi Fourier cepat atau *Fast Fourier Transform* (FFT) pada *Multichannel Spectrum Analyzer* (MSA), *Dynamic Signal Analyzer* (DSA), atau *Data Logger*.

Terdapat dua jenis pengukuran yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu pengukuran FRF dan respon getaran. Pengukuran FRF dilakukan untuk mengetahui karakteristik dinamik berupa frekuensi pribadi dengan cara memberikan gaya eksitasi pada bantalan uji dan secara simultan mengukur respon getarannya. Pengukuran respon getaran digunakan untuk mengetahui nilai RMS sinyal getaran yang dibangkitkan pada berbagai beban dan putaran serta kandungan frekuensinya dalam bentuk spektrum frekuensi. Pada hasil pengukuran spektrum frekuensi bantalan gelinding baru terdapat suatu pola yang bentuknya menyerupai bentuk kurva yang didapatkan dari pengujian FRF bantalan uji serta struktur penumpunya.

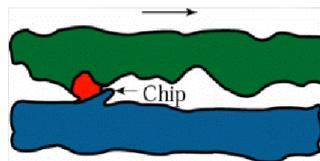
2 Konsep Dan Fenomena Gesekan Pada Bantalan Gelinding

Gesekan adalah gaya yang menahan gerakan suatu benda pada saat digerakkan di atas permukaan benda lain. Gesekan akan selalu timbul jika dua permukaan benda saling bersentuhan. Secara garis besar terdapat 2 jenis gesekan [1], yaitu gesekan translasi (*sliding friction*) dan gesekan rotasi (*rolling friction*). Gesekan translasi adalah gesekan yang terjadi ketika benda bergerak secara translasi di atas suatu permukaan, sedangkan gesekan rotasi terjadi ketika benda menggelinding di atas suatu permukaan.

Terdapat beberapa teori mengenai fenomena gesekan. Teori yang paling banyak digunakan adalah teori adhesif dan abrasif. Menurut teori adhesif, gesekan terjadi bila kontak permukaan dari dua material mengakibatkan puncak-puncak permukaan kasar menempel satu sama lain, kemudian adanya gaya tangensial dapat mengakibatkan pemotongan salah satu material. Menurut teori abrasif, gesekan terjadi bila partikel keras dari material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak. Gambar 1 dan Gambar 2 berikut memperlihatkan ilustrasi skematik dari teori adhesif dan abrasif.



Gambar 1 Ilustrasi skematik teori adhesif (a) dua kontak permukaan, (b) terbentuknya *plastic zone*, (c) terbentuknya partikel keausan [1]



Gambar 2 Ilustrasi skematik teori abrasif pada dua permukaan kontak [1]

Bantalan bola dan bantalan gelinding *roll* disebut juga bantalan anti gesekan karena nilai gesekannya yang sangat rendah. Meskipun demikian, masih ada gesekan yang terjadi. Banyak hal yang menyebabkan gesekan, seperti: histerisis elastis dari *rolling*, *sliding* pada kontak antara elemen gelinding dan lintasan, *sliding* antara sangkar dan elemen gelinding, serta *sliding* antara *roller end* dan *inner* atau *outer ring flanges*.

3 FRF MDOF dan *Curve Fit*

FRF suatu sistem getaran dengan banyak derajat kebebasan (*multi degree of freedom*, MDOF) merupakan gabungan dari FRF satu derajat kebebasan (*single degree of freedom*, SDOF) dimana setiap puncak FRF mewakili satu set parameter getaran. FRF *receptance* MDOF didefinisikan sebagai berikut [3].

$$\alpha_{jk} = \frac{x_j}{F_k} \Big|_{F_m=0} \quad m = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{dan } m \neq k \quad (1)$$

Secara teoritik, FRF MDOF dapat dihitung dengan memecahkan persamaan gerak dalam bentuk matriks. Karakteristik dinamik suatu sistem getaran paksa MDOF tanpa redaman dengan N buah derajat kebebasan dapat ditentukan dengan memecahkan persamaan matriks berikut.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2)$$

FRF *receptance* dari sistem persamaan di atas dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\{\phi_r\}_j \{\phi_r\}_k}{k_r - \omega^2 m_r} \quad (3)$$

Karakteristik dinamik suatu sistem getaran paksa teredam *viscous* dengan N jumlah derajat kebebasan dapat ditentukan dengan memecahkan persamaan berikut.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (4)$$

Terdapat dua model redaman *viscous* yaitu model redaman *viscous* sebanding dan model redaman *viscous* tak sebanding. Untuk model redaman *viscous* tak sebanding,

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5)$$

FRF sistem getaran MDOF dengan model redaman tak sebanding dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\theta_{r,j} \theta_{r,k}}{a_r \left[\omega_r \xi_r + i \left(\omega - \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} \right) \right]} + \frac{(\theta_{r,j})^* (\theta_{r,k})^*}{a_r^* \left[\omega_r \xi_r + i \left(\omega - \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} \right) \right]} \quad (6)$$

Curve fit adalah metode untuk mengekstraksi parameter modulus getar dari kurva FRF suatu obyek uji. Metode yang biasa digunakan adalah metode *circle fit* dan *half power point*. Kelemahan dari kedua metode ini adalah puncak FRF yang ingin dicari parameter modulus getarnya merupakan puncak yang mandiri.

Dalam penelitian ini digunakan metode *rational fraction polynomials*. Keuntungan metode ini adalah parameter getaran dari seluruh puncak dapat dicari bersamaan walaupun terdapat minima pada kurva FRF. Kerugian metode ini adalah hanya dapat digunakan pada FRF *receptance* dengan model redaman *viscous*.

FRF sistem getaran dengan N buah derajat kebebasan dapat dinyatakan sebagai berikut [4]:

$$FRF(s) = \frac{\sum_{k=0}^{2N} a_k s^k}{\sum_{k=0}^{2N} b_k s^k} \Bigg|_{s=i\omega} \quad (7)$$

Untuk sistem getaran dengan model redaman *viscous*, hasil akhir dari metode *rational fraction polynomials* adalah satu set koefisien a_k dan b_k yang dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$FRF(s) = \sum_{k=1}^N \frac{A_r}{s - p_r} + \frac{A_r^*}{s - p_r^*} \Bigg|_{s=i\omega} \quad (8)$$

Persamaan FRF *receptance* dengan model redaman sebanding dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{A_r}{i\omega - \underbrace{(-\xi_r \omega_r + i\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2})}_{p_r}} + \frac{A_r^*}{i\omega - \underbrace{(-\xi_r \omega_r - i\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2})}_{p_r^*}} \quad (9)$$

Nilai frekuensi pribadi dapat dicari dengan mencari nilai *magnitude* dari p_r .

$$|p_r| = \omega_r^2 \quad (10)$$

Nilai redaman dapat dicari dari persamaan berikut:

$$\xi_r = -\frac{\text{Re}(p_r)}{\omega_r} = -\frac{\text{Re}(p_r)}{\sqrt{|p_r|}} \quad (11)$$

Karakteristik dinamik dari FRF *receptance* dengan model redaman *viscous* tak sebanding dapat dicari dari persamaan:

$$\alpha_{jk} = \sum_{r=1}^N \frac{(\theta_{r,j} \theta_{r,k}) / a_r}{i\omega - \underbrace{(-\xi_r \omega_r + i\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2})}_{p_r}} + \frac{[(\theta_{r,j})^* (\theta_{r,k})] / a_r^*}{i\omega - \underbrace{(-\xi_r \omega_r - i\omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2})}_{p_r^*}} \quad (12)$$

Nilai frekuensi pribadi (ω_r) dan rasio redaman (ξ_r) dapat dicari dengan persamaan (10) dan (11).

Merujuk pada persamaan (8) dan (12) maka,

$$A_r = (\theta_{r,j} \theta_{r,k}) / a_r \quad (13)$$

$$A_r^* = (\theta_{r,j}^* \theta_{r,k}^*) / a_r^* \quad (14)$$

Hasil dari *curve fit* tidak sepenuhnya sama dengan hasil pengukuran FRF karena masih dipengaruhi puncak-puncak dari luar rentang frekuensi. Dengan mengabaikan aspek redaman, pengaruh puncak ini dapat terlihat pada $\frac{\{\phi_r\}_j \{\phi_r\}_k}{k_r - \omega^2 m_r}$ (persamaan 3). Pada frekuensi tinggi nilai $k_r - \omega^2 m_r \cong -\omega^2 m$

pengaruh puncak sebanding dengan $\frac{1}{-\omega^2 m_r}$. Sebaliknya pada frekuensi rendah

nilai $k_r - \omega^2 m_r \cong k_r$, sehingga pengaruh puncak pada frekuensi rendah sebanding dengan $\frac{1}{k_r}$. Dengan demikian hubungan antara FRF hasil *curve fit*

dengan FRF hasil pengukuran dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\alpha_{jk} = \underbrace{\sum_{r=1}^N \frac{\{\psi_r\}_j \{\psi_r\}_k}{\omega_r^2 - \omega^2}}_{\text{Hasil curve fit}} + \underbrace{\frac{1}{K} + \frac{1}{-\omega^2 m}}_{\text{Pengaruh puncak luar rentang curve fit}} \quad (15)$$

4 Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi merupakan suatu parameter statistik yang dapat digunakan untuk menyatakan tingkat keserupaan antara kurva FRF dan spektrum frekuensi *smoothing* secara kuantitatif. Secara matematis, koefisien korelasi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut [5]:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_x}; \quad -1 < r_{xy} < 1 \quad (16)$$

dengan

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (17)$$

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n y_i \quad (19)$$

Harga koefisien korelasi tidak dipengaruhi oleh satuan pengukuran, karena r_{xy} akan mendekati -1 atau 1 apabila x dan y merupakan variabel tak bebas, dan akan mendekati 0 apabila x dan y merupakan variabel bebas. Koefisien korelasi berharga 1 jika kedua variabel terkorelasi secara positif, artinya kenaikan harga suatu variabel diikuti oleh kenaikan harga variabel lain. Koefisien korelasi berharga -1 jika kedua variabel terkorelasi secara negatif, artinya kenaikan suatu variabel diikuti oleh penurunan variabel lain.

5 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan dua jenis pengujian yaitu pengujian FRF dan pengujian respon getaran berupa spektrum frekuensi. Pengujian FRF dilakukan dengan memvariasikan besar beban statik yang diberikan pada bantalan uji sebesar 0 N, 200 N, 400 N, hingga 600 N. Gaya input berupa eksitasi kejut dari palu pemukul diberikan pada bantalan dari tiga arah berbeda yaitu arah horizontal, vertikal, dan kombinasi. Sinyal output juga diukur pada ketiga arah tersebut. Pengujian spektrum frekuensi dilakukan untuk mengetahui kandungan frekuensi yang dibangkitkan pada berbagai kondisi pembebanan dan putaran. Besar beban yang diberikan divariasikan seperti pada pengukuran FRF, sedangkan putaran poros rotor divariasikan sebesar 300 rpm, 600 rpm, 900 rpm, dan 1200 rpm.

Untuk melakukan kedua jenis pengujian tersebut digunakan beberapa perangkat pengujian sebagai berikut:

1. Struktur Uji

2. Akselerometer

Merupakan sensor getaran yang digunakan untuk mendapatkan sinyal input berupa percepatan getaran. Terdapat tiga buah sensor akselerometer yang digunakan masing-masing untuk mengetahui sinyal output pada tiga arah yaitu vertikal, horizontal, dan kombinasi. Berikut spesifikasi masing-masing sensor akselerometer:

- Akselerometer 1, arah vertikal

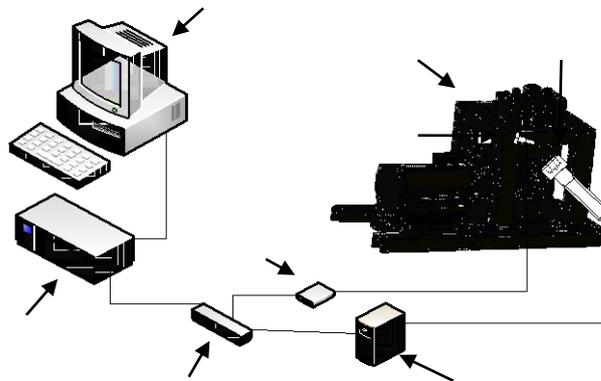
- Merek dagang : Dytran
 - Tipe : 3056B2
 - Nomor Serial : 2774
 - Voltage sensitivity : 100,9 mV/g
 - Akselerometer 2, arah horizontal
 - Merek dagang : Dytran
 - Tipe : 3056B2
 - Nomor Serial : 2774
 - Voltage sensitivity : 102,7 mV/g
 - Akselerometer 3, arah kombinasi
 - Merek dagang : Willcoxon
 - Tipe : 3056B2
 - Nomor Serial : 2774
 - Voltage sensitivity : 102,7 mV/g
3. MSA (*Multichannel Spectrum Analyzer*)
Merupakan perangkat akuisisi data dan pengolah data sinyal getaran. MSA mengkonversi data domain waktu menjadi domain frekuensi menggunakan proses transformasi Fourier cepat (*Fast Fourier Transform*). MSA yang digunakan adalah tipe HP35650A.
 4. Catu daya (*Charge Amplifier*)
Merupakan alat tambahan yang digunakan untuk memperkuat sinyal percepatan getaran yang terukur oleh sensor *accelerometer* sebelum masuk ke perangkat akuisisi data.
 5. Palu Eksitasi (*Impact Hammer*)
Merupakan palu yang digunakan untuk memberikan input berupa gaya eksitasi impak pada struktur uji. Pada ujung palu terdapat *load cell* untuk mengetahui besarnya gaya impak yang terjadi.
 6. Pengkondisi Sinyal (*Conditioning Amplifier*)
Pengkondisi sinyal digunakan untuk menguatkan sinyal yang dideteksi oleh *load cell* pada palu eksitasi sebelum masuk ke MSA.

Gambar 3 memperlihatkan masing-masing perangkat pengujian FRF.

Secara garis besar, instrumen yang digunakan untuk pengujian respon getaran tidak berbeda jauh dengan pengujian FRF. Struktur uji, akselerometer, MSA, dan catu daya tetap digunakan pada pengukuran respon getaran. Palu eksitasi dan pengkondisi sinyal diganti dengan instrumen tambahan sebagai berikut:

1. *Key Phasor*, digunakan untuk mengukur kecepatan putar poros dan untuk memberikan trigger pengambilan data oleh MSA.

2. Inverter, digunakan untuk mengatur kecepatan motor.



Gambar 3 Perangkat pengujian FRF

6 Hasil Pengujian Dan Analisis

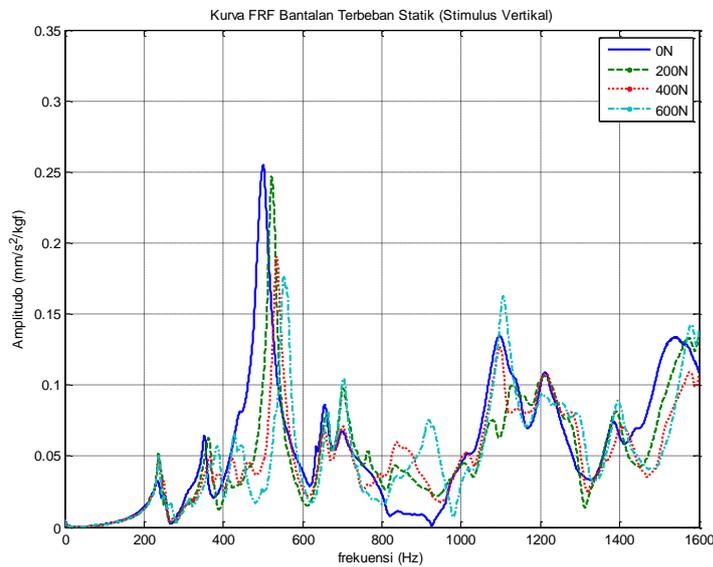
6.1 Hasil Pengukuran FRF Bantalan Berbeban Statik dan *Curve Fit*

Contoh hasil pengukuran FRF bantalan berbeban statik stimulus vertikal ditunjukkan melalui Gambar 4. Dari gambar tersebut tampak bahwa bentuk kurva FRF tanpa beban statik berbeda cukup jauh dengan kurva FRF berbeban statik. Akibat pembebanan yang diberikan, maka *clearance* bantalan akan semakin kecil sehingga kekakuan bantalan menjadi semakin besar. Kekakuan bantalan yang semakin besar ini juga tampak pada kecenderungan kurva FRF yang bergeser ke kanan.

Dari gambar tersebut juga tampak bahwa kecenderungan frekuensi pribadi bernilai konstan pada rentang frekuensi rendah di bawah 400 Hz. Pada rentang frekuensi tinggi, nilai frekuensi pribadi cenderung berubah. Hal ini terjadi karena pengukuran pada frekuensi rendah dipengaruhi oleh kekakuan struktur yang nilainya cenderung tidak berubah, sedangkan pada pengukuran frekuensi tinggi dipengaruhi oleh kekakuan bantalan yang nilainya cenderung berubah.

Curve fitting pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *rational fractional polynomials*. Metode ini telah dijadikan program Matlab oleh Acuna dan dapat diakses di Mathworks. Kelemahan dari program karya Acuna yaitu tidak bisa digunakan untuk model redaman *viscous* tak sebanding karena algoritma yang dipakai untuk menentukan *mode shape* merupakan algoritma untuk redaman *viscous* sebanding. Untuk mengakomodasi metode

curve fit redaman *viscous* tak sebanding, program karya Acuna kemudian dimodifikasi oleh Tumbuan [6].

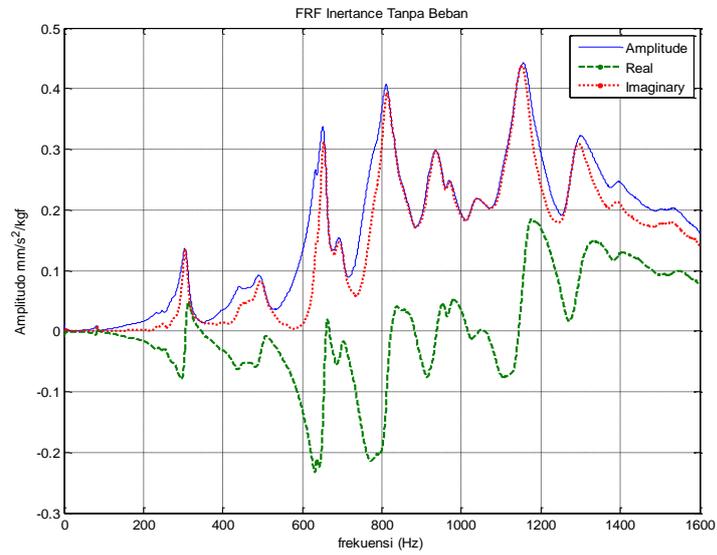


Gambar 4 FRF bantalan berbeban statik stimulus vertikal

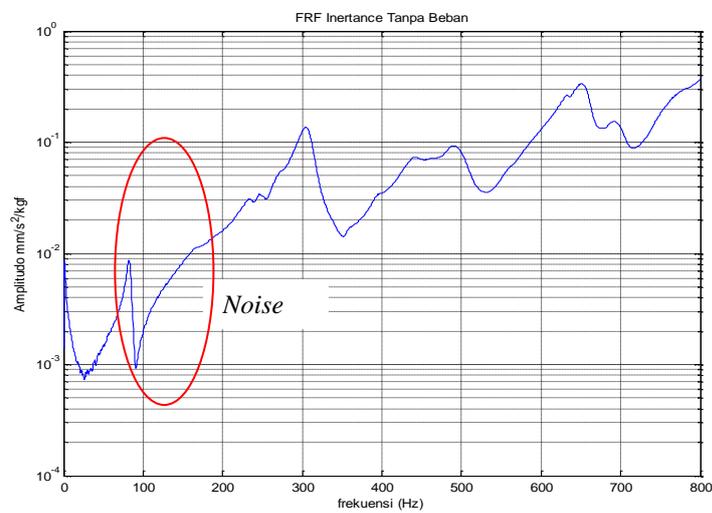
Curve fitting hanya dilakukan pada rentang frekuensi 0 Hz sampai 400 Hz. Hal ini dilakukan untuk menghindari puncak-puncak yang terpengaruh oleh kekakuan bantalan yang terjadi pada frekuensi tinggi. Pengaruh kekakuan bantalan ini perlu dilakukan mengingat kekakuan bantalan bersifat non-linear sehingga hubungan antara respon getaran dan gaya eksitasi tidak bersifat konstan. Proses *curve fit* dilakukan pada hasil pengukuran FRF bantalan tanpa beban stimulus horizontal, seperti tampak pada Gambar 5.

Curve fit dilakukan pada rentang frekuensi 26.5 Hz sampai 352 Hz. Batas bawah rentang frekuensi dipilih 26.5 Hz untuk menghindari noise pada frekuensi rendah, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Sedangkan batas atas rentang frekuensi dipilih 352 Hz melalui proses *trial and error* yang memberikan hasil aproksimasi yang paling baik.

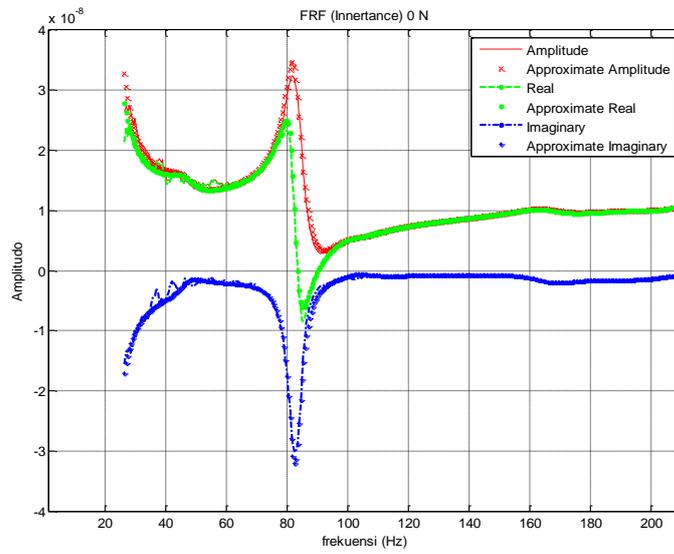
Untuk mendapatkan FRF *receptance*, maka FRF *inertance* hasil pengukuran harus dibagi dengan $-\omega^2$. Gambar 7 memperlihatkan FRF *receptance* hasil pengukuran dan FRF hasil aproksimasi.



Gambar 5 FRF *inertance* stimulus horizontal, komponen real dan imajiner



Gambar 6 FRF *inertance* stimulus horizontal dalam skala semi-log



Gambar 7 FRF receptance

Tabel 1 berikut memperlihatkan *pole* dan *residue* dari kurva FRF aproksimasi.

Tabel 1 Pole dan residue hasil curve fit

Pole ($\times 10^4$)	Residu ($\times 10^{-7}$)	Keterangan
-1.70 - 51.91i -1.70 + 51.91i	-0.12 + 5.29i -0.12 - 5.29i	Modus 1
-5.81 - 104.22i -5.81 + 104.22i	0.44 + 0.58i 0.44 - 0.58i	Modus 2
-7.05 - 128.14i -7.05 + 128.14i	-0.67 - 0.01i -0.67 + 0.01i	Modus 3
-2.32 - 147.34i -2.32 + 147.34i	0.12 + 0.63i 0.12 - 0.63i	Modus 4
-3.12 - 158.74i -3.12 + 158.74i	-0.86 + 0.80i -0.86 - 0.80i	Modus 5
-3.13 - 171.70i -3.13 + 171.70i	0.22 + 0.65i 0.22 - 0.65i	Modus 6
-6.06 - 192.63i -6.06 + 192.63i	-8.07 + 23.31i -8.07 - 23.31i	Modus 7
-9.54 - 200.22i -9.54 + 200.22i	6.59 + 0.73i 6.59 - 0.73i	Modus 8
-3.97 - 212.07i -3.97 + 212.07i	0.09 + 0.12i 0.09 - 0.12i	Modus 9

Dari Tabel 1 terlihat bahwa nilai riil dari residu tidak berharga nol, maka FRF dapat didekati dengan model redaman *viscous* tak sebanding. Tabel 2 berikut memperlihatkan hasil perhitungan karakteristik dinamik.

Tabel 2. Karakteristik dinamik

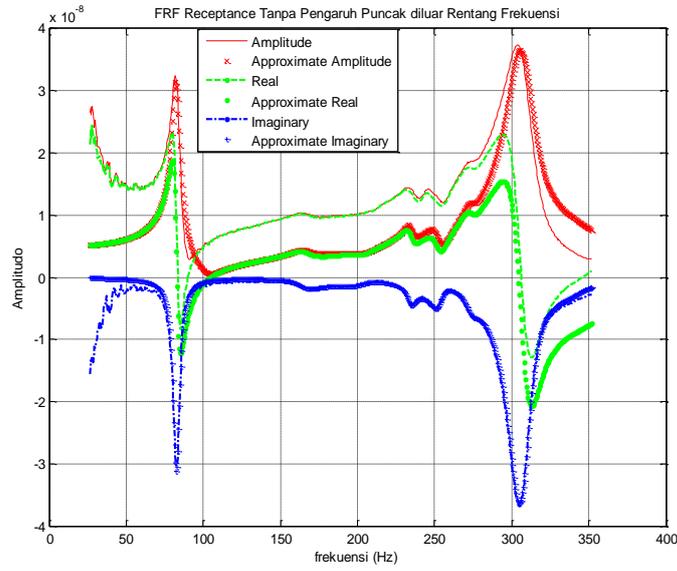
Modus	Frekuensi pribadi (Hz)	Rasio redaman(%)	$(\theta_{r,j}, \theta_{r,k})/a_r (\times 10^{-7})$
Modus 1	82.66	3.28	0.12 + 5.29i
Modus 2	166.13	5.57	0.44 + 0.58i
Modus 3	204.25	5.50	0.67 - 0.01i
Modus 4	234.53	1.57	0.12 + 0.63i
Modus 5	52.69	1.97	0.86 + 0.80i
Modus 6	273.31	1.82	0.22 + 0.65i
Modus 7	306.72	3.15	8.07 + 23.31i
Modus 8	319.02	4.76	6.59 + 0.73i
Modus 9	337.57	1.87	0.09 + 0.12i

Reka ulang kurva FRF *viscous* tak sebanding akan dilakukan berdasarkan nilai karakteristik dinamik yang telah diperoleh. Dengan merujuk ke persamaan (12), dapat dihasilkan reka ulang kurva FRF *receptance* yang tidak dipengaruhi puncak di luar rentang frekuensi seperti yang ditunjukkan Gambar 8.

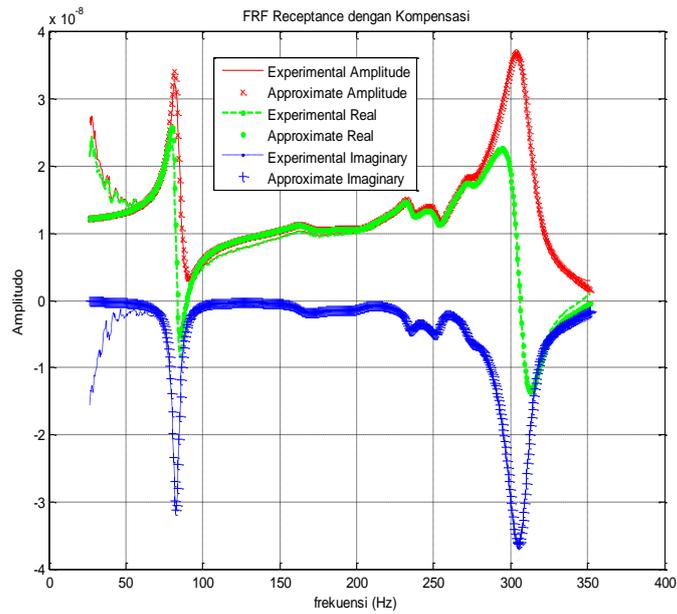
Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa terdapat pengaruh puncak-puncak di luar rentang frekuensi *curve fit*. Merujuk pada Gambar 5 yang tidak terdapat puncak pada frekuensi rendah sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaruh puncak-puncak di luar rentang frekuensi *curve fit* berasal dari frekuensi tinggi. Secara teoritik pengaruh puncak pada frekuensi tinggi bernilai 1/kekakuan, seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (15).

Besarnya selisih antara kurva FRF hasil pengukuran dan *curve fit* rata-rata sebesar 4.6742×10^{-15} . Dari sini dapat dihitung kekakuan dari puncak yang berada pada frekuensi tinggi $\approx 2.319 \times 10^{14}$. FRF *receptance* yang telah dikompensasi dengan faktor kekakuan ditunjukkan oleh Gambar 9.

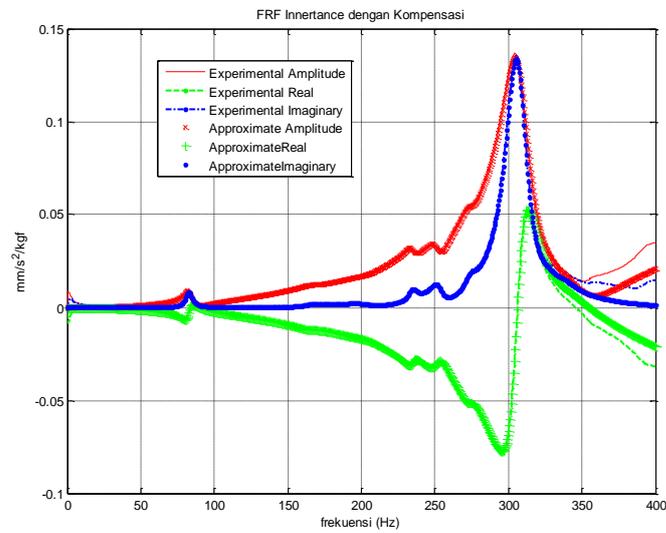
Gambar 10 dan Gambar 11 berikut memperlihatkan FRF *inertance* hasil pengukuran dan perbandingan antara FRF *inertance* hasil pengukuran dan aproksimasi.



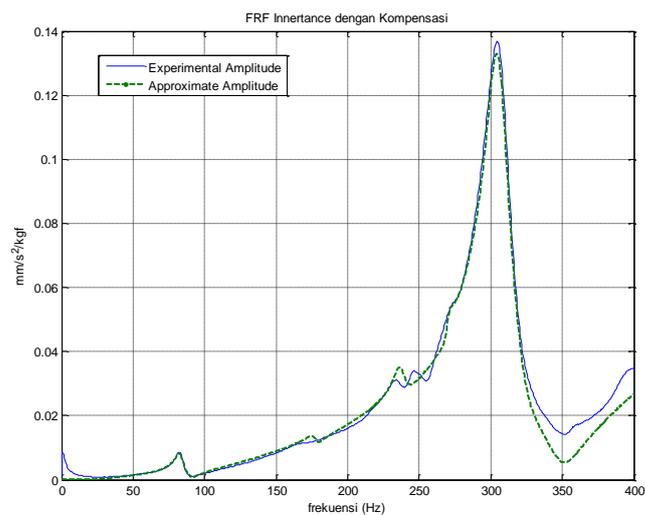
Gambar 8 FRF *receptance* tanpa pengaruh puncak luar frekuensi



Gambar 9 FRF *receptance* dengan kompensasi



Gambar 10 FRF *inertance* dengan kompensasi

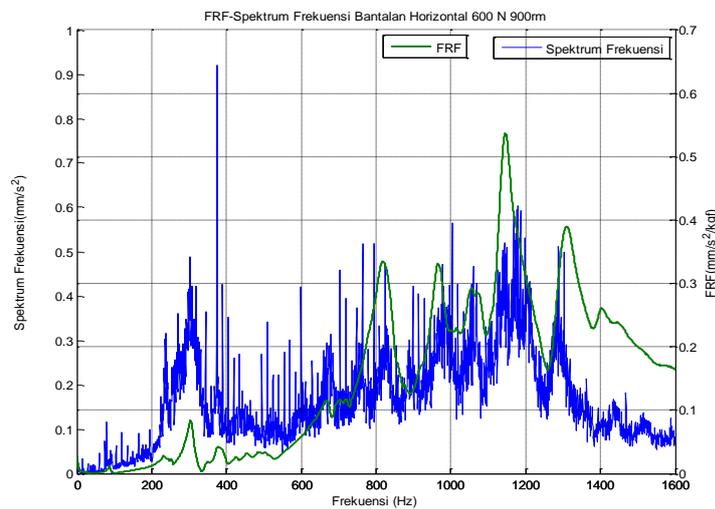


Gambar 11 Perbandingan FRF *inertance* hasil pengukuran dan *curve fit*

6.2 Evaluasi Pola FRF pada Respon Getaran

Hasil pengukuran respon getaran berupa spektrum frekuensi memperlihatkan adanya *floor noise* yang cukup tinggi. Bentuk *floor noise* dari spektrum

frekuensi menyerupai bentuk kurva hasil pengukuran FRF karena respon getaran merupakan perkalian antara gaya eksitasi dan karakteristik dinamik (FRF). Gambar 12 berikut memperlihatkan spektrum frekuensi dan kurva FRF hasil pengukuran stimulus arah horizontal untuk beban 600 N dan kecepatan putar 900 rpm.

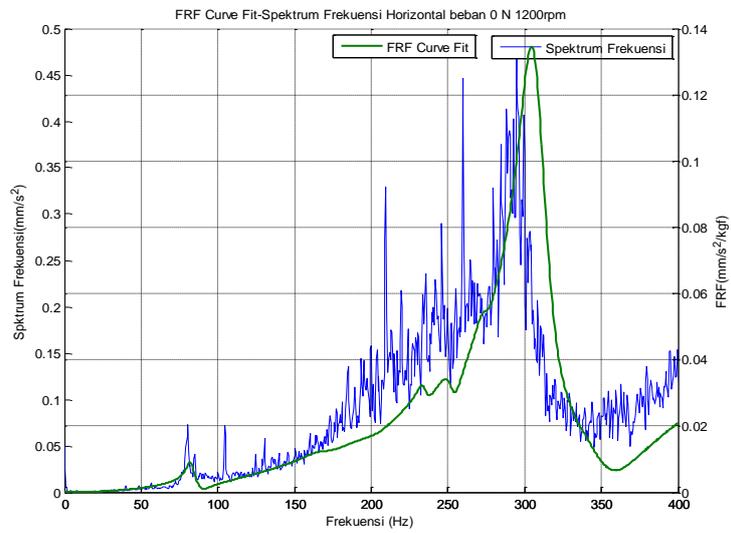


Gambar 12 FRF dan spektrum frekuensi beban 600N kecepatan putar 900 rpm

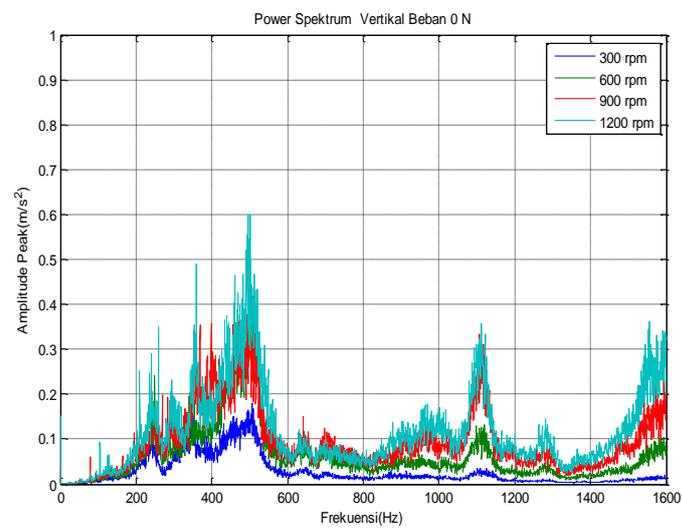
Dari Gambar 12 tampak bahwa adanya pola yang menyerupai kurva FRF pada hasil *floor noise* pengukuran respon getaran. *Floor noise* tampak terjadi di sepanjang rentang frekuensi pengukuran. *Floor noise* timbul karena adanya gesekan akibat interaksi permukaan antar elemen bantalan gelinding seperti *sliding* karena deformasi dari elemen kontak, *sliding* antara sangkar dan elemen gelinding, *sliding* antara *roller end* dan *inner* atau *outer ring flanges*.

Selanjutnya Gambar 13 memperlihatkan spektrum frekuensi dan kurva FRF *curve fit* beban 0 N dan kecepatan putar 1200 rpm untuk rentang frekuensi 0 Hz sampai 400 Hz. Tampak bahwa *floor noise* pada respon getaran menyerupai bentuk kurva FRF *curve fit*.

Gambar 14 memperlihatkan hasil pengukuran spektrum frekuensi stimulus arah vertikal untuk beban 0 N dan putaran bervariasi. Tampak bahwa semakin besar kecepatan putar mengakibatkan respon getaran semakin besar.



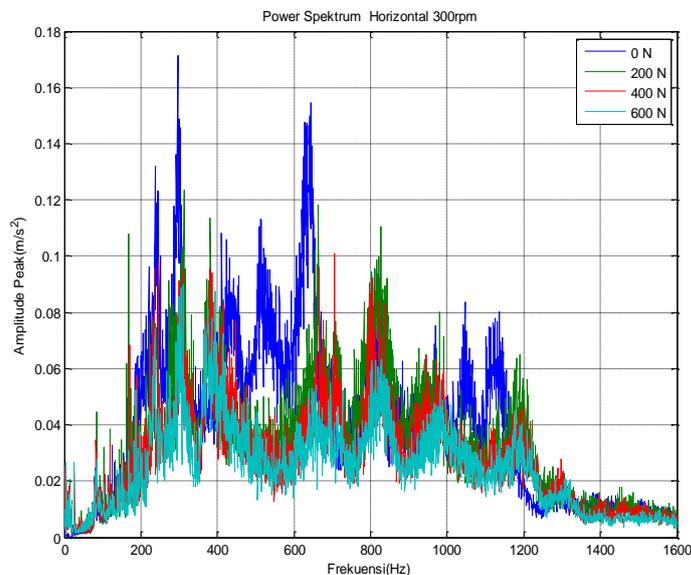
Gambar 13 FRF curve fit dan spektrum frekuensi beban 0 N 1200 rpm



Gambar 14 Power spectrum vertikal beban 0 N

Selain itu tampak bahwa amplitudo respon getaran yang terjadi pada arah vertikal lebih kecil dibandingkan dengan amplitudo respon getaran arah horizontal. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan rumah bantalan arah vertikal lebih besar dibandingkan dengan kekakuan arah horizontal.

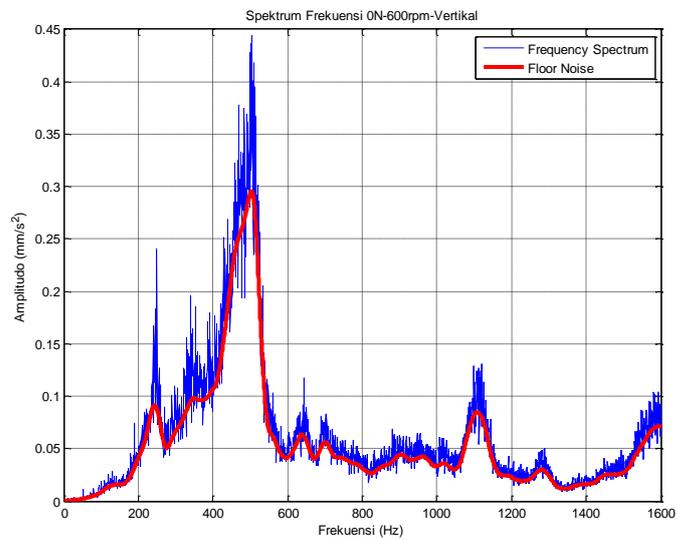
Dari hasil pengolahan data untuk kecepatan putar tetap dan pembebanan divariasikan terlihat bahwa jika pembebanan yang diberikan bertambah, maka respon getaran cenderung semakin besar karena gesekan yang terjadi juga semakin besar. Gambar 15 memperlihatkan kurva respon getaran untuk kecepatan.



Gambar 15 *Power spectrum* horizontal putaran 300 rpm

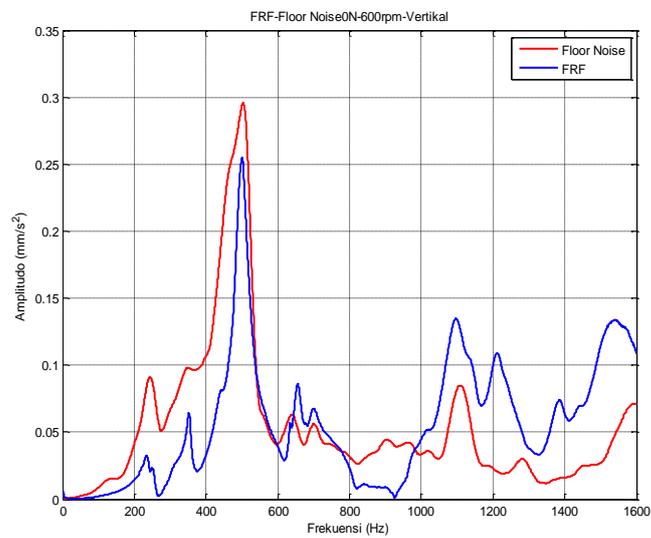
6.3 Analisis Korelasi Kurva FRF-Spektrum Frekuensi

Koefisien korelasi digunakan untuk menentukan tingkat keterkaitan antara kurva FRF dan kurva spektrum frekuensi yang telah di-*smoothing*. Gambar 16 memperlihatkan kurva spektrum frekuensi dan *floor noise* hasil *smoothing*.



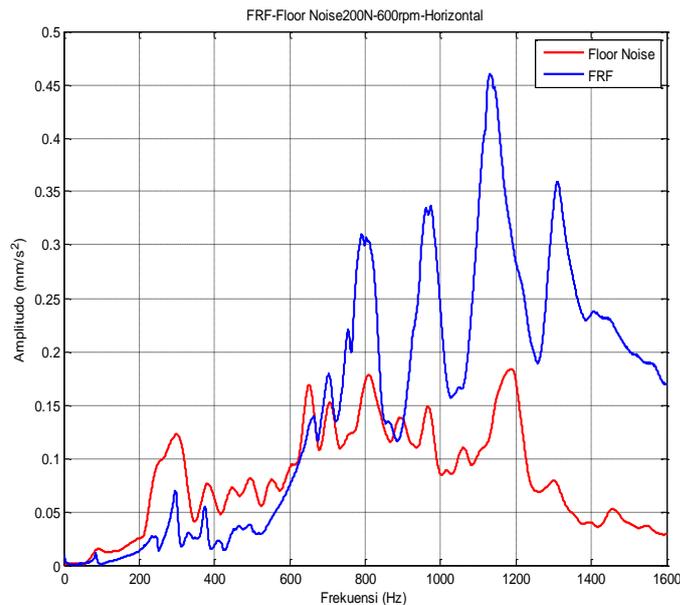
Gambar 16 Kurva *floor noise* hasil *smoothing*

Kurva *floor noise* tersebut kemudian dibandingkan dengan kurva hasil pengukuran FRF seperti tampak pada Gambar 17 berikut:



Gambar 17 Kurva *floor noise* dan FRF beban 0 N vertikal kecepatan putar 600 rpm

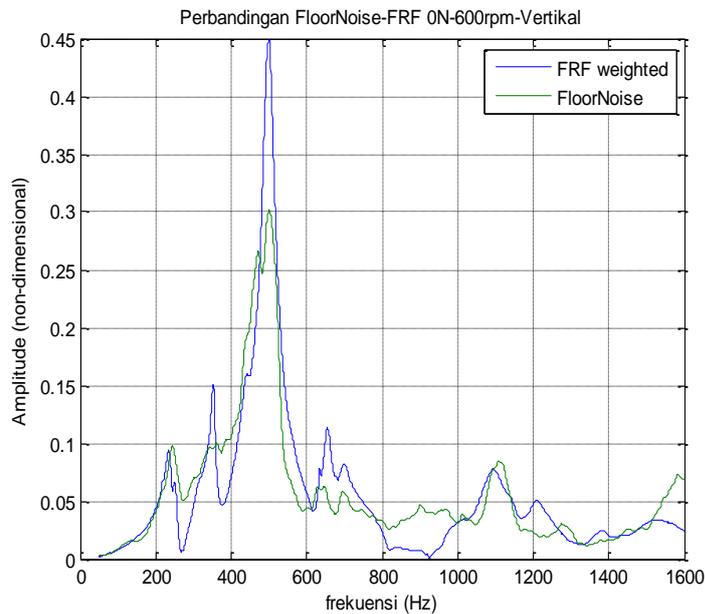
Secara visual tampak bahwa pola yang terlihat pada *floor noise* menyerupai pola yang terdapat pada FRF. Dari gambar juga tampak kecenderungan bahwa semakin tinggi frekuensi maka amplitudo FRF semakin tinggi, sedangkan amplitudo dari *floor noise* semakin rendah. Hal ini diperkirakan karena gesekan akibat interaksi permukaan antar elemen bantalan gelinding tidak cukup besar untuk men-*generate* sinyal pada frekuensi tinggi. Contoh lain perbandingan kurva *floor noise* dan FRF diperlihatkan Gambar 18 di bawah.



Gambar 18 Kurva *floor noise* dan FRF beban 200 N horizontal kecepatan putar 600 rpm

Jika analisis korelasi langsung dilakukan, maka akan dihasilkan angka korelasi yang kecil, karena pada frekuensi tinggi amplitudo *floor noise* dan FRF terlalu jauh. Oleh karenanya diberikan faktor pembobot pada kurva FRF berupa *floor noise force* yang merupakan hasil bagi antara *floor noise* dengan FRF.

Gambar 19 berikut memperlihatkan kurva FRF yang telah diberi faktor pembobot dengan *floor noise* untuk beban 0 N vertikal kecepatan putar 600 rpm.



Gambar 19 Kurva *floor noise* dan *FRF weighted* beban 0 N vertikal kecepatan putar 600 rpm

Koefisien korelasi kurva *floor noise* dan *FRF weighted* yang didapatkan di sepanjang rentang frekuensi 1600 Hz ditunjukkan melalui Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5 berikut ini:

Tabel 3 Koefisien korelasi arah vertikal

		Beban (N)				
		0	200	400	600	Rata-rata
Kec Putar (rpm)	300	0,8793	0,8206	0,8146	0,7487	0,8158
	600	0,9100	0,8576	0,8208	0,8175	0,8515
	900	0,7390	0,7587	0,8233	0,7894	0,7776
	1200	0,7689	0,7236	0,7060	0,6648	0,7158
	Rata-rata	0,8243	0,7901	0,7912	0,7551	0,7902

Tabel 4 Koefisien korelasi arah horizontal

		Beban (N)				
		0	200	400	600	Rata-rata
Kec Putar (rpm)	300	0,8019	0,8087	0,7474	0,7556	0,7784
	600	0,7185	0,8246	0,7716	0,7754	0,7725
	900	0,6406	0,7828	0,7314	0,7630	0,7294
	1200	0,5870	0,7610	0,6813	0,6719	0,6753
	Rata-rata	0,6870	0,7943	0,7329	0,7415	0,7389

Tabel 5 Koefisien korelasi arah kombinasi

		Beban (N)				
		0	200	400	600	Rata-rata
Kec Putar (rpm)	300	0,6951	0,6797	0,6758	0,6828	0,6833
	600	0,5895	0,6637	0,5991	0,5566	0,6022
	900	0,5420	0,7168	0,7291	0,6999	0,6719
	1200	0,6072	0,8125	0,8122	0,6525	0,7211
	Rata-rata	0,6085	0,7182	0,7040	0,6479	0,6697

Toleransi diberikan sebesar 10% dari amplitudo kurva FRF. Hal tersebut diberikan untuk mengkompensasi kesalahan-kesalahan yang mungkin terjadi pada saat pengukuran dilakukan. Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8 memperlihatkan koefisien korelasi dengan toleransi 10%.

Tabel 6 Koefisien korelasi arah vertikal toleransi 10%

		Beban (N)				
		0	200	400	600	Rata-rata
Kec Putar (rpm)	300	0,9133	0,8613	0,8645	0,8035	0,8606
	600	0,9403	0,8990	0,8776	0,8619	0,8947
	900	0,7780	0,8046	0,8729	0,8433	0,8247
	1200	0,8083	0,7696	0,7790	0,7236	0,7701
	Rata-rata	0,8600	0,8336	0,8485	0,8081	0,8375

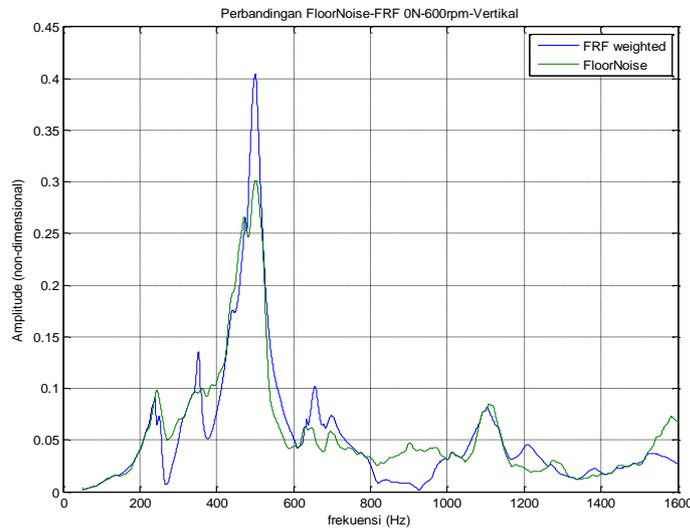
Tabel 7 Koefisien korelasi arah horizontal toleransi 10%

		Beban (N)				
		0	200	400	600	Rata-rata
Kec Putar (rpm)	300	0,8483	0,8666	0,7926	0,8116	0,8298
	600	0,7901	0,8858	0,8169	0,8433	0,8340
	900	0,7274	0,8581	0,7944	0,8325	0,8031
	1200	0,6833	0,8347	0,7483	0,7498	0,7540
	Rata-rata	0,7623	0,8613	0,7880	0,8093	0,8052

Tabel 8 Koefisien korelasi arah kombinasi toleransi 10%

		Beban (N)				
		0	200	400	600	Rata-rata
Kec Putar (rpm)	300	0,7540	0,7439	0,7340	0,7466	0,7446
	600	0,6660	0,7243	0,6596	0,6037	0,6634
	900	0,6198	0,7777	0,7954	0,7588	0,7379
	1200	0,6910	0,8595	0,8494	0,7040	0,7760
	Rata-rata	0,6827	0,7763	0,7596	0,7033	0,7305

Gambar 20 berikut memperlihatkan kurva FRF dan *floor noise* 0 N vertikal dengan kecepatan putar 600 rpm dan toleransi 10%.



Gambar 20 Kurva *floor noise* dan FRF *weighted* toleransi 10% beban 0 N vertikal kecepatan putar 600 rpm

7 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil pengukuran spektrum frekuensi menunjukkan adanya pola menyerupai hasil pengukuran FRF pada *floor noise* yang disebabkan oleh adanya fenomena gesekan gelinding (*rolling friction*) antara elemen gelinding.
2. Pola FRF yang terlihat pada *floor noise* dipengaruhi oleh kecepatan putar dan besarnya beban yang diberikan.
3. Koefisien korelasi memperlihatkan adanya keserupaan antara kurva FRF dan spektrum frekuensi dengan harga korelasi rata-rata sebesar 0.75.
4. Hasil pengukuran FRF struktur menunjukkan perbedaan dengan hasil pengukuran serupa dalam penelitian sebelumnya. Frekuensi pribadi struktur cenderung banyak pada frekuensi tinggi.

8 Nomenklatur

α_{jk}	FRF <i>receptance</i>	l	Panjang <i>roller</i>
ξ	Rasio redaman	M	Massa
σ	Tegangan normal	p	<i>Pole</i>
ϕ	Modus getar	Q	Beban pada elemen gelinding
ψ	Modus getar yang dinormalkan	r	Koefisien korelasi
ω	Kecepatan putar	S	Kovarian
b	Sumbu minor dari elips kontak	x	Simpangan
C	Redaman	\dot{x}	Kecepatan
F	Gaya Eksitasi	\ddot{x}	Percepatan
K	Kekakuan	y	Jarak pada arah sumbu-y

9 Pustaka

- [1] Kalpakjian, Serope, *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley Longman, 1989
- [2] Harris, Tedric, A., *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley & Sons, INC., 1991
- [3] Ewins, D.J, *Modal Testing: Theory and Practice*, John Wiley & Sons (SEA) PTE Ltd., 1984
- [4] Richardson, M.H and Rormenti, David L., *Parameter Estimation from Frequency Response Measurement Using Rational Fraction Polynomials*, Structural Measurement Systems, Inc., California, 1982
- [5] Rochim, Taufiq, *Spesifikasi, Metrologi, dan Kontrol Kualitas Geometrik*, Penerbit ITB, 2001
- [6] Tumbuan, Tobias P, *Analisis Ciri Getaran Bantalan Roll dengan Pembebanan Statik*, Tugas Sarjana, Program Studi Teknik Mesin, FTMD-ITB, 2008

10 Ucapan terima kasih penulis

Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada pihak ITB yang telah memberikan dana *voucher* melalui jalur *fast-track* untuk program Magister di Prodi Teknik Mesin, FTMD, sehingga memungkinkan penyelesaian kegiatan penelitian ini pada waktunya.