

## **KAJI EKSPERIMENTAL CIRI GETARAN PADA BANTALAN ROL DENGAN PEMBEBANAN STATIK**

**K. Magiano<sup>1</sup> & K. Bagiasna<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Asisten riset, Mahasiswa magister *fast track*, Program Studi Teknik Mesin ITB

<sup>2</sup>Lab. Dinamika, Pusat Rekayasa Industri, Fakultas Teknik Mesin & Dirgantara, ITB

Kontak: Komang Bagiasna, k.bagiasna@gmail.com

**Ringkasan.** Setiap cacat pada bantalan gelinding memiliki ciri respon getaran tertentu yang dapat diamati dari waveform maupun spektrum frekuensinya, seperti pada frekuensi sideband yang mengindikasikan adanya modulasi pada sinyal cacat tersebut. Sehubungan dengan itu penelitian ini dilaksanakan untuk mengkaji karakteristik respon getaran pada bantalan roll akibat beban statik dan permukaan bantalan yang bergelombang (*waviness*). Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian FRF (Fungsi Respon Frekuensi) untuk mengetahui karakteristik dinamik obyek uji, dan pengujian spektrum frekuensi bantalan uji untuk mengukur respon getaran yang terjadi pada bantalan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa harga putaran dan harga pembebanan statik dalam arah horizontal, vertikal dan kombinasi keduanya. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa terdapat Roll Passage Frequency (RPF) beserta *sidebandnya* akibat pembebanan statik, dan ditemukannya *waviness* dengan orde 4 pada lintasan dalam dan orde 6 pada lintasan luar bantalan.

**Abstract.** Any rolling bearing defect has a certain vibration response signature which can be observed through its waveform as well as frequency spectrum, such as the sideband frequencies, which indicate there is modulation phenomena among the vibration response signals. This research was carried out to study the vibration response signatures in the roll bearings due to the interaction between the static load and bearing inner/outer race waviness. This experimental research consists of FRF (Frequency Response Function) measurements to obtain the dynamic characteristics of the rolling bearing vibration, and power spectrum testing to measure the vibration response that occurs in the bearing. The shaft speed and static loads (vertical, horizontal, combination) are varied during the experimental study. Experimental results reveal Roll Passage Frequency (RPF) and its sidebands caused by the static load, and it was also found that waviness in the order of 4 at the inner race and in the order of 6 at the outer race of the bearing.

**Keywords:** Bantalan rol silindrik, pembebanan statik, RPF, *waviness*, gaya kontak Hertzian

## 1 Pendahuluan

Kegiatan perawatan mesin pada suatu industri memegang peranan penting dalam keberlangsungan proses produksi industri tersebut. Terdapat beberapa metode perawatan yang dapat diterapkan pada permesinan di industri, yaitu perawatan berbasis pemakaian hingga rusak (*run to breakdown maintenance*), perawatan berbasis waktu (*preventive maintenance*) dan perawatan berbasis pemantauan kondisi mesin (*condition based maintenance*). Pemilihan metode perawatan ini didasarkan dari seberapa besar peran dari mesin tersebut.

Metode perawatan mesin berbasis pemantauan kondisi mesin sangat cocok untuk diterapkan pada mesin-mesin yang vital dan tak tergantikan dalam proses produksi. Dengan menjalankan metode ini *down time* akibat kerusakan mesin dapat dikurangi. Selain itu, penggantian komponen yang masih bekerja dengan baik dapat dihindarkan.

Pada umumnya mesin rotasi di industri menggunakan bantalan sebagai penumpunya. Karena berfungsi sebagai penumpu, pada bantalan terletak titik tangkap berbagai gaya eksitasi getaran pada elemen rotasi sehingga pengukuran getaran umumnya dilakukan pada rumah bantalan. Dengan demikian dapat dianalisis sumber getaran yang terjadi dengan membandingkan antara respon getaran yang terjadi dengan ciri respon getaran teoritik akibat adanya cacat dari tiap-tiap komponen.

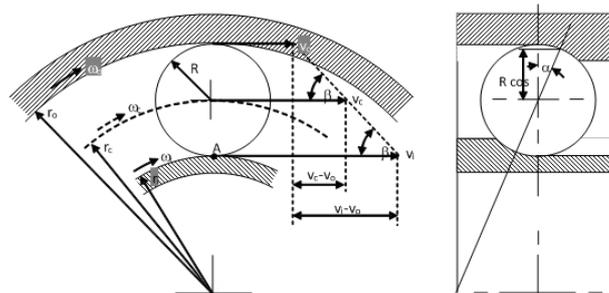
Pada penelitian ini akan dikaji ciri getaran pada bantalan *roll* yang mengalami beban statik. Penelitian mengenai ciri getaran pada bantalan *roll* telah dilakukan oleh Tumbuan [1], Bintoro [2] dan Adisaputra [3]. Pada penelitian Tumbuan telah dikembangkan model ciri getaran pada bantalan akibat adanya beban statis, sedangkan dari penelitian Bintoro dapat diketahui ciri getaran teoritik pada bantalan akibat adanya *waviness* pada bantalan. Berdasarkan kedua penelitian tersebut, maka dilakukan identifikasi cacat yang terjadi pada bantalan yang mengalami beban statis.

## 2 Cacat Pada Bantalan Gelinding

### 2.1 Cacat Lokal Pada Bantalan Gelinding

Penyebab utama timbulnya getaran pada bantalan *roll* yang berputar adalah terdapatnya cacat lokal pada salah satu atau beberapa bagian dari bantalan *roll*. Bersamaan dengan adanya cacat lokal maka timbul pula gaya eksitasi berupa gaya impuls pada bantalan *roll*. Frekuensi timbulnya gaya eksitasi ini bergantung dari bagian bantalan yang mengalami cacat dan kecepatan angular

dari komponen bantalan gelinding. Kecepatan angular komponen bantalan gelinding dapat diturunkan dengan bantuan Gambar 1 sebagai berikut.



**Gambar 1** Kinematika Bantalan Gelinding [1]

Dari penelitian bantalan gelinding[1], telah dikenalkan jenis-jenis cacat pada bantalan gelinding, yaitu:

1. *Fundamental Train Frequency (FTF)*

FTF merupakan ciri getaran yang muncul sebagai akibat adanya kerusakan pada sangkar (*cage*) bantalan. Cacat pada sangkar akan menimbulkan gaya eksitasi dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi putar sangkar.

2. *Ball Pass Frequency Inner (BPFI)*

BPFI merupakan ciri getaran yang muncul sebagai akibat adanya cacat pada lintasan dalam bantalan. Frekuensi ciri getaran akibat cacat pada lintasan dalam dapat dihitung dengan mengalikan jumlah elemen gelinding dengan frekuensi putar lintasan dalam relatif terhadap sangkar.

3. *Ball Pass Frequency Outer (BPFO)*

BPFO merupakan ciri getaran yang muncul sebagai akibat adanya cacat pada lintasan luar bantalan. Frekuensi gaya akibat cacat pada lintasan luar dapat dihitung dengan mengalikan jumlah elemen gelinding dengan frekuensi putar lintasan luar relatif terhadap sangkar.

4. *Roller Passage Frequency (RPF)*

RPF merupakan ciri getaran yang muncul pada bantalan yang diberikan pembeban statik. Nilai frekuensi gaya dari RPF ini sama dengan frekuensi gaya yang timbul akibat BPFO.

#### 5. Ball Spin Frequency (BSF)

Cacat pada elemen gelinding akan menimbulkan ciri getaran dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi elemen gelinding relatif terhadap sumbu elemen gelinding tersebut.

Berdasarkan gambar dan definisi yang dijelaskan sebelumnya, maka dapat dicari persamaan cacat lokal pada bantalan gelinding. Persamaan tersebut dirangkum pada Tabel 1 sebagai berikut.

**Tabel 1** Persamaan Cacat Lokal Pada Bantalan Gelinding [1]

<b>Persamaan umum cacat local bantalan gelinding</b>
$FTF = \frac{\omega_c}{2\pi}$ $\omega_c = \frac{1}{2}(\omega_i(1 - \gamma \cos \alpha) + \omega_o(1 + \gamma \cos \alpha))$
$BSF = \frac{\omega_R}{2\pi}$ $\omega_R = \frac{1}{2\gamma}(1 - (\gamma \cos \alpha)^2)(\omega_o - \omega_i)$
$BPFO = z \frac{\omega_{oc}}{2\pi}$ $\omega_{oc} = \frac{1}{2}(1 - \gamma \cos \alpha)(\omega_o - \omega_i)$
$BPFI = z \frac{\omega_{ic}}{2\pi}$ $\omega_{ic} = \frac{1}{2}(1 + \gamma \cos \alpha)(\omega_i - \omega_o)$

Besaran  $\omega_c$  adalah frekuensi putar sangkar,  $\alpha$  adalah sudut kontak bantalan,  $\omega_o$  adalah kecepatan putar lintasan luar,  $\omega_i$  adalah kecepatan putar lintasan dalam,  $\omega_{oc}$  adalah kecepatan lintasan luar relatif terhadap sangkar,  $\omega_{ic}$  adalah kecepatan lintasan dalam relatif terhadap sangkar,  $\gamma$  adalah perbandingan nilai

jari-jari elemen gelinding dengan jari-jari lintasan sangkar dan  $z$  adalah jumlah elemen gelinding.

## 2.2 Waviness Pada Bantalan Gelinding

*Waviness* merupakan salah satu bentuk ketidaksempurnaan permukaan *inner/outer race* bantalan gelinding hasil proses manufaktur. Cacat ini kemudian dapat mengubah besar defleksi elastik titik kontak elemen gelinding dengan lintasannya sehingga terjadi perubahan gaya kontak elemen ketika bantalan gelinding beroperasi. Perubahan besar gaya kontak elemen akan menjadi sumber gaya eksitasi internal (*internal excitation force*) yang bersama dengan gaya eksitasi eksternal (*external excitation force*) menjadi gaya eksitasi getaran pada bantalan.

Gaya eksitasi yang timbul akibat *waviness* dapat ditentukan dengan menganggap *waviness* dari bantalan sebagai defleksi elastik pada elemen bantalan. Jang [4] memodelkan profil defleksi pada alur luar ( $\delta_{ow}$ ), alur dalam ( $\delta_{iw}$ ) dan elemen gelinding ( $\delta_{bw}$ ) sebagai berikut,

$$\delta_{ow} = \sum_{l=1}^O A_{ol} \cos \left[ -l(\omega_o - \omega_c)t + \frac{2\pi l(j-1)}{N} \right] \quad (1)$$

$$\delta_{iw} = \sum_{l=1}^O A_{ol} \cos \left[ -l(\omega_i - \omega_c)t + \frac{2\pi l(j-1)}{N} \right] \quad (2)$$

$$\delta_{bw} = \sum_{l=1}^O C_{jl} \cos(l\omega_b t) + \cos(l\omega_b(t + \frac{\pi}{\omega_b})) \quad (3)$$

Gaya radial yang terjadi pada titik kontak elemen bantalan gelinding dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah kontak Hertzian, yang besarnya dinyatakan oleh Persamaan (4) berikut,

$$F_r = K_n (\delta_j(t))^n \quad (4)$$

dengan  $n = 1,5$  untuk bantalan bola dan  $n = 1,1$  untuk bantalan *roll*.

Gaya kontak Hertzian yang terjadi pada elemen gelinding tertentu dapat dihitung dengan memproyeksikan gaya kontak pada sumbu sensor pengukuran getaran. Apabila sudut antara sumbu referensi dan titik kontak elemen dengan lintasan diberi notasi  $\beta_j$  maka gaya kontak Hertzian dari bantalan didefinisikan sebagai berikut,

$$F_r = K_n (\delta_j(t))^n \cos \beta_j \quad (5)$$

Gaya kontak Hertzian ini terjadi pada elemen yang berkontak dengan lintasan dari bantalan. Artinya gaya kontak Hertzian ini berputar mengikuti kecepatan putar elemen gelinding. Dengan demikian, proyeksi gaya kontak Hertzian yang terjadi dapat dihitung dengan menganggap nilai  $\beta_j = \omega_c t$ . Sehingga Persamaan (5) dapat ditulis sebagai:

$$F_r = K_n(\delta_j(t))^n \cos \omega_c t \quad (6)$$

Dengan memisahkan variabel-variabel defleksi dengan gaya kontak yang ditimbulkannya, persamaan 6 dapat dituliskan sebagai berikut,

$$F_{ro} = K_n(\delta_{ow}(t))^n \cos \beta_j \quad (7)$$

$$F_{ri} = K_n(\delta_{iw}(t))^n \cos \beta_j \quad (8)$$

$$F_{rb} = K_n(\delta_{bw}(t))^n \cos \beta_j \quad (9)$$

### 3 Pengujian Perangkat Uji Bantalan

Untuk melihat respon getaran yang ditimbulkan bantalan akibat adanya pembebanan statik, dilakukan dua jenis pengujian, yaitu pengujian FRF bantalan dan pengujian spektrum frekuensi. Gambar *setup* pengujian bantalan ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2** Setup Pengujian Bantalan Gelinding

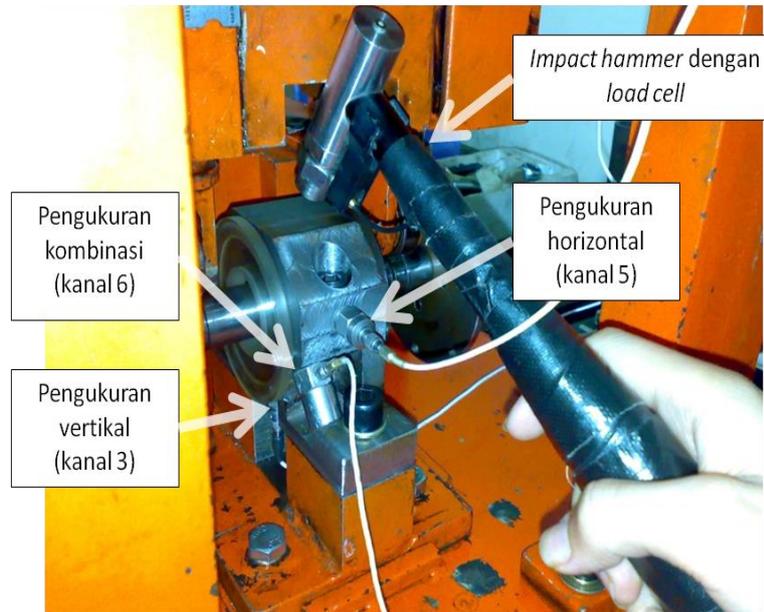
### 3.1 Pengujian FRF Bantalan

Pengujian FRF bantalan bertujuan untuk mengetahui karakteristik dinamik dari sistem rumah bantalan uji dan melihat pengaruh pembebanan statik terhadap frekuensi pribadi dari bantalan. Selanjutnya hasil FRF dari bantalan uji digunakan untuk mendapatkan spektrum gaya dari hasil pengujian respon getaran rumah bantalan. Berikut adalah parameter pengukuran dari pengujian FRF bantalan:

- *Window* : *Force/Exponential*
- *Averaging* : 10
- *Span frequency* : 1600 Hz
- *Frequency lines*: 3200

FRF bantalan dilakukan pada berbagai pembebanan serta arah pembebanan. Pembebanan statik yang diberikan adalah 0 N (kondisi referensi), 200 N, 400 N dan 600 N. Arah pembebanan ini diberikan dalam arah horizontal, vertikal dan kombinasi keduanya. Pengukuran FRF pada berbagai konfigurasi beban statik ini dilakukan tanpa mengubah posisi angular elemen gelinding

Pengujian dilakukan dengan mengukur respon getaran pada daerah *load zone* dan mengeksitasinya pada titik yang berlawanan 180° dengan titik pengukuran. Apabila beban diberikan dalam arah horizontal, maka sensor diletakkan pada daerah *load zone*-nya dan gaya eksitasi diberikan dalam arah horizontal pula. Titik pengukuran FRF bantalan ditunjukkan oleh Gambar 3.

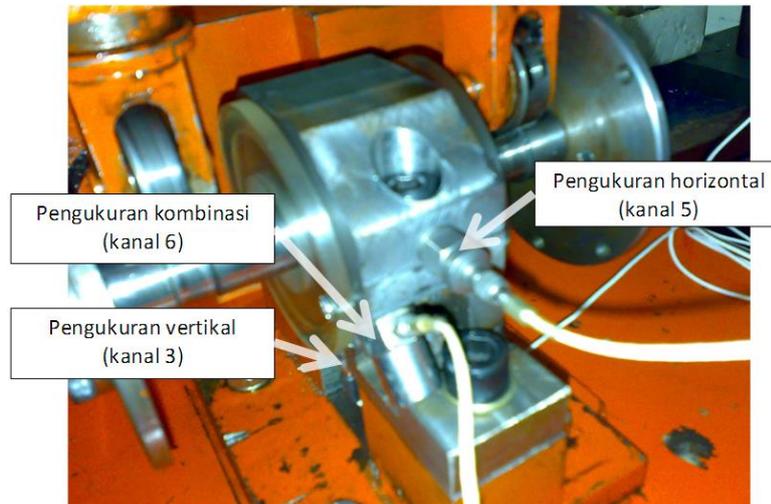


**Gambar 3** Letak titik pengukuran dan titik eksitasi pada pengukuran FRF bantalan

### 3.2 Pengujian spektrum frekuensi

Pengujian spektrum frekuensi bertujuan untuk mengukur respon getaran dari bantalan pada berbagai pembebanan dan kecepatan. Pengukuran respon getaran dilakukan pada kecepatan 300 rpm (5 Hz), 600 (10 Hz), 900 (15 Hz) dan 1200 (20 Hz). Nilai pembebanan yang diberikan pada pengujian ini sama dengan nilai pembebanan pada pengujian FRF yang dilakukan, yaitu 0 N (kondisi referensi), 200 N, 400 N dan 600 N.

Titik pengukuran respon getaran ditentukan berdasarkan arah pembebanan. Arah pembebanan diberikan dalam arah horizontal, vertikal dan kombinasi. Untuk lebih jelasnya, letak titik pengukuran ditunjukkan dalam Gambar 4.



**Gambar 4** Titik pengukuran spektrum frekuensi

## 4 Simulasi Pengaruh *Order Waviness* Terhadap *Vibration Signature*

### 4.1 Cacat Lokal Pada Bantalan Gelinding

Cacat lokal pada bantalan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan pada Tabel 2.1. Bantalan uji yang digunakan merupakan bantalan *roll* yang lintasan luarnya diam ( $\omega_o = 0$ ). Hasil perhitungan frekuensi cacat bantalan pada putaran 300 rpm, 600 rpm, 900 rpm dan 1200 rpm dicantumkan pada Tabel 2 sebagai berikut:

**Tabel 2** Frekuensi cacat lokal pada bantalan

Putaran motor (Hz)	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	BSF (Hz)	FTF (Hz)
5	26,3	38,7	12,5	2,0
10	52,5	77,5	25,1	4,0
15	78,8	116,2	37,6	6,1
20	105,0	155,0	50,2	8,1

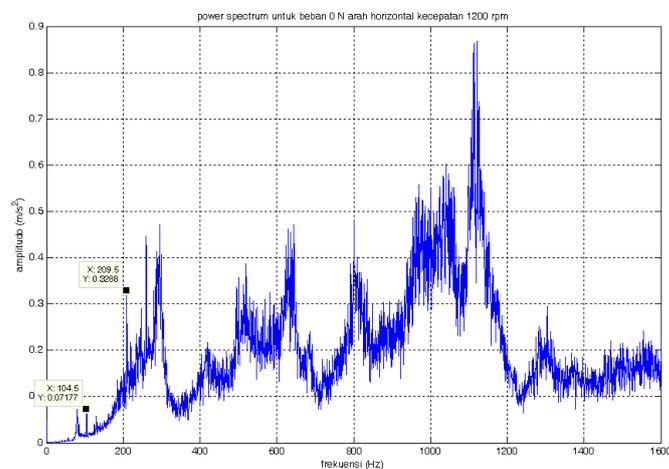
Selain empat jenis cacat tersebut, terdapat pula cacat pada bantalan sebagai akibat dari pemberian beban statik pada poros bantalan, yaitu *Roll Passage Frequency* (RPF). Tabel 3 berikut menunjukkan frekuensi cacat pada bantalan terbeban statik.

**Tabel 3** *Roll Passage Frequency* pada berbagai kecepatan putar motor

Putaran Motor	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz
RPF	26,3 Hz	52,5 Hz	78,8 Hz	105,0 Hz

Dapat diamati dari tabel di atas bahwa frekuensi cacat akibat pembebanan statik (RPF) dengan frekuensi cacat lokal pada alur luar bantalan (BPFO) memiliki nilai yang sama. Karena penelitian dilakukan pada bantalan terbeban statik, maka diasumsikan bahwa frekuensi cacat yang timbul bukan berasal dari cacat lokal pada alur luar bantalan tetapi berasal dari pembebanan statik yang diberikan.

Gambar 5 merupakan contoh hasil pengukuran spektrum frekuensi bantalan dalam kondisi referensi arah horizontal pada putaran 1200 rpm. Dari gambar ini dapat diamati bahwa terdapat frekuensi puncak yang sesuai dengan frekuensi akibat cacat pada lintasan luar bantalan (BPFO). Selain itu, dapat diamati pula bahwa terdapat harmonik BPFO pada pengukuran.



**Gambar 5** Spektrum frekuensi arah horizontal kondisi referensi dan kecepatan 1200 rpm

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Adisaputra [3], ditemukan bahwa kemunculan RPF selalu di ikuti *sideband frequency*. Disebutkan bahwa pada kondisi sebenarnya, gaya kontak Hertzian yang terjadi pada *load zone* besarnya tidak konstan, namun merupakan fungsi dari jumlah elemen rol silindrik ( $Z$ ) dikalikan dengan kecepatan putar sangkar ( $\omega_c$ ). Secara fisik artinya gaya statik yang menimbulkan gaya kontak Hertzian hanya diteruskan ke lintasan luar ketika elemen rol silindrik melewati *load zone*. Oleh karena itu gaya kontak Hertzian yang timbul merupakan fungsi dari jumlah elemen rol silindrik dikalikan dengan kecepatan putar sangkar atau dapat disebut juga *ball passage frequency* dan persamaan gaya kontak Hertzian tersebut dapat dituliskan sebagai fungsi *cosinus/sinus* seperti berikut:

$$Q = K_n \times \delta_{max}^n \times \cos(Z\omega_c) \quad (10)$$

$$Q = K_n \times \delta_{max}^n \times \sin(Z\omega_c) \quad (11)$$

di mana  $Z$  adalah jumlah elemen roll silindrik dan  $\omega_c$  adalah kecepatan putar sangkar (rad/s).

Pada kenyataannya, Persamaan (10) dan (11) bukan merupakan fungsi *cosinus/sinus* murni namun merupakan fungsi *cosinus/sinus* yang terdistorsi. Fungsi *cosinus/sinus* yang terdistorsi akan mengakibatkan munculnya harmonik dari frekuensi dasar fungsi *cosinus/sinus* tersebut. Oleh karena itu Persamaan (10) dan (11) harus mengandung komponen harmonik dari frekuensi dasarnya, yaitu  $Z\omega_c$  sehingga Persamaan (10) dan (11) dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

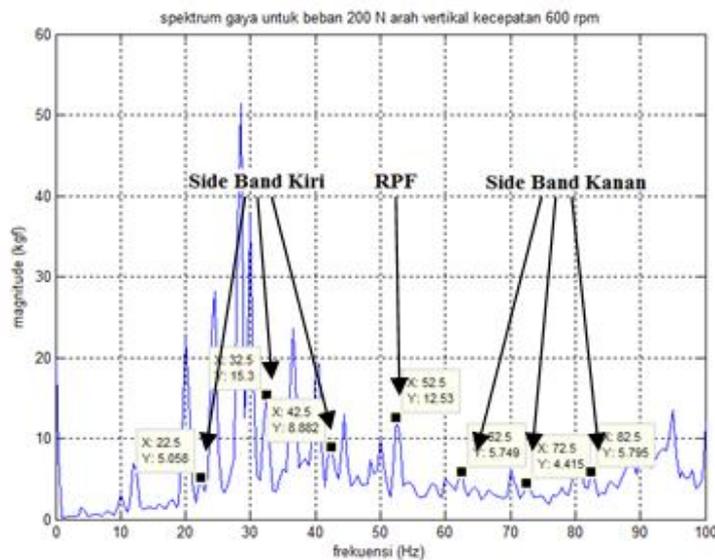
$$Q = K_n \times \delta_{max}^n \times \cos(mZ\omega_c) \quad (12)$$

$$Q = K_n \times \delta_{max}^n \times \sin(mZ\omega_c) \quad (13)$$

di mana  $m$  adalah jumlah harmonik sepanjang *span* frekuensi analisis.

Apabila sinyal gaya kontak Hertzian tersebut semakin terdistorsi maka jumlah harmonik yang muncul akan semakin banyak. Berdasarkan penelitian tersebut [3], pada penelitian ini akan diidentifikasi kemunculan dari *sideband frequency* dari hasil eksperimen. Gambar 6 merupakan contoh spektrum gaya pada beban 0 N dan putaran 600 rpm (10 Hz). Spektrum gaya merupakan hasil pembagian antara spektrum frekuensi dengan fungsi respon frekuensinya (FRF), sehingga frekuensi dari gaya yang mengeksitasi struktur lebih jelas terlihat. Dari Gambar 6 terlihat jelas munculnya RPF beserta *sidebandnya*. Dengan mengetahui adanya RPF dan *sidebandnya*, dilakukan identifikasi adanya frekuensi-frekuensi tersebut dari hasil eksperimen. Tabel kemunculan RPF beserta *sidebandnya*

pada tiap pengujian ditunjukkan oleh Tabel 4 sampai Tabel 6. Dari tabel ini, dapat diidentifikasi bahwa RPF dan *sidebandnya* pada setiap pengujian yang dilakukan termasuk pada beban 0 N. Anomali sinyal RPF pada beban 0 N diperkirakan timbul akibat dari berat poros atau pemasangan bantalan yang tidak sempurna pada rumahnya. Maka dapat dibuktikan bahwa beban statik pada bantalan dapat membangkitkan sinyal frekuensi yang sama dengan sinyal BPFO.



**Gambar 6** Roll passage frequency (RPF) beserta *sidebandnya*

Gambar 7 sampai Gambar 9 menunjukkan perbandingan amplitudo RPF dari respon getaran terhadap variasi beban yang diberikan dalam arah horizontal, vertikal dan kombinasi keduanya.

Berdasarkan Persamaan (4), beban statik yang terjadi ( $F_r$ ) sebanding dengan defleksi pada alur bantalan ( $\delta_j$ ). Oleh karena itu, peningkatan beban statik akan memperbesar amplitudo dari RPF. Dari Gambar 7 dapat diamati bahwa amplitudo RPF pada arah vertikal memiliki kecenderungan untuk turun hingga beban 400 N dan naik pada beban 600 N. Diperkirakan kecenderungan ini muncul akibat dari adanya pengaruh *clearance* bantalan pada pembebanan 0 N, 200 N dan 400 N, sehingga respon getaran yang terjadi lebih besar. Untuk kenaikan amplitudo dari 400 N ke 600 N diperkirakan merupakan akibat penambahan beban yang diberikan. Dari gambar 8 dapat diamati bahwa amplitudo RPF pada arah horizontal memiliki kecenderungan untuk naik seiring penambahan beban yang diberikan. Kenaikan amplitudo RPF arah horizontal

terhadap beban ini sesuai dengan teori yang ada. Gambar 9 menunjukkan bahwa amplitudo RPF arah kombinasi tidak memiliki kecenderungan apapun.

**Tabel 4** Kemunculan RPF dan *sideband* pengujian arah vertikal

Beban	Putaran (rpm)	RPF	Sideband kiri	Sideband kanan
0 N	300	√	√	√
	600	√	√	-
	900	√	√	√
	1200	√	√	√
200 N	300	√	√	√
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	√	√
400 N	300	√	√	√
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	-	-
600 N	300	√	√	√
	600	√	√	-
	900	√	√	√
	1200	-	-	-

√ = Ada

- = Tidak Ada

**Tabel 5** Kemunculan RPF dan *sideband* pengujian arah horizontal

Beban	Putaran (rpm)	RPF	Sideband kiri	Sideband kanan
0 N	300	√	-	-
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	√	√
200 N	300	√	√	√
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	√	√
400 N	300	√	-	-
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	-	-
600 N	300	√	√	√
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	√	√

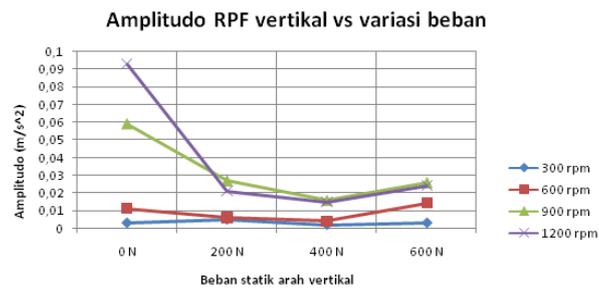
√ = Ada

- = Tidak Ada

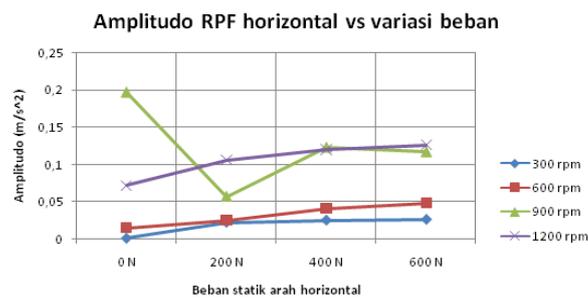
**Tabel 6** Kemunculan RPF dan *sideband* pengujian arah kombinasi

Beban	Putaran (rpm)	RPF	Sideband kiri	Sideband kanan
0 N	300	√	√	√
	600	√	√	-
	900	√	√	√
	1200	√	√	√
200 N	300	√	√	√
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	√	√
400 N	300	√	√	√
	600	√	√	√
	900	√	√	√
	1200	√	-	-
600 N	300	√	√	√
	600	√	√	-
	900	√	√	√
	1200	-	-	-

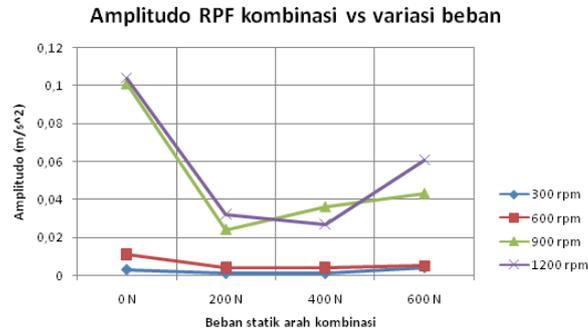
√ = Ada  
 - = Tidak Ada



**Gambar 7** Grafik amplitudo RPF arah vertikal terhadap variasi beban

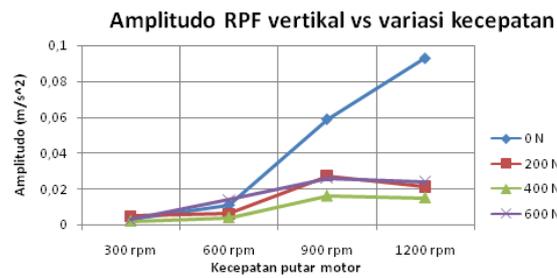


**Gambar 8** Grafik amplitudo RPF arah horizontal terhadap variasi beban

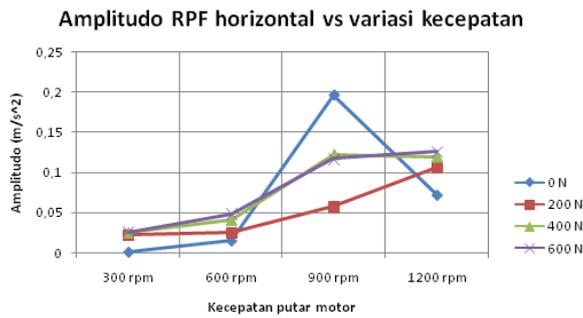


**Gambar 9** Grafik amplitudo RPF arah kombinasi terhadap variasi beban

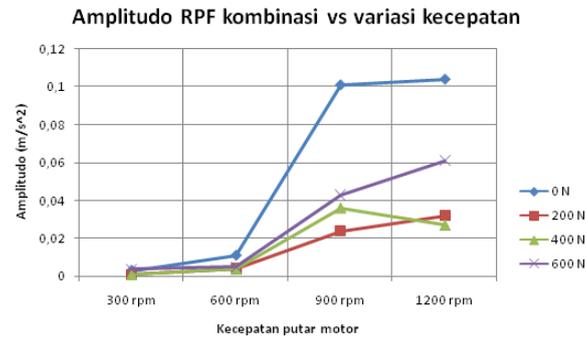
Selain dibandingkan terhadap perubahan beban, amplitudo RPF pengujian dibandingkan pula terhadap perubahan kecepatan putar motor. Perbandingan amplitudo RPF terhadap perubahan kecepatan putar motor ditunjukkan Gambar 10 sampai Gambar 12.



**Gambar 10** Grafik amplitudo RPF arah vertikal terhadap perubahan kecepatan putar

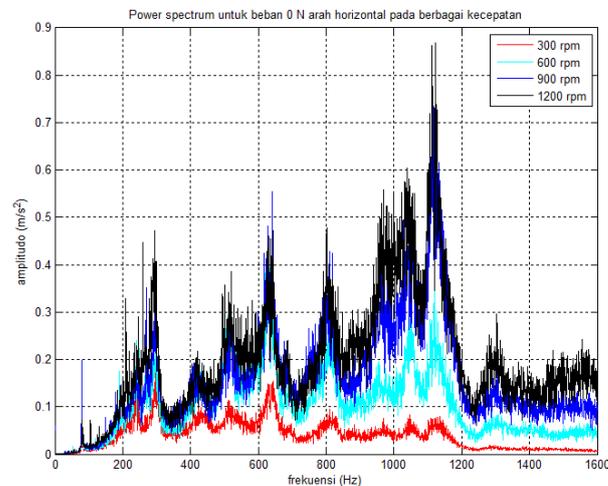


**Gambar 11** Grafik amplitudo RPF arah horizontal terhadap perubahan kecepatan putar



**Gambar 12** Grafik amplitudo RPF arah kombinasi terhadap perubahan kecepatan putar

Dari ketiga gambar tersebut, dapat dilihat bahwa amplitudo RPF memiliki kecenderungan membesar untuk setiap penambahan kecepatan putar motor. Hal ini dapat dimengerti, sebab amplitudo dari RPF berkaitan dengan respon getaran yang terjadi pada bantalan. Respon getaran dapat menggambarkan energi yang terkandung dalam getaran yang terjadi dan energi tersebut berbanding lurus terhadap kuadrat kecepatan. Oleh karena itu amplitudo RPF memiliki kecenderungan membesar untuk setiap penambahan kecepatan putar motor. Hal ini dapat pula dibuktikan dari Gambar 13, yaitu spektrum frekuensi pada beban 0 N untuk setiap penambahan kecepatan. Dari gambar ini dapat diperhatikan bahwa respon getaran yang terjadi meningkat seiring penambahan kecepatan.



**Gambar 13** Spektrum frekuensi pada beban 0 N arah horizontal untuk berbagai kecepatan

#### 4.2 Cacat *Waviness* Pada Bantalan Gelinding

Pada penelitian ini, digunakan bantalan baru sebagai obyek ujinya. Oleh karena itu, cacat pada permukaan benda kerja akibat ketidakidealan proses manufaktur amat mungkin ditemukan pada bantalan ini. Jenis cacat permukaan benda kerja yang diteliti adalah *waviness*. Seperti yang sudah dijelaskan pada bab 2, gaya kontak Hertzian akibat *waviness* dapat dituliskan sebagai:

$$F_r = K_n(\delta_{ow}(t) + \delta_{iw}(t) + \delta_{bw}(t))^n \cos \omega_c t \quad (14)$$

Dengan memisahkan variabel-variabel defleksi dengan gaya kontak yang ditimbulkannya, Persamaan (14) dapat dituliskan persamaan sebagai berikut:

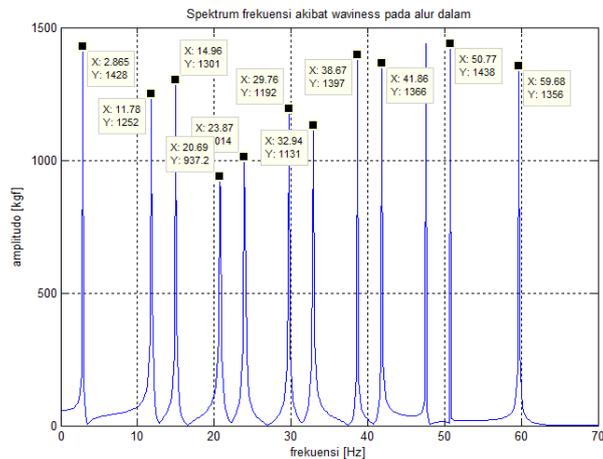
$$F_{ro} = K_n(\delta_{ow}(t))^n \cos \omega_c t \quad (15)$$

$$F_{ri} = K_n(\delta_{iw}(t))^n \cos \omega_c t \quad (16)$$

$$F_{rb} = K_n(\delta_{bw}(t))^n \cos \omega_c t \quad (17)$$

di mana  $F_{ro}$  merupakan gaya kontak akibat *waviness* alur luar,  $F_{ri}$  merupakan gaya kontak akibat *waviness* alur dalam dan  $F_{rb}$  merupakan gaya kontak akibat *waviness* pada elemen gelinding.

Gaya kontak dari masing-masing komponen bantalan ini dapat dicari kandungan frekuensinya dengan melakukan *Fast Fourier Transform* (FFT). Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mencari nilai frekuensi akibat cacat *waviness*. Gambar 14 merupakan contoh hasil simulasi perhitungan kandungan frekuensi akibat *waviness* pada lintasan dalam bantalan dalam dari orde 1 hingga 6 pada putaran 15 Hz. Kandungan frekuensi ini kemudian di tabelkan pada Tabel 7.



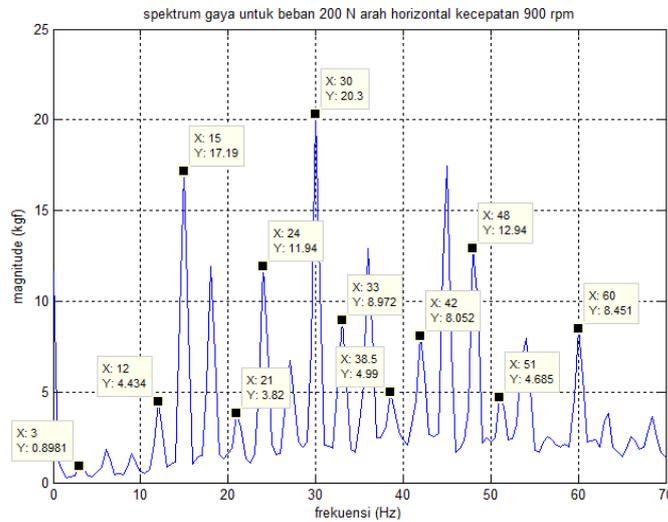
**Gambar 14** Spektrum frekuensi gaya *waviness* pada lintasan dalam

Dari hasil perhitungan, selanjutnya diidentifikasi adanya cacat *waviness* pada alur dalam dari bantalan yang diuji. Gambar 15 merupakan contoh spektrum gaya hasil pengujian pada beban 200 N arah horizontal dengan kecepatan putar 15 Hz. Pada gambar ini, tampak bahwa dari hasil eksperimen terdapat ciri respon getaran yang cocok dengan respon getaran akibat cacat pada lintasan dalam bantalan.

**Tabel 7** Kandungan frekuensi pengaruh orde *waviness* pada lintasan dalam

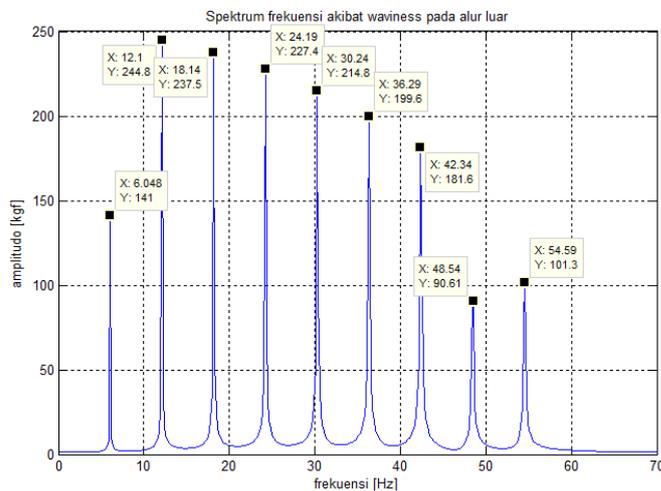
Orde <i>waviness</i>	Kandungan frekuensi cacat <i>waviness</i> pada alur dalam (Hz)										
1	2.9	-	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	11.8	-	-	23.9	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	20.8	-	-	32.9	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	29.7	-	-	41.8	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	38.7	-	-	50.8
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.6	59.7

Untuk mencari orde *waviness* dari lintasan dalam bantalan, dilakukan identifikasi pada seluruh hasil pengujian. Identifikasi dilakukan dari orde 1 hingga orde 14.



**Gambar 15** Spektrum frekuensi gaya akibat *waviness* pada lintasan dalam yang muncul pada eksperimen

Identifikasi cacat *waviness* dilanjutkan dengan identifikasi cacat *waviness* pada lintasan luar bantalan. Gambar 16 merupakan contoh hasil simulasi perhitungan kandungan frekuensi akibat cacat *waviness* pada lintasan luar bantalan dari orde 1 hingga 8 pada putaran 15 Hz. Kandungan frekuensi ini kemudian ditabelkan pada Tabel 8.



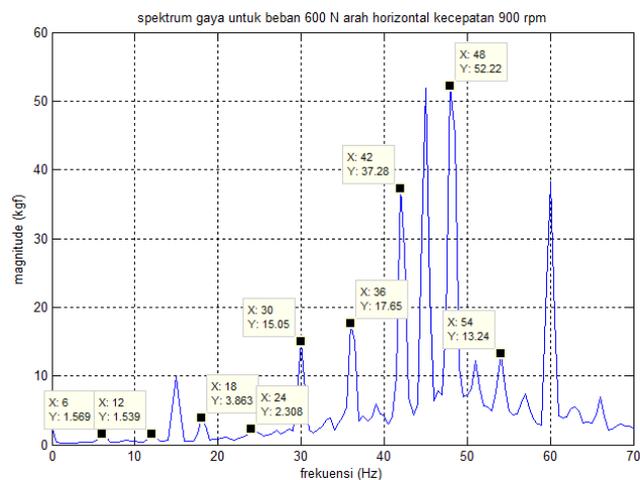
**Gambar 16** Spektrum frekuensi gaya *waviness* pada lintasan luar

**Tabel 8** Kandungan frekuensi pengaruh orde *waviness* pada lintasan luar

Orde <i>waviness</i>	Kandungan frekuensi cacat <i>waviness</i> pada alur luar (Hz)								
1	-	12.1	-	-	-	-	-	-	-
2	6.1	-	18.2	-	-	-	-	-	-
3	-	12.1	-	24.2	-	-	-	-	-
4	-	-	18.2	-	30.3	-	-	-	-
5	-	-	-	24.2	-	36.3	-	-	-
6	-	-	-	-	30.3	-	42.4	-	-
7	-	-	-	-	-	36.3	-	48.5	-
8	-	-	-	-	-	-	42.4	-	54.5

Dari hasil perhitungan, selanjutnya diidentifikasi adanya cacat *waviness* pada lintasan luar dari bantalan yang diuji. Gambar 17 merupakan contoh spektrum gaya hasil pengujian pada beban 600 N arah horizontal dengan kecepatan putar 15 Hz. Pada gambar ini, tampak bahwa dari hasil eksperimen terdapat ciri respon getaran yang cocok dengan respon getaran akibat cacat pada lintasan dalam bantalan.

Sama seperti sebelumnya, orde *waviness* dari lintasan luar bantalan akan dicari dengan melakukan identifikasi pada seluruh hasil pengujian. Identifikasi dilakukan dari orde 1 hingga orde 14.

**Gambar 17** Spektrum frekuensi gaya akibat *waviness* pada lintasan luar yang muncul pada eksperimen

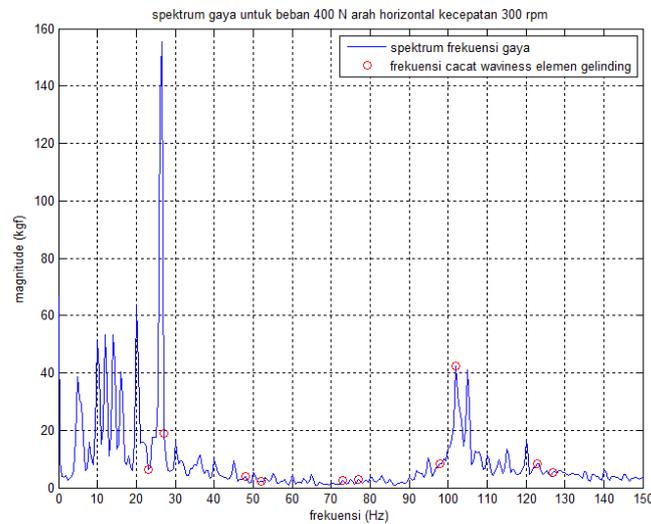
Cacat *waviness* yang terakhir diidentifikasi adalah cacat *waviness* pada elemen gelinding. Sama seperti cacat *waviness* pada lintasan dalam dan luar, identifikasi dimulai dengan melakukan simulasi mencari kandungan frekuensi

akibat cacat pada elemen gelinding. Kandungan frekuensi akibat cacat *waviness* pada elemen gelinding untuk berbagai kecepatan dengan orde 2 hingga 14 ditampilkan pada Tabel 9.

**Tabel 9** Kandungan frekuensi akibat *waviness* elemen gelinding

Orde <i>waviness</i>	Kandungan frekuensi akibat <i>waviness</i> elemen (Hz)			
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz
2	23.1	46.1	69.1	92.1
	27.1	54.1	81.1	108.2
4	48.1	96.1	144.2	192.3
	52.1	104.2	156.3	208.4
6	73.1	146.2	219.3	292.4
	77.1	154.3	231.4	308.5
8	98.1	196.3	294.4	392.5
	102.2	204.3	306.5	408.7
10	123.2	246.3	369.5	492.7
	127.2	254.4	381.7	508.9
12	148.2	296.4	444.7	592.9
	152.3	304.5	456.7	609.1
14	173.3	346.5	519.7	693.1
	177.3	354.6	513.9	709.2

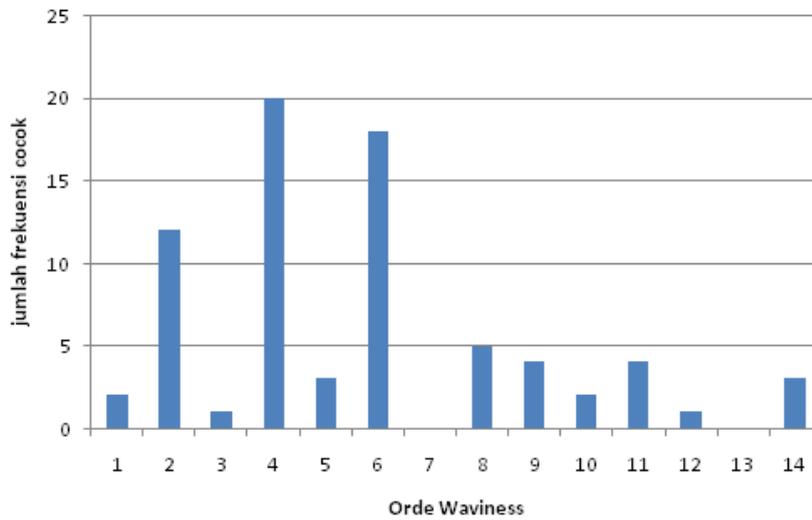
Simulasi dilanjutkan dengan identifikasi pada hasil eksperimen. Gambar 18 merupakan spektrum gaya pada beban 400 N arah horizontal pada kecepatan 300 rpm. Dapat diamati dari gambar bahwa tidak ada frekuensi puncak pada 23,1 Hz dan 27,1 Hz sampai dengan 173,2 Hz dan 177,3 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada satu pun frekuensi cacat akibat *waviness* elemen gelinding pada hasil eksperimen. Identifikasi dilakukan pula pada spektrum frekuensi gaya hasil pengukuran yang lain namun tetap tidak ditemukan frekuensi cacat akibat *waviness* ini.



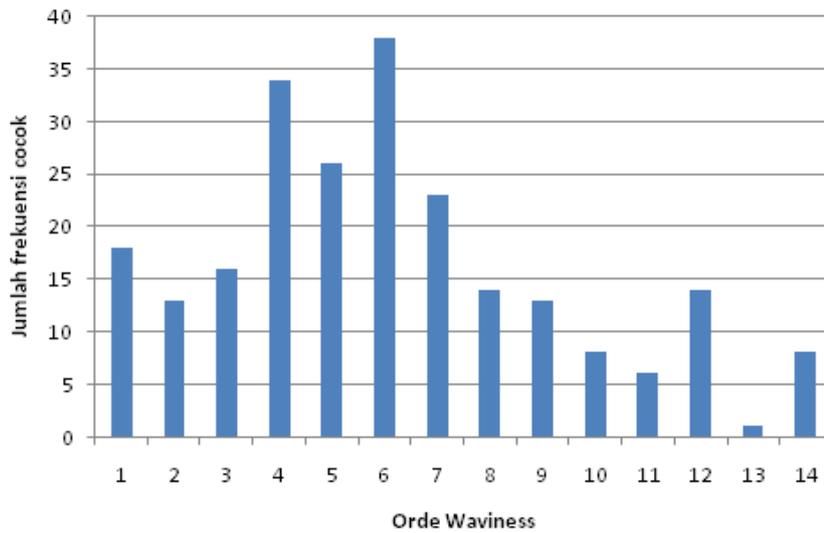
**Gambar 18** Identifikasi cacat *waviness* pada elemen gelinding

Untuk menentukan orde *waviness* yang terjadi, dilakukan analisis dengan membandingkan jumlah frekuensi cacat *waviness* yang cocok antara simulasi dengan hasil eksperimen untuk setiap orde. Gambar 19 berikut menampilkan grafik jumlah cacat *waviness* pada lintasan dalam yang cocok untuk setiap orde dan gambar 20 untuk cacat *waviness* pada lintasan luar bantalan. *Waviness* pada elemen gelinding tidak diperhitungkan sebab tidak ditemukan adanya kecocokan antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.

Dari Gambar 19 dan Gambar 20 dapat diketahui bahwa orde *waviness* yang dominan muncul pada lintasan dalam adalah 4 dan orde *waviness* pada lintasan luar adalah 6. Diperkirakan *waviness* ini timbul pada proses bubut. Untuk inner ring diperkirakan digunakan pencekaman 4 kaki dalam pembuatannya, sedangkan lintasan luar digunakan pencekaman 3 kaki.



**Gambar 19** Grafik Jumlah frekuensi cacat *waviness* lintasan dalam pada eksperimen



**Gambar 20** Grafik jumlah frekuensi cacat *waviness* lintasan luar pada eksperimen

## 5 Kesimpulan

Berdasarkan hasil kegiatan penelitian yang dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Bantalan terbeban statik akan memunculkan sinyal RPF beserta *sidebandnya*.
- b. Pada bantalan uji ditemukan adanya cacat *waviness*. Diperkirakan orde *waviness* pada lintasan dalam bantalan adalah 4 sedangkan pada lintasan luar adalah 6.
- c. Tidak ditemukan frekuensi cacat akibat *waviness* pada elemen gelinding.
- d. Terdapat fenomena ketidakseimbangan massa dari sistem poros.

## 6 Referensi

- [1] Tumbuan, *Analisis Ciri Getaran Bantalan Rol dengan Pembebanan Statik*, Tugas Sarjana, Program Studi Teknik Mesin, ITB, Bandung, 2008
- [2] Carolus Bintoro, *Analisis Teoritik dan Kaji Eksperimental Ciri Getaran Mekanik Akibat Keausan pada Bantalan Rol Silindrik*, Disertasi. Teknik Mesin, ITB, Bandung
- [3] I Wayan Adisaputra, *Kaji Eksperimental dan Pemodelan Respon Getaran Bntalan Rol Silindrik Akibat Pembebanan Statik dan Residual Unbalance*, Tesis, Program Studi Teknik Mesin, ITB, Bandung
- [4] G. H. Jang dan S. W. Jeong, *Nonlinear Excitation Model of Ball Bearing Waviness in a Rigid Rotor Supported by Two or More Ball Bearings Considering Five Degrees of Freedom*, Transaction of ASME 124 pp. 82-90, 2002