

PENGARUH RUBBING TERHADAP KONDISI GETARAN MESIN ROTASI

*Zudi Zukron Amin¹, Achmad Widodo², Ismoyo Haryanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: zudizukronamin@gmail.com

Abstrak

Pada penelitian ini, getaran pada rumah bearing yang diakibatkan gesekan rotor (*rubbing*) dikaji dengan mengaplikasikan seperangkat alat gesekan rotor (*mechanical rub kit*) pada simulator kerusakan mesin (*machinery fault simulator*). Pengaruh gesekan penuh (*full annular rub*) pada sistem mesin rotasi dengan mempertimbangkan perbedaan material gesek dan kecepatan rotasi poros dikaji secara eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tiga variasi material gesek yaitu aluminium, akrilik dan karet. Kemudian untuk variasi kecepatan rotasinya menggunakan 1000 rpm, 2000 rpm dan 3000 rpm. Getaran dari hasil gesekan poros pada rumah bearing di analisa. Hasil menunjukkan bahwa amplitudo getaran pada rumah bearing meningkat secara signifikan diikuti dengan kecepatan rotasi yang meningkat. Spektrum untuk material gesek lunak memiliki karakteristik unik, jadi bahwa tingkat getaran pada material lunak lebih rendah daripada getaran tanpa gesekan (*baseline*).

Kata kunci: Gesekan rotor (*rubbing*), gesekan penuh (*full annular rub*), spektrum getaran, rumah bearing, mesin rotasi

Abstract

In this study, the vibration on bearing housing caused by shaft rub was studied through applying a rotor rub device on a Machinery Fault Simulator (MFS). The effect of full annular rub on the rotating machinery system considering different rub materials and shaft running speeds was experimentally studied. Experiments were carried out for the rub materials – aluminium, hard plastic and soft plastic. Then experiment was carried out under three speeds, i.e., 1000, 2000 and 3000 RPMs. Vibration of shaft rub on bearing housing were analyzed. The results showed that the vibration amplitude of inboard bearing housing increased significantly with the shaft speed increased. The spectrum for the soft plastic rub material found to has a unique characteristic so that the vibration level was lower than the baseline (without rub material) vibration.

Keywords: *Rubbing, full annular rub, vibration spectrum, bearing housing, rotating machinery*

1. Pendahuluan

Sebagai syarat kebutuhan mesin yang banyak digunakan di industri menuntut kedudukan sistem mesin rotasi modern berperan menjadi sangat penting untuk mesin-mesin dengan kecepatan tinggi dan mempunyai tingkat getaran yang rendah. Mesin rotasi sering memiliki masalah ketidakstabilan ketika beroperasi pada kecepatan rotasi yang tinggi, dimana dapat mengakibatkan kegagalan secara tiba-tiba di seluruh sistem atau bagian mesin tersebut. Sistem mesin rotasi terdiri dari berbagai komponen yaitu poros, disk dan bearing. Komponen mesin yang berukuran besar dan fleksibel dapat menyerap dan menghilangkan energi ketika mengalami gangguan dan menghasilkan pola yang unik dari berbagai respon. Ada berbagai gesekan rotor (*rubbing*) yang dapat terjadi pada sistem mesin rotasi dengan lokasi gesekan yang berbeda seperti yaitu gesekan penuh (*full annular*), sebagian (*partial*), pantul (*bouncing*) dan lain sebagainya. Gesekan dapat juga terjadi dalam berbagai bentuk akibat getaran poros yang berlebihan, ketidakseimbangan massa atau awal *misalignment*. Hal itu dapat menjaga gesekan menjadi lebih kuat dan mengarah pada tingkat getaran yang lebih tinggi. Dengan demikian, gesekan rotor merupakan kontak yang tidak diinginkan antara bagian mekanik yang berputar dan diam [1].

Gesekan pada permukaan kontak menghasilkan gaya tangensial yang berujung pada arah berlawanan dengan kecepatan rotasi. Gaya gesekan tergantung gaya normal dan sifat permukaan yang merupakan parameter utama terhadap kelelahan permukaan pada lokasi kontak rotor atau stator. Gesekan juga dapat menghasilkan deposisi material dan juga akan mengubah kelonggaran dan kondisi permukaan kontak. Maka sebagai akibat hasil gesekan akan mempengaruhi operasi normal mesin dan biasanya melelahkan operasi [2].

Kontak fisik rotor dengan bagian stator (*stationary*) pada mesin rotasi, yang mana pada operasi normal harusnya tidak bersentuhan dan kemudian gesekan pada area kontak merupakan suatu ketidaknormalan yang serius pada mesin rotasi yang dapat mengakibatkan kerusakan mesin. Kontak pada bagian rotor terhadap stator mengakibatkan perubahan dalam keseimbangan gaya sistem dan kekakuan dinamik, dan menghasilkan perubahan gerakan mesin. Efek yang diakibatkan biasanya dikaitkan dengan penurunan energi yang tersedia untuk menjaga cara rotasinya karena kehilangan energi dan meningkatkannya level getaran [3].

Gangguan awal rotor pada keadaan stabil atau normal akan menyebabkan rotor melewati proses getaran transien. Selama proses tersebut, jarak yang diberikan rotor mungkin atau mungkin tidak terkontak dengan stator. Jika rotor beroperasi pada kecepatan sudut yang konstan (ω) dan tidak ada kontak antara rotor dan stator, teori getaran linier menyimpulkan bahwa pusat geometri rotor akan akhirnya berputar pada kecepatan dan arah yang sama sebagai rotasi rotor [4].

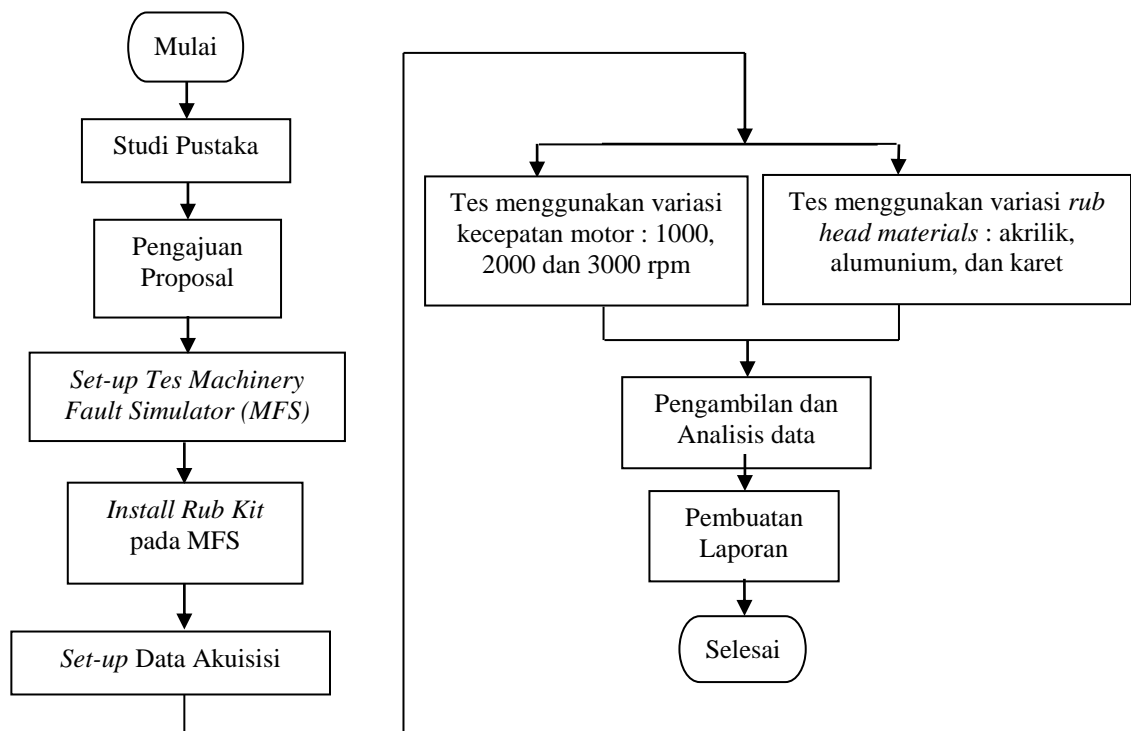
Tujuan penelitian ini adalah mengetahui karakteristik getaran yang disebabkan oleh gesekan rotor melalui spektrum sinyal getaran, mengetahui perbedaan gesekan rotor tanpa dan dengan gesekan menggunakan tiga jenis material (aluminium, akrilik dan karet) dengan variasi kecepatan rotasi (1000 rpm, 2000 rpm dan 3000 rpm), mengamati efek gesekan rotor pada spektrum sinyal getaran rumah bearing.

2. Metode penelitian

Metode penelitian dirancang untuk bisa memformulasikan diagnosa pengaruh gesekan rotor (*rubbing*) dengan sinyal getaran. Untuk mencapai tujuan ini pendekatan eksperimen di tingkat laboratorium dilakukan untuk mensimulasikan kondisi di lapangan.

2.1 Prosedur Penelitian

Diagram alir dibuat untuk memudahkan dalam mencapai tujuan dari eksperimen gesekan rotor (*rubbing*) pada system mesin rotasi. Mulai kemudian melakukan studi pustaka agar dapat memahami teori mengenai *rubbing* dan pengolahan sinyal menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Pengajuan proposal dilakukan untuk menentukan judul dan target selesai. Mempersiapkan *Machinery Fault Simulator (MFS)* untuk pengujian *rubbing*, kemudian memasang seperangkat data akuisisi pada MFS. Setelah data akuisisi terpasang kemudian memasang seperangkat alat gesek mekanik (*rub kit*). Pengujian mulai dilakukan dengan mengambil data getaran tanpa gesekan (*baseline*) dahulu pada kecepatan rotasi 1000, 2000 dan 3000 rpm. Selanjutnya, pengujian dilakukan menggunakan material gesek aluminium, akrilik dan karet pada kecepatan yang sama. Setelah mendapatkan data hasil pengujian dan dianalisa kemudian di buat laporan dan selesai.



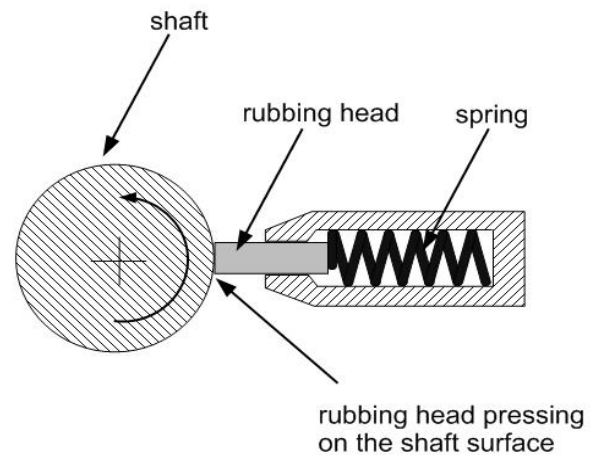
Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2 Alat dan Bahan Pengujian

Peralatan eksperimen dengan seperangkat alat gesekan mekanik (*mechanical rub kit*) untuk memahami karakteristik fenomena gesekan rotor di tunjukkan pada Gambar 2. Peralatan terdiri dari pemegang yang dapat disesuaikan (*adjustable tool holder*) selama material menggesek, batang vertikal (*vertical post*), batang horizontal dan penjepit mekanis. Pegas di dalam *tool holder* tertekan dan mendesak gaya dorong yang mana ujung rubbing melawan poros atau permukaan rotor pada MFS. Oleh karena itu, ujung rubbing akan menjaga kontak secara kontinyu dengan poros sepanjang waktu. Jenis rubbing disimulasikan dengan seperangkat alat gesek yang disebut gesekan penuh (*full annular rub*).



Gambar 2. Pemasangan *Mechanical Rub Kit* pada MFS



Gambar 3. Ujung rubbing menekan melawan poros [5].



Gambar 4. Pemasangan sensor arah radial vertikal dan horizontal pada rumah bearing

Getaran pada rumah bearing pada arah vertikal dan horizontal diukur dengan akselerometer. Akselerometer pada arah vertikal memiliki sensitivitas 101,330 mV/g. Akselerometer pada arah horizontal memiliki sensitivitas 100,05 mV/g. akselerometer dipasang tegak lurus 90^0 arah vertikal dan horisontal pada rumah bearing. Sistem terdiri dari data akuisisi (DAQ) yang menyediakan dua *channels* untuk akuisisi respon getaran dan satu *channels* untuk akuisisi kecepatan rotasi. *Channels DAQ* ditetapkan sebagai ch1 dan ch2 pada rumah bearing untuk mengukur respon getaran pada arah vertikal dan horisontal. Data dikelompokkan menggunakan *software VibraQuest™* dan *system hardware*. Sistem pengelompokan data terdiri dari *high bandwidth amplifier* didesain untuk sinyal getaran. Perekam data (*data recorder*) dilengkapi dengan *low-pass filter* pada tahap input untuk *anti-aliasing*. Resolusi yang digunakan 3200 *spectra lines* menggunakan Hanning window. Resolusi menandakan jumlah dari *lines* yang digunakan untuk mengplot spektrum. Untuk memahami gesekan rotor dan efeknya dalam getaran system, tiga kasus uji dilakukan. Jadi, pengaruh gesekan material dengan respon terhadap kecepatan rotasi poros menjadi pertimbangan utama. Poros pada MFS terbuat dari baja. Poros didukung dengan dua elemen bearing. Selama pengujian poros tidak dihubungkan dengan komponen

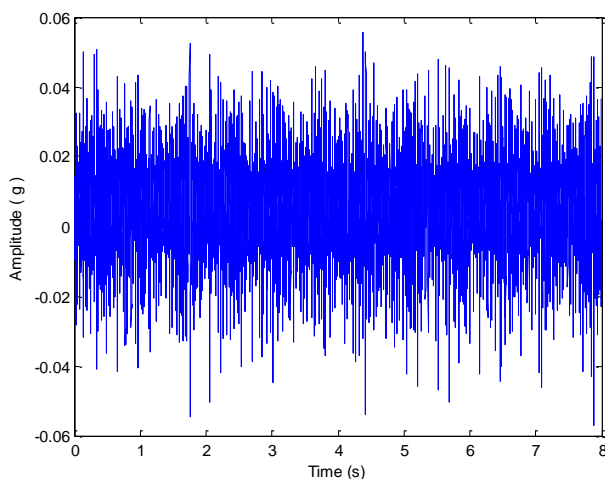
lain apapun kecuali motor induksi. Dua akselerometer dipasang pada rumah bearing dekat dengan kopling fleksibel pada arah radial horizontal dan vertikal untuk mengumpulkan data getaran.

3. Hasil dan Pembahasan

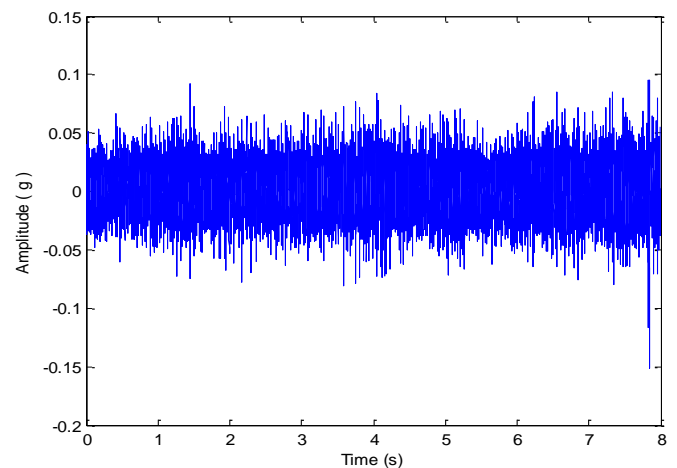
Penyebab gesekan rotor meliputi interaksi poros dengan gesekan mekanik (*mechanical rub*), perilaku dinamika rotor yang kompleks menghasilkan bermacam tanda getaran. Gesekan penuh (*full annular rub*) disimulasikan dengan tiga jenis material gesek yaitu: aluminium, akrilik dan karet. Eksperimen dilakukan dengan tiga variasi kecepatan rotasi 1000 rpm, 2000 rpm dan 3000 rpm.

3.1 Analisa Menggunakan Domain Waktu

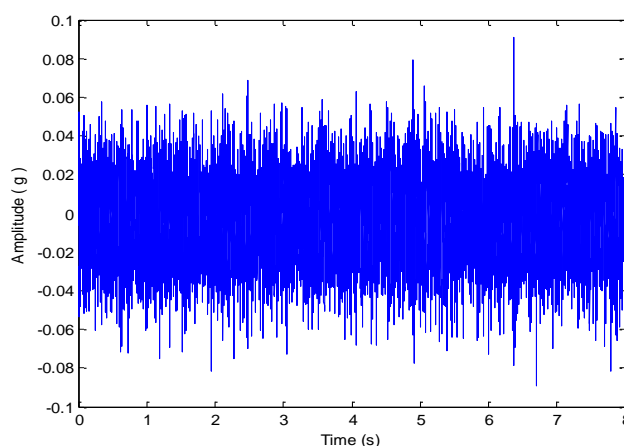
Sinyal getaran digunakan untuk menampilkan dan menganalisa percepatan di rumah bearing pada arah horizontal. Gambar 5 dan 6 tampilan domain waktu getaran tanpa gesekan (*baseline*) dan dengan gesekan poros menggunakan material aluminium dengan periode waktu yang sama pada kecepatan rotasi masing-masing 1000 rpm. Rentang amplitudo pada Gambar 5 sebesar 0,06 g. Rentang amplitudo pada Gambar 6 sebesar 0,15 g. Amplitudo getaran pada rumah bearing meningkat secara signifikan dengan gesekan rotor selama kecepatan rotasi 1000 rpm. Pada Gambar 7 dan 8 adalah tampilan domain waktu getaran tanpa gesekan dan dengan gesekan menggunakan material aluminium dengan periode waktu yang sama pada kecepatan rotasi masing-masing 2000 rpm. Rentang amplitudo pada Gambar 7 sebesar 0,1 g. Rentang amplitudo pada Gambar 8 sebesar 0,15 g. Amplitudo getaran pada rumah bearing meningkat dengan gesekan rotor selama kecepatan rotasi 2000 rpm. Pada Gambar 9 dan 10 adalah tampilan domain waktu getaran *baseline* dan dengan gesekan menggunakan material aluminium dengan periode waktu yang sama pada kecepatan rotasi masing-masing 3000 rpm. Rentang amplitudo pada Gambar 9 sebesar 0,15 g. Rentang amplitudo pada Gambar 10 sebesar 0,2 g. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa amplitudo getaran pada rumah bearing meningkat secara signifikan diikuti dengan kecepatan rotasi yang meningkat.



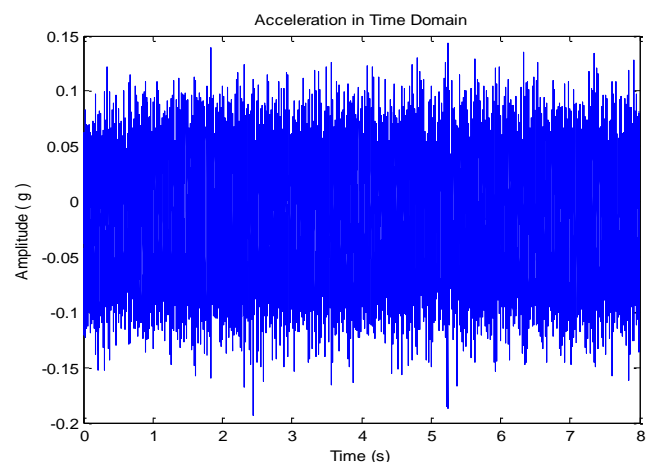
Gambar 5. Baseline 1000 rpm



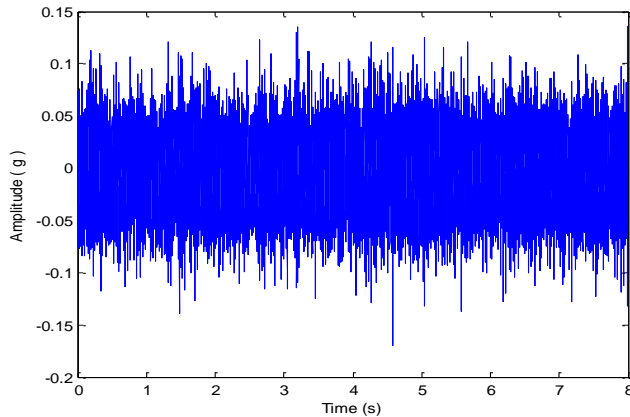
Gambar 6. Aluminium rub (1000 rpm)



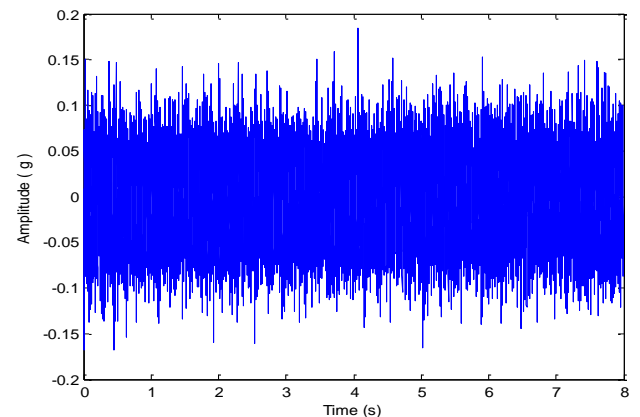
Gambar 7. Baseline (2000 rpm)



Gambar 8. Aluminium rub (2000 rpm)



Gambar 9. Baseline 3000 rpm



Gambar 10. Aluminium rub (3000 rpm)

3.2 Puncak Maksimum Amplitudo pada Rumah Bearing

Tabel 1, 2, 3 dan 4 menunjukkan nilai puncak maksimum pertama dan kedua dari spektrum frekuensi getaran pada arah vertikal dan horizontal untuk semua uji kasus dengan respon terhadap kecepatan rotasi poros. Perbandingan puncak maksimum pertama dan kedua pada rumah bearing arah radial vertikal terhadap puncak maksimum arah radial horizontal, getaran tanpa gesekan dan dengan gesekan mempunyai tingkat amplitudo yang sama dan level meningkat diikuti dengan kenaikan kecepatan rotasi poros.

Tabel 1. Puncak maksimum pertama pada arah vertikal

Kecepatan (rpm)	Tanpa Gesekan (inc/detik)	Gesekan Aluminium (inc/detik)	Gesekan Akrilik (inc/detik)	Gesekan Karet (inc/detik)
1000	0.002318	0.002428	0.002682	0.001524
2000	0.01186	0.01321	0.01336	0.0116
3000	0.01241	0.01574	0.01498	0.01235

Tabel 2. Puncak maksimum kedua pada arah vertikal

Kecepatan (rpm)	Tanpa Gesekan (inc/detik)	Gesekan Aluminium (inc/detik)	Gesekan Akrilik (inc/detik)	Gesekan Karet (inc/detik)
1000	0.001587	0.001449	0.001828	0.001367
2000	0.006024	0.005777	0.005812	0.005842
3000	0.01223	0.01194	0.01203	0.01039

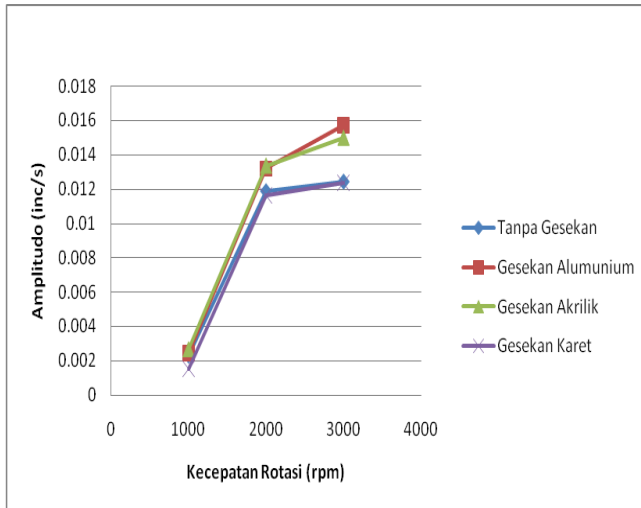
Tabel 3. Puncak maksimum pertama pada arah horizontal

Kecepatan (rpm)	Tanpa Gesekan (inc/detik)	Gesekan Aluminium (inc/detik)	Gesekan Akrilik (inc/detik)	Gesekan Karet (inc/detik)
1000	0.001558	0.00216	0.001804	0.001682
2000	0.0081	0.008304	0.01019	0.007415
3000	0.02152	0.02339	0.02235	0.0197

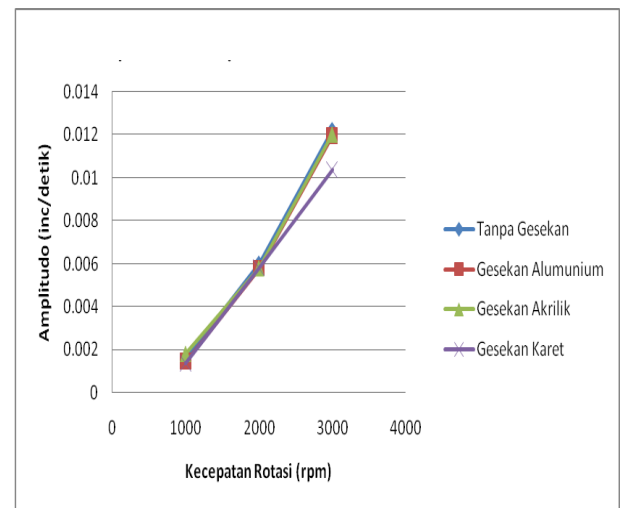
Tabel 4. Puncak maksimum kedua pada arah horizontal

Kecepatan (rpm)	Tanpa Gesekan (inc/detik)	Gesekan Aluminium (inc/detik)	Gesekan Akrilik (inc/detik)	Gesekan Karet (inc/detik)
1000	0.001423	0.001696	0.001736	0.00151
2000	0.003658	0.004718	0.004023	0.004249
3000	0.01979	0.02308	0.0213	0.01909

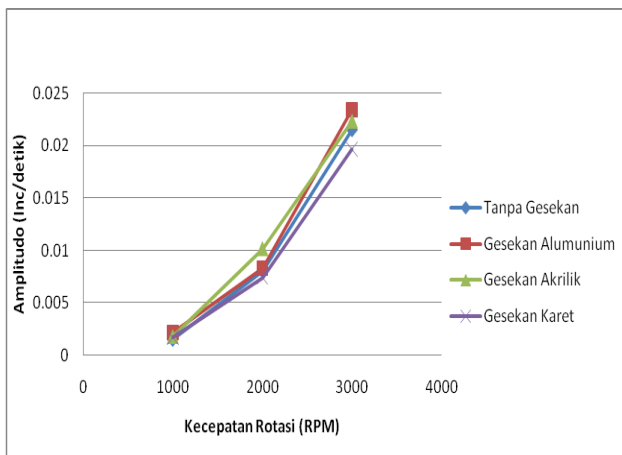
Untuk mengetahui karakteristik getaran pada rumah bearing pada arah radial vertikal dan horizontal, maka dari nilai puncak yang didapatkan dibuatlah plot yang menggambarkan karakteristik dari gesekan poros (*rubbing*). Selanjutnya dapat dilihat bahwa spektrum frekuensi dengan kecepatan poros lebih tinggi untuk material gesek keras mempunyai perbedaan yang signifikan terhadap material gesek lunak dan tanpa gesekan. Spektrum frekuensi untuk material gesek lunak atau menggunakan material karet mempunyai karakteristik unik, jadi bahwa material lunak berusaha untuk menyeimbangkan eksitasi struktur tanpa gesekan saat membandingkan dengan material keras yang digunakan. Hal itu dapat ditunjukkan pada Gambar 11, 12, 13 dan 14 amplitudo getaran rendah diperoleh selama kecepatan rotasi rendah sementara amplitudo tinggi diperoleh selama kecepatan rotasi tinggi.



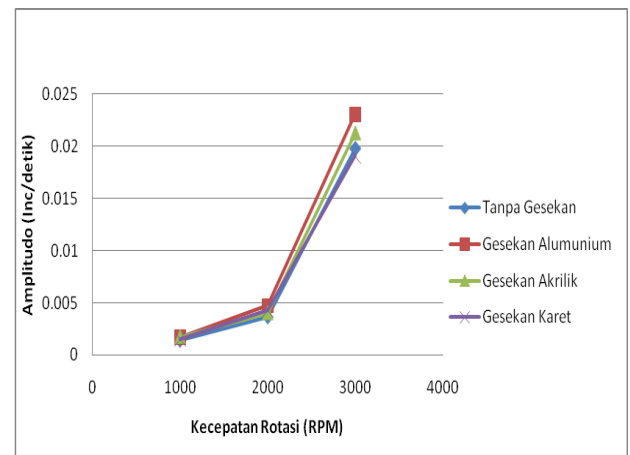
Gambar 11. Maksimum pertama (vertikal)



Gambar 12. Maksimum kedua (vertikal)



Gambar 13. Maksimum pertama (horisontal)

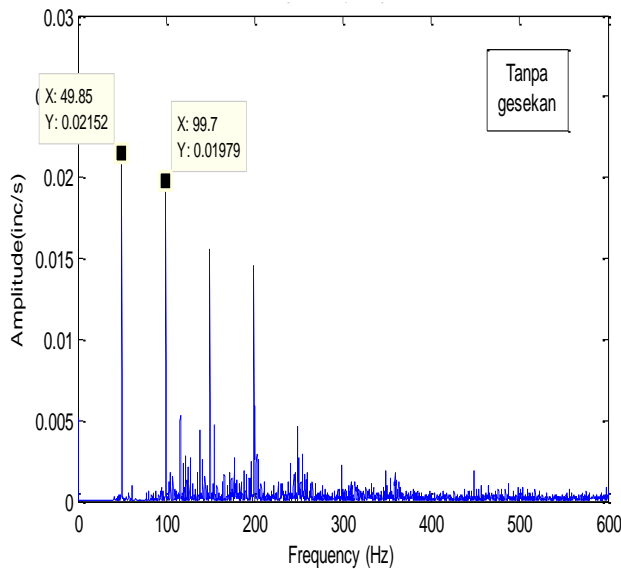


Gambar 14. Maksimum kedua (horisontal)

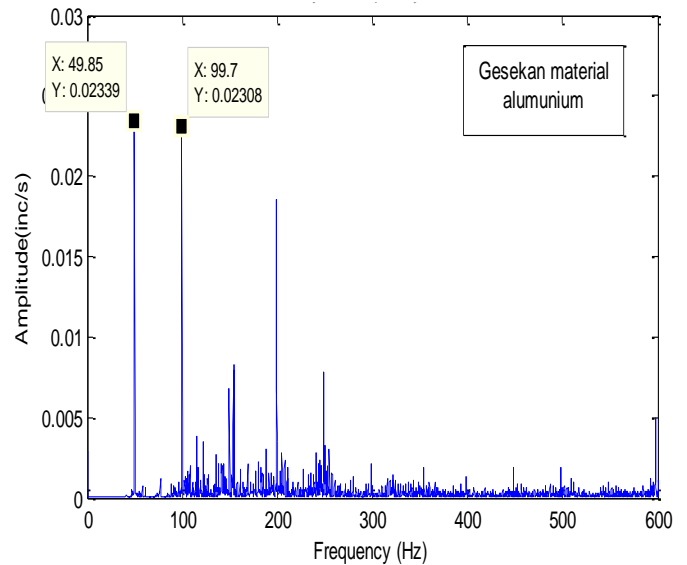
3.3 Analisa menggunakan harmonik dan sub-harmonik

Harmonik tanda gaya di rumah bearing pada arah horizontal untuk kecepatan rotasi 3000 RPM ditunjukkan pada Gambar 15, 16, 17 dan 18. Pada domain frekuensi tampak nilai 1x, 2x, 3x rpm dan seterusnya menunjukkan komponen harmonik dengan nilai kecepatan rotasinya untuk 3000 rpm. Tampak pada gambar ketika getaran subsinkron (getaran dibawah 1x rpm) tak tampak, maka hal tersebut menandakan bahwa getaran subsinkron yang diakibatkan gesekan sebagian tidak terlalu ada. Jika getaran subsinkron disebabkan gesekan sebagian, hal tersebut akan biasanya menunjukkan integer subharmonik ($1/2x$ atau $1/3x$ atau $1/4x$ rpm dan seterusnya) dimana integer sub-harmonik dibangkitkan tergantung kecepatan poros relatif terhadap frekuensi alami sistem rotor.

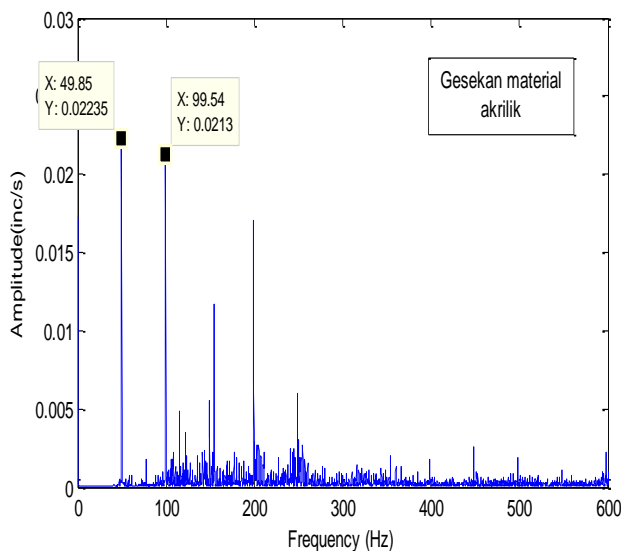
Gesekan sebagian (*partial rub*) biasanya peristiwa sangat singkat, peristiwa sementara yang sering meningkat dalam gesekan yang kuat dan lama waktu terjadinya. Seringkali ketika gesekan sebagian akibat gaya radial yang besar maka hanya ada satukali subharmonik, biasanya $0.5x$ rpm akan terjaga. Apabila benturan kuat (*sharp impacts*) terjadi, kelipatan frekuensi subharmonik dapat juga tampak ($0.5x$, $1x$, $1.5x$, $2x$, $2.5x$ rpm dan seterusnya) maupun respon resonansi frekuensi menjadi tinggi. Hal ini akibat sifat ketidaklinieran yang terjadi pada spektrum FFT ketika benturan kuat mengambil bagian.



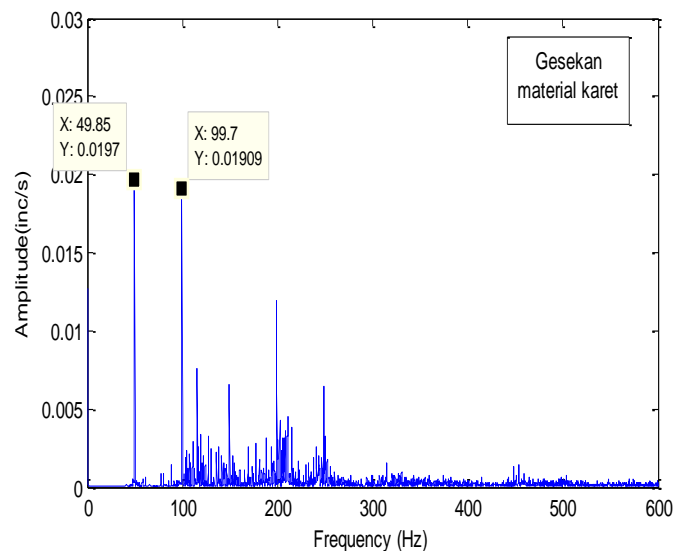
Gambar 15. Baseline (3000 rpm)



Gambar 16. Aluminium rub (3000 rpm)



Gambar 17. Akrilik rub (3000 rpm)



Gambar 18. Karet rub (3000 rpm)

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, peristiwa gesekan sebagian dapat secara cepat memperpanjang lama waktu dan benturan yang mengarah terhadap gesekan penuh dimana terjadi peristiwa gesekan kontinyu. Gesekan penuh mungkin dapat menyebabkan rotasi balik (*backwards precession*) selama poros terus berputar pada arah yang sama, akan tetapi orbit pada arah berlawanan. Rotasi balik yang diakibatkan oleh aplikasi gesekan terhadap rotor yang menghasilkan gaya pada arah berlawanan pada titik kontak, maka gaya ini benar-benar menghasilkan torsi pada arah berlawanan yang dapat menjadi sangat besar dan tidak hanya merusak kenormalan mesin, tetapi juga mempengaruhi kebutuhan energi.

Gesekan penuh merupakan karakteristik dari *forward precession* pada 1x rpm sesuai terhadap ketidakseimbangan pada sistem yang dapat mengarah pada rotasi balik (*backward precession*) pada frekuensi alami di sistem permukaan rotor atau kontak (yang mana kedua kasus 1x rpm dan frekuensi alami permukaan rotor atau kontak akan tampak, seringkali dengan 1x rpm pada amplitudo rendah. Ketika gesekan rotor sifatnya tidak linier, maka juga dapat menghasilkan deret harmonik kecepatan rotasi. Sekalilagi, harmonik tinggi dihasilkan dalam spektrum FFT dengan ketidaklinieran bentuk gelombang domain waktu. Jadi ketika gesekan terjaga secara kontinyu menyeluruh, hal itu akan seringkali memperlihatkan banyak harmonik kecepatan rotasi seperti 1x, 2x, 3x, 4x, 5x, 6x rpm dan seterusnya.

4. Kesimpulan

Dari Penelitian yang sudah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1) Komponen harmonik pada spektrum frekuensi terlihat $1x$, $2x$, $3x$, $4x$, $5x$, $6x$ rpm dan seterusnya yang menandakan harmonik kecepatan rotasi, selain itu sub-harmoniknya terlihat $1/2x$, $1/3x$, $1/4x$ rpm dibangkitkan tergantung kecepatan poros relatif terhadap frekuensi alami rotor.
- 2) Material gesek keras menunjukkan dominasi nilai amplitudo yang lebih besar dibandingkan getaran untuk material gesek karet yang menunjukkan nilai yang lebih rendah daripada getaran *baseline*. Hal itu dapat diamati bahwa spektrum getaran untuk material lunak memiliki karakteristik unik, jadi bahwa tingkat getaran lebih rendah daripada getaran *baseline*. Sebab material lunak berusaha untuk menyerap energi atau adanya redaman dibandingkan dengan yang menggunakan material gesek keras.
- 3) Nilai amplitudo pada rumah bearing meningkat secara signifikan diikuti dengan kecepatan rotasi yang meningkat.

5. Daftar Pustaka

- [1]. *Saruhan H, Saridemir S, Erkan O*. The effect of full annular rub on rotating machinery system considering different rub materials and shaft running speeds, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 75, Iss. 4, 2013.
- [2]. *Veluri G*. Rub-impact Analysis in Rotor Dynamic System. Department of Mechanical Engineering National Institute of Tecnology, Rourkela, 2011.
- [3]. *Z.C. Fen, Xiao-Zhang Zhang*. Rubbing phenomena in rotor-stator contact. University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA. Tsinghua University, Beijing 100084, PR China. October 2001.
- [4]. *James E. Berry, P.E*. Concentrated Vibration Signature Analysis and Related Condition Monitoring Techniques. Technical Associates of Charlotte, P.C. 1997.
- [5]. The Effects of shaft rub on bearing housing vibration signature, Technical Report, SpectraQuest, 2006.