

Pengukuran Getaran Torsional pada Perangkat Uji Poros-Rotor dan Roda Gigi Miring

Muhammad Arifiandi, Zainal Abidin, dan Budi Heryadi

Laboratorium Dinamika PPAU-IR ITB, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

Email: za@dynamic.pauir.itb.ac.id

Abstrak

Getaran torsional merupakan salah satu jenis getaran yang dapat terjadi pada mesin-mesin rotasi. Getaran ini menyebabkan fluktuasi tegangan geser yang dapat menyebabkan gagal lelah pada komponen mesin rotasi. Berdasarkan permasalahan tersebut, pada penelitian ini diusulkan suatu metode pengujian FRF (Fungsi Respon Frekuensi) untuk memperoleh frekuensi pribadi torsional dengan menggunakan dua buah akselerometer linier dan satu buah palu impak. Metode ini diuji pada dua perangkat uji, yaitu perangkat uji poros-rotor dan roda gigi miring. Selain pengujian FRF dari kedua perangkat uji tersebut, dilakukan juga pengukuran peta spektrum untuk memeriksa kemunculan frekuensi pribadi torsional pada pengukuran getaran lateral. Dari pengujian FRF yang dilakukan, metode pengujian yang diusulkan dapat digunakan dengan cukup baik untuk memisahkan frekuensi pribadi translasional dan torsional. Sementara itu, dari pengukuran getaran lateral diperoleh bahwa frekuensi pribadi torsional muncul pada peta spektrum lateral.

Kata kunci : getaran torsional, frekuensi pribadi torsional, perangkat uji poros-rotor, perangkat uji roda gigi miring, FRF, peta spektrum.

Pendahuluan

Keandalan mesin merupakan salah satu aspek penting yang menentukan keberjalanan suatu industri. Aspek ini dapat dicapai apabila dilakukan perawatan yang tepat sehingga mesin tetap beroperasi pada kinerja yang efektif dan efisien. Perawatan yang tepat dapat mencegah timbulnya berbagai permasalahan yang dapat mengganggu produktivitas industri tersebut. Salah satu permasalahan yang tidak dapat dihindari pada mesin-mesin industri adalah timbulnya getaran baik pada arah lateral, aksial, maupun torsional. Pada tingkat tertentu, getaran yang terjadi dapat menimbulkan tegangan mekanik yang tinggi sehingga menyebabkan kerusakan mesin. Hal ini menuntut industri untuk senantiasa melakukan usaha minimalisasi tingkat getaran pada mesin hingga mencapai level yang diizinkan.

Secara umum, mesin dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu mesin translasi dan rotasi. Berdasarkan getaran yang terjadi, mesin translasi mengalami getaran dominan pada arah lateral maupun aksial sedangkan mesin rotasi dapat mengalami getaran dominan

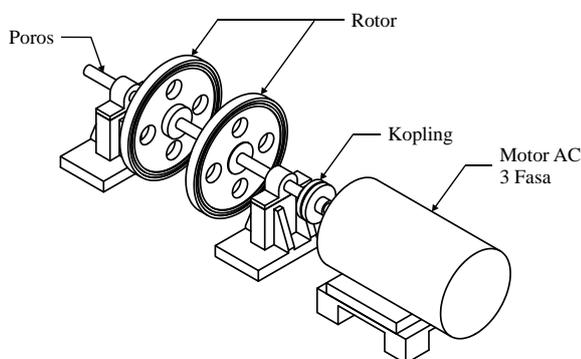
dalam arah lateral, aksial, maupun torsional. Getaran torsional pada mesin rotasi sering kali diabaikan karena sulit diukur. Padahal getaran torsional dapat menyebabkan terjadinya fluktuasi tegangan geser yang kemudian dapat mengakibatkan gagal lelah pada komponen mesin rotasi.

Penelitian mengenai getaran torsional telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya adalah Schmitz [1] yang telah mengusulkan metode pengujian FRF untuk memperoleh FRF torsional pada poros dengan menggunakan satu buah akselerometer linier dan satu buah palu impak. Selain Schmitz, Yun Yang, dkk [2] telah mengusulkan suatu metode pengujian FRF untuk memperoleh FRF torsional dari sistem pahat bor. Selain Schmitz dan Yun Yang, dkk, penelitian mengenai getaran torsional juga pernah dilakukan di Laboratorium Dinamika PPAU-IR ITB. Penelitian mengenai getaran torsional di Laboratorium Dinamika PPAU-IR ITB telah dilakukan oleh Haleyna [3] pada perangkat uji poros-rotor dan Hendrawan [4] pada perangkat uji roda gigi miring.

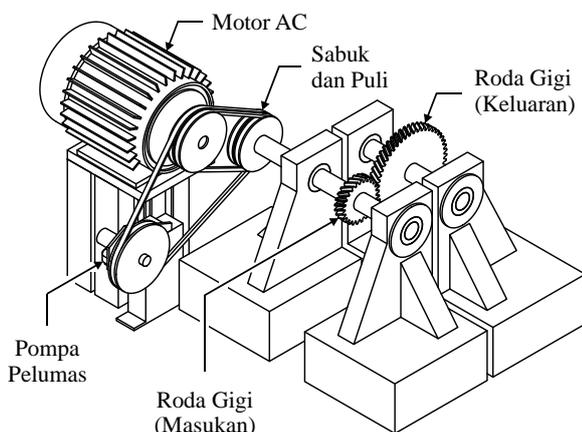
Dalam makalah ini, dipaparkan usulan tentang metode pengukuran getaran torsional melalui pengujian FRF beserta metode pengolahan data yang dilakukan untuk memperkirakan frekuensi pribadi torsional. Selain pengujian FRF, dilakukan pula pengukuran peta spektrum untuk memeriksa kemunculan frekuensi pribadi torsional pada pengukuran getaran lateral.

Perangkat Uji

Pada penelitian ini digunakan dua buah perangkat uji, yaitu perangkat uji poros-rotor dan roda gigi miring. Perangkat uji poros-rotor yang ditampilkan pada Gambar 10 terdiri dari poros, dua buah rotor, kopling, bantalan, dan motor AC induksi 3 fasa dengan daya 15 kW dan kecepatan putar nominal sebesar 1460 RPM. Sementara itu, perangkat uji roda gigi miring yang ditampilkan pada Gambar 11 terdiri dari sepasang roda gigi miring, dua buah poros, empat buah bantalan, dua buah sabuk, tiga buah puli, dan sebuah motor AC induksi 3 fasa dengan daya 15 kW dan kecepatan putar nominal sebesar 1420 RPM.



Gambar 10. Perangkat uji poros-rotor

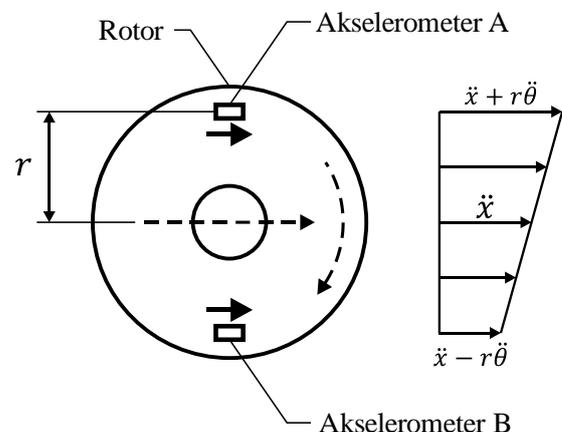


Gambar 11. Perangkat uji roda gigi miring

Metode Penelitian

Pengolahan Sinyal. Pada penelitian ini diusulkan suatu metode pengujian FRF dan pengolahan sinyal untuk memperoleh grafik FRF translasi dan FRF rotasi (FRF torsional). Grafik FRF translasi digunakan untuk memperkirakan frekuensi pribadi translasional sedangkan grafik FRF rotasi digunakan untuk memperkirakan frekuensi pribadi torsional. Kedua grafik tersebut diperoleh dari pengolahan sinyal respon percepatan dari akselerometer yang ditempatkan pada suatu komponen rotasi dan sinyal eksitasi dari dampak yang diberikan pada komponen tersebut.

Pada Gambar 12 terdapat sebuah komponen rotasi dengan jari-jari r . Pada komponen tersebut, dua buah akselerometer ditempatkan pada sisi atas dan sisi bawah untuk mengukur percepatan tangensial dalam arah yang sama. Akselerometer pada sisi atas dan bawah masing-masing diberi nama Akselerometer A dan Akselerometer B. Komponen rotasi di mana kedua akselerometer ditempatkan kemudian dieksitasi sehingga bergetar pada arah translasi dan rotasi. Getaran tersebut menyebabkan kedua akselerometer mengukur percepatan translasi yang tidak hanya dipengaruhi oleh percepatan translasi rotor \ddot{x} melainkan juga dipengaruhi oleh percepatan sudut rotor $\ddot{\theta}$. Berdasarkan hal tersebut, jika diasumsikan rotor berotasi searah jarum jam maka Akselerometer A mengukur percepatan translasi sebesar $\ddot{x} + r\ddot{\theta}$ sedangkan Akselerometer B mengukur percepatan translasi sebesar $\ddot{x} - r\ddot{\theta}$.



Gambar 12. Gerak translasi dan rotasi dari komponen rotasi

Dari respon Akselerometer A dan Akselerometer B dapat diperoleh percepatan translasi dan rotasi dari rotor. Percepatan translasi rotor diperoleh melalui persamaan

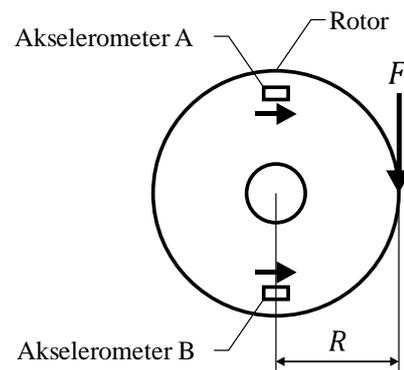
$$a = \frac{a_A + a_B}{2} = \ddot{x} \quad (1)$$

di mana a adalah percepatan translasi rotor, a_A adalah respon percepatan Akselerometer A sebesar $\ddot{x} + r\ddot{\theta}$, dan a_B adalah respon percepatan Akselerometer B sebesar $\ddot{x} - r\ddot{\theta}$. Dari Persamaan (1) dapat dibuktikan bahwa dengan merata-ratakan kedua sinyal akselerometer maka komponen percepatan rotasi $r\ddot{\theta}$ dapat dieliminasi sehingga hanya diperoleh percepatan translasi rotor sebesar \ddot{x} . Percepatan translasi rotor digunakan sebagai salah satu data untuk menghasilkan grafik FRF translasi. Sementara itu, percepatan rotasi rotor diperoleh dari persamaan

$$\dot{\omega} = \frac{a_A - a_B}{2r} = \ddot{\theta} \quad (2)$$

di mana $\dot{\omega}$ adalah percepatan rotasi (sudut) rotor dan r adalah jarak Akselerometer A dan B ke pusat rotor. Pada Persamaan (2) dapat dibuktikan bahwa dengan menyelisihkan kedua sinyal akselerometer kemudian dibagi dengan jarak antara kedua akselerometer maka komponen percepatan translasi \ddot{x} dapat dieliminasi sehingga hanya diperoleh percepatan rotasi rotor sebesar $\ddot{\theta}$. Percepatan rotasi rotor ini digunakan sebagai salah satu data untuk menghasilkan grafik FRF rotasi.

Selain pengolahan sinyal percepatan dari akselerometer, pengolahan juga dilakukan pada sinyal eksitasi untuk memperoleh data torsi. Data torsi ini digunakan sebagai salah satu data untuk menghasilkan grafik FRF rotasi. Data torsi diperoleh dari pengolahan sinyal eksitasi ketika impact diberikan pada arah tangensial rotor sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 13.

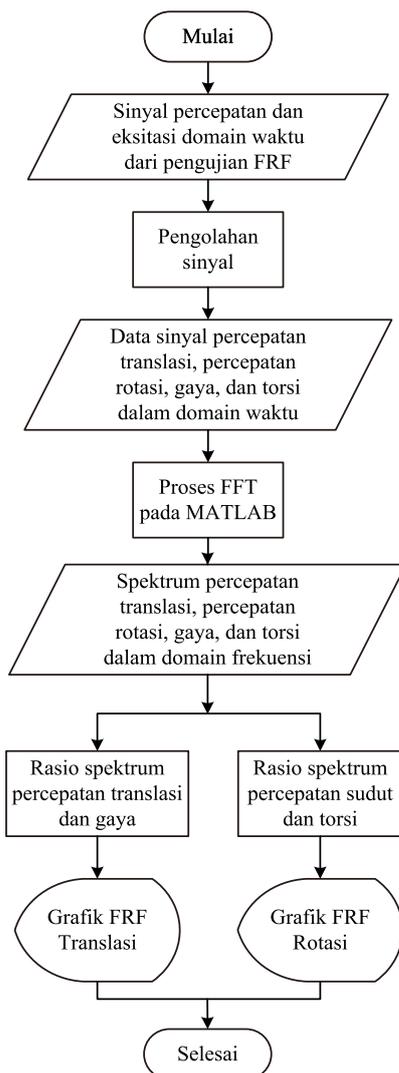


Gambar 13. Impact tangensial pada rotor

Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa F adalah gaya impact yang diberikan pada arah tangensial rotor dan R adalah jarak impact ke pusat rotor. Sementara itu, torsi T yang diberikan pada rotor diperoleh dari persamaan

$$T = R \times F \quad (3)$$

Grafik FRF. Berdasarkan pengolahan sinyal percepatan akselerometer dan sinyal gaya impact maka dapat diperoleh grafik FRF translasi dan FRF rotasi melalui dua tahap. Tahap pertama adalah pengolahan sinyal percepatan dan sinyal eksitasi dalam domain waktu menjadi spektrum percepatan dan eksitasi dalam domain frekuensi melalui proses FFT (*Fast Fourier Transform*). Proses ini dilakukan dengan cepat pada perangkat lunak *MATLAB*. Tahap kedua adalah pengolahan data untuk memperoleh grafik FRF translasi atau FRF rotasi. Grafik FRF translasi diperoleh dari rasio antara spektrum percepatan translasi dengan spektrum gaya sedangkan grafik FRF rotasi diperoleh dari rasio antara spektrum percepatan sudut dengan spektrum torsi. Tahap-tahap pengolahan data ditampilkan pada Gambar 14.



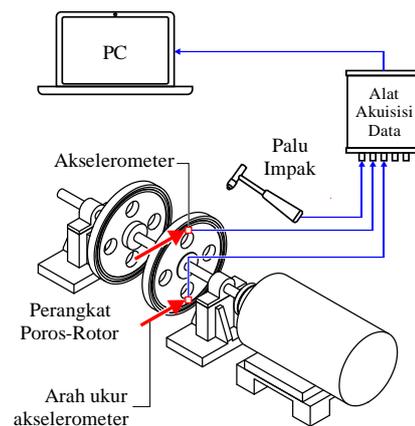
Gambar 14. Diagram alir grafik FRF

Peta spektrum. Pengukuran peta spektrum dilakukan untuk memeriksa kemunculan frekuensi pribadi torsional pada pengukuran getaran lateral. Pengukuran peta spektrum pada perangkat uji poros-rotor dilakukan dalam rentang kecepatan 100 - 1000 RPM. Sementara itu, pengukuran peta spektrum pada perangkat uji roda gigi miring dilakukan dalam rentang 150 - 1350 RPM.

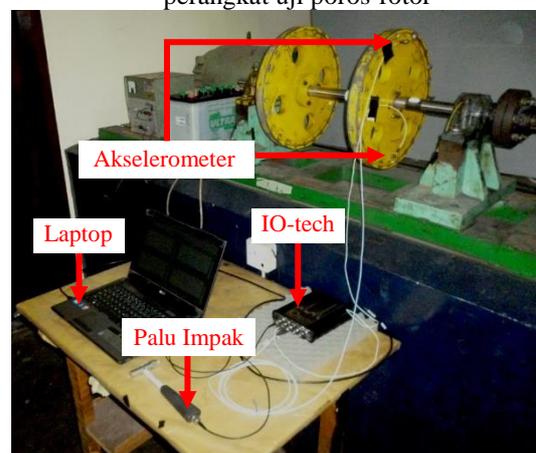
Pengujian FRF

Skema Instrumen Pengujian FRF. Pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor maupun perangkat uji roda gigi miring dilakukan dengan metode eksitasi kejut. Pengujian FRF pada kedua perangkat uji tersebut dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen pengujian meliputi

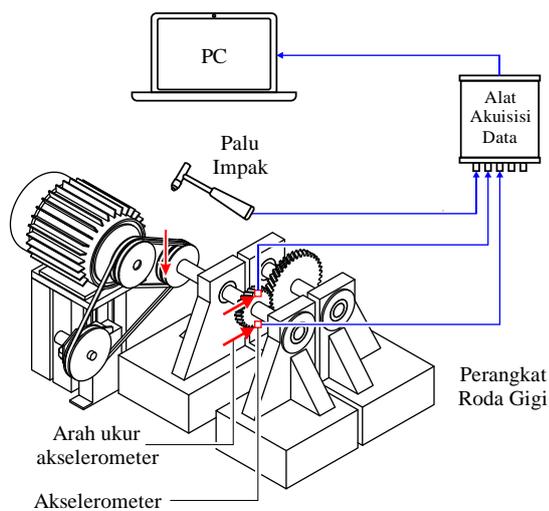
- ❖ Sebuah palu impact dengan sensitivitas sebesar 5,43 mV/lbf yang telah dilengkapi *load cell* untuk mengeksitasi perangkat uji.
 - ❖ Dua buah akselerometer linier untuk mengukur respon percepatan komponen perangkat uji masing-masing memiliki sensitivitas sebesar 100 mV/G.
 - ❖ Sebuah alat akuisisi data yang digunakan untuk mengakuisisi data getaran. Alat akuisisi data yang digunakan pada penelitian ini adalah *IO-tech 650u*.
 - ❖ Sebuah *personal computer* (PC) yang telah dilengkapi perangkat lunak *EZAnalyst* untuk menampilkan hasil pengujian.
- Skema instrumen pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor ditampilkan pada Gambar 15 dan Gambar 7. Sementara itu skema instrumen pengujian FRF pada perangkat uji roda gigi miring ditampilkan pada Gambar 17 dan Gambar 18.



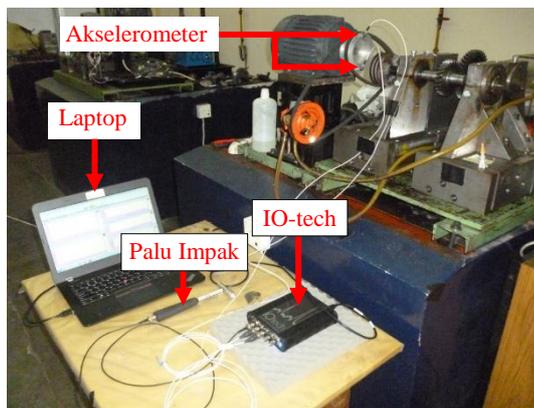
Gambar 15. Skema instrumen pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor



Gambar 16. Foto pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor

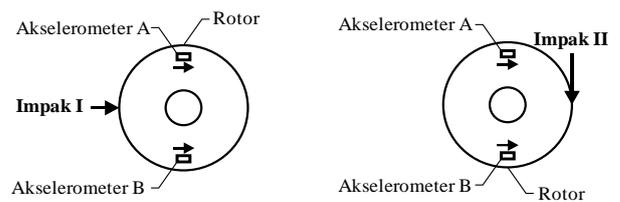


Gambar 17. Skema instrumen pengujian FRF pada perangkat uji roda gigi

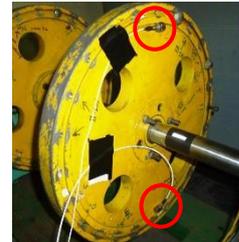


Gambar 18. Foto pengujian FRF pada perangkat uji roda gigi miring

Pengujian FRF pada Perangkat Uji Poros-Rotor. Pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor dilakukan dengan memasang dua buah akselerometer pada sisi atas dan bawah rotor. Akselerometer pada sisi atas dan bawah masing-masing diberi nama Akselerometer A dan Akselerometer B. Sementara itu, dampak diberikan berurutan pada rotor dalam arah radial secara horizontal dan arah tangensial secara vertikal. Dampak dalam arah radial secara horizontal disebut Impak I sedangkan dampak dalam arah tangensial secara vertikal disebut Impak II. Ilustrasi pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor ditunjukkan pada Gambar 19 sedangkan foto pemasangan akselerometer ditunjukkan pada Gambar 20.

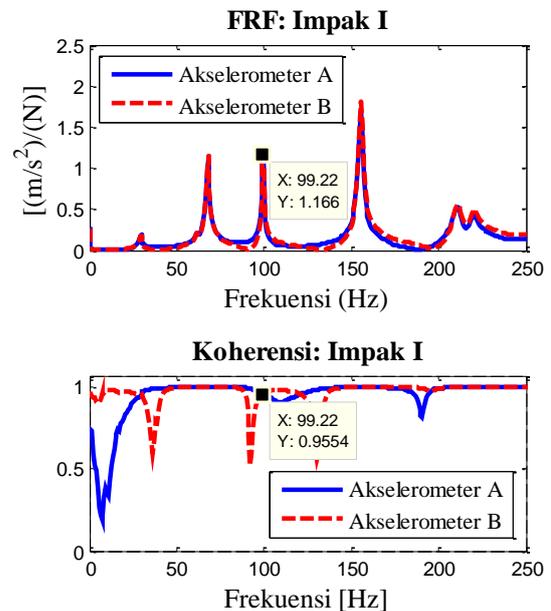


Gambar 19. Ilustrasi pengujian FRF

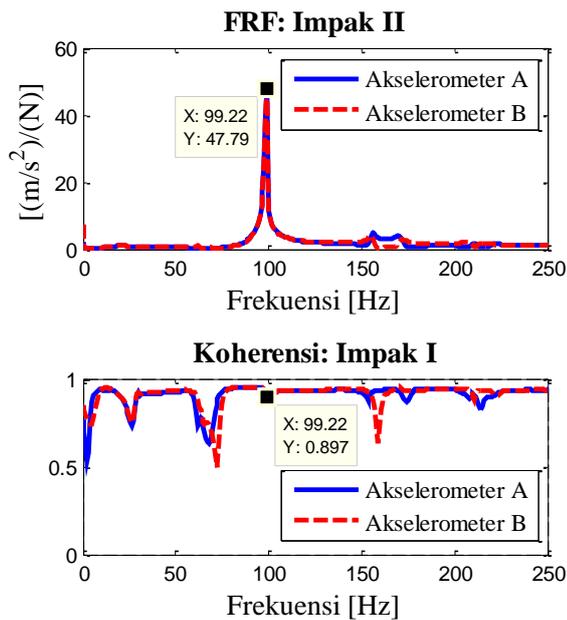


Gambar 20. Foto pemasangan akselerometer

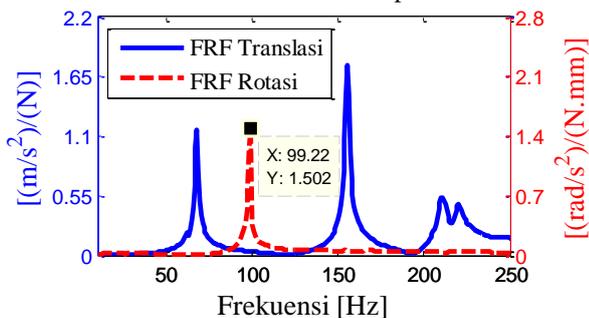
Hasil pengujian FRF pada perangkat uji poros-rotor saat rotor dieksitasi oleh Impak I dan Impak II masing-masing ditunjukkan pada Gambar 21 dan Gambar 22. Sementara itu, hasil pengolahan dari kedua data pengujian berupa grafik FRF translasi dan FRF rotasi ditampilkan pada Gambar 23.



Gambar 21. FRF saat rotor diberi Impak I



Gambar 22. FRF saat rotor diberi Impak II



Gambar 23. FRF translasi dan FRF rotasi

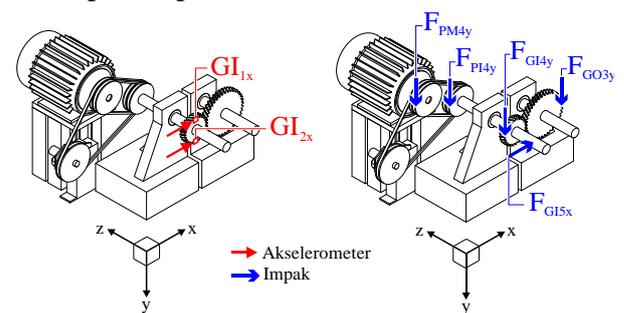
Pada Grafik FRF: Impak I (Gambar 21) dapat dilihat bahwa terdapat enam frekuensi puncak yang ditampilkan pada Tabel 9. Pada tabel tersebut terdapat frekuensi 99,22 Hz yang juga muncul pada Grafik FRF: Impak II (Gambar 22). Sementara itu, hasil pengolahan (Gambar 23) menunjukkan bahwa frekuensi 99,22 Hz tidak muncul kembali pada grafik FRF translasi namun hanya muncul pada grafik FRF rotasi. Hal ini dapat disimpulkan bahwa frekuensi 99,22 Hz merupakan salah satu frekuensi pribadi torsional dari perangkat uji poros-rotor.

Tabel 9. Frekuensi puncak pada grafik FRF saat sistem diberi gaya Impak I

No.	Frekuensi Puncak [Hz]
1	29,69
2	67,97
3	99,22
4	155,5
5	210,9

Informasi lain yang patut dicermati dari hasil pengujian FRF saat rotor diberi gaya Impak I (Gambar 21) adalah kemunculan frekuensi 99,22 Hz yang merupakan frekuensi pribadi torsional. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian gaya Impak I tidak benar-benar tepat pada arah radial sehingga menyebabkan rotor tidak hanya bergetar translasi melainkan juga bergetar rotasi.

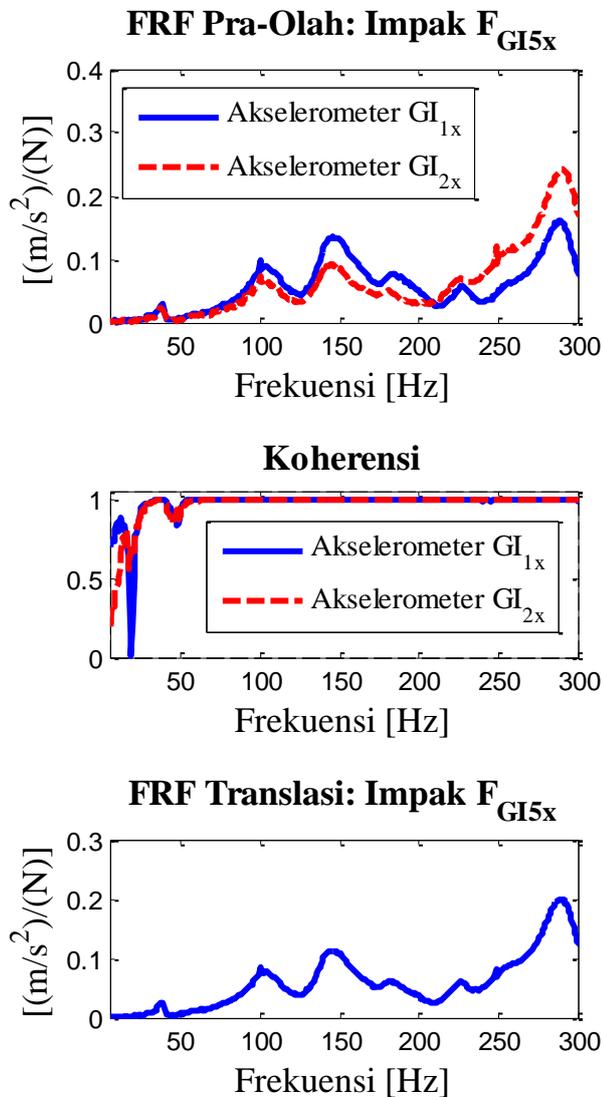
Pengujian FRF pada Perangkat Uji Roda Gigi Miring. Pengujian FRF pada perangkat uji roda gigi miring dilakukan dengan memasang dua buah akselerometer pada sisi atas dan bawah roda gigi masukan. Akselerometer pada sisi atas dan bawah masing-masing diberi nama Akselerometer GI_{1x} dan Akselerometer GI_{2x} . Sementara itu, impak diberikan berurutan pada lima lokasi, yaitu arah horizontal roda gigi masukan (F_{GI5x}), arah vertikal puli motor (F_{PM4y}), arah vertikal puli masukan (F_{PI4y}), arah vertikal roda gigi masukan (F_{GI4y}), dan arah vertikal roda gigi keluaran (F_{GO3y}). Pengujian FRF saat sistem diberi Impak F_{GI5x} digunakan sebagai data untuk memperoleh FRF translasi. Sementara itu, empat impak lain digunakan untuk memperoleh grafik FRF rotasi. Kelima lokasi impak dan dua lokasi akselerometer ditampilkan pada Gambar 24.



Gambar 24. Lokasi akselerometer dan impak pada perangkat uji roda gigi miring

Hasil pengujian FRF saat impak diberikan pada poros masukan dalam arah horizontal (F_{GI5x}) dan hasil pengolahan berupa grafik FRF translasi dari perangkat uji roda gigi miring ditampilkan pada Gambar 25. Pada Gambar 25 dapat dilihat bahwa seluruh frekuensi puncak yang muncul pada grafik FRF Pra-Olah: F_{GI5x} juga muncul pada grafik hasil pengolahan, yaitu grafik FRF Translasi: F_{GI5x} . Seluruh

frekuensi puncak tersebut diduga sebagai frekuensi pribadi translasi f_n dari perangkat uji roda gigi miring. Frekuensi-frekuensi tersebut ditampilkan pada Tabel 10.



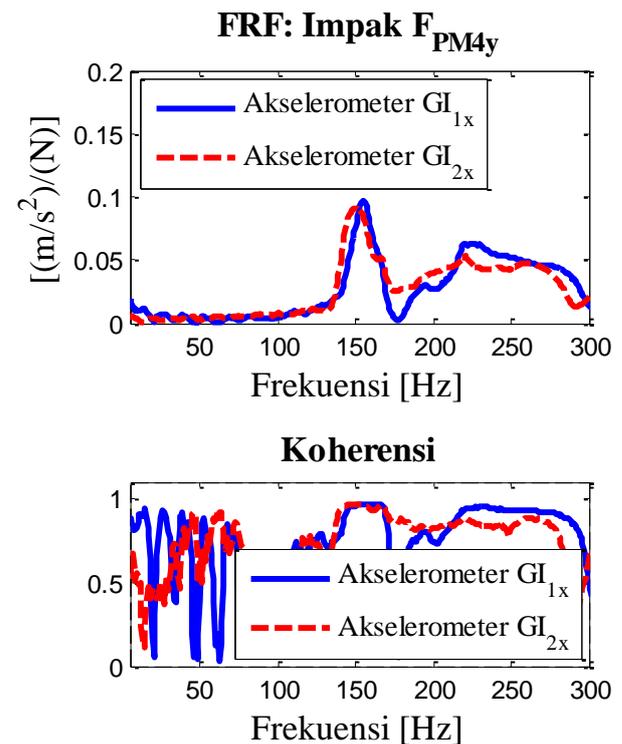
Gambar 25. FRF: Impak F_{GI5x} , koherensi, dan FRF translasi

Tabel 10. Frekuensi pribadi translasi dari perangkat uji roda gigi miring

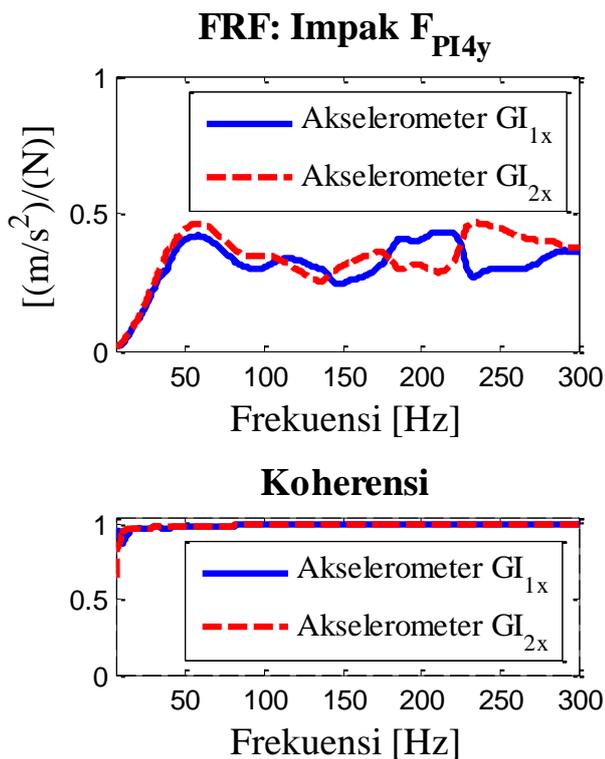
No.	f_n [Hz]
1	37,5
2	100,0
3	146,1
4	181,2
5	226,6
6	289,1

Hasil pengujian FRF saat perangkat uji roda gigi miring dieksitasi oleh Impak F_{PM4y} , Impak F_{PI4y} , Impak F_{GI4y} , dan Impak F_{GO3y} masing-

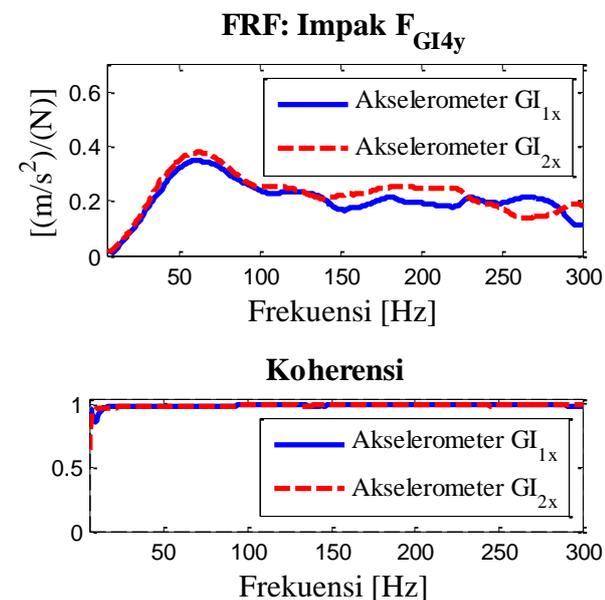
masing ditampilkan pada Gambar 26, Gambar 27, Gambar 28 dan Gambar 29. Keempat hasil pengujian FRF tersebut akan digunakan untuk menghasilkan grafik-grafik FRF rotasi. Grafik-grafik tersebut kemudian dapat digunakan untuk menentukan frekuensi pribadi torsional dari perangkat uji roda gigi miring.



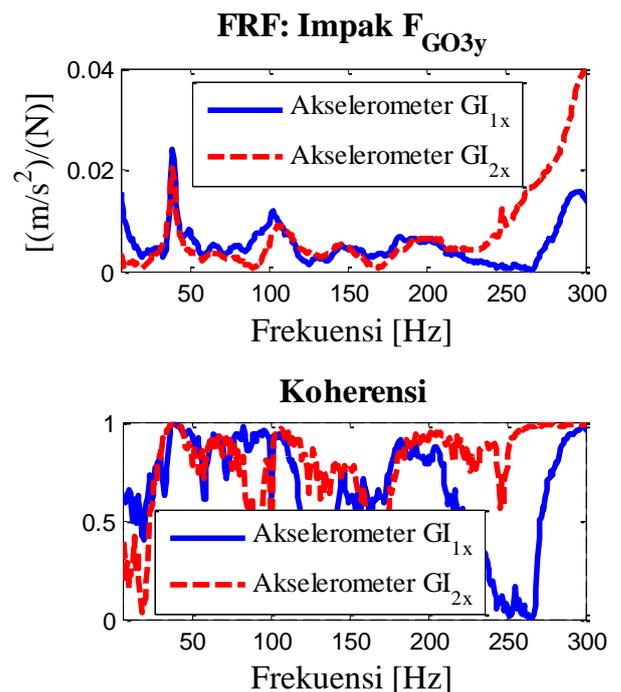
Gambar 26. FRF: Impak F_{PM4y} dan koherensi



Gambar 27. FRF: Impak F_{PI4y} dan koherensi

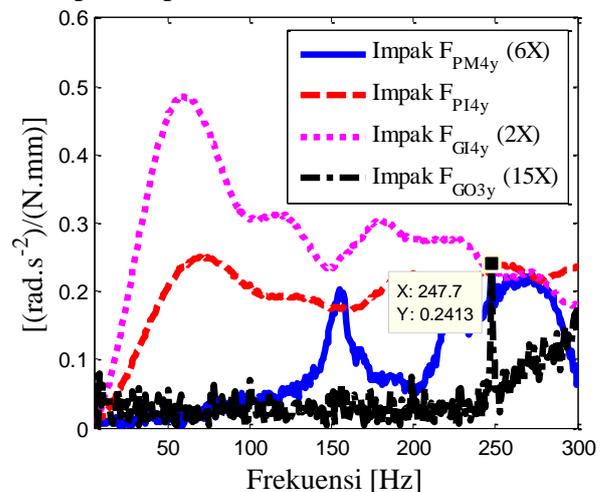


Gambar 28. FRF: Impak F_{PM4y} dan koherensi



Gambar 29. FRF: Impak F_{GO3y} dan koherensi

Dari Gambar 26 hingga Gambar 29 dapat dilihat bahwa keempat grafik FRF memiliki frekuensi puncak yang berbeda-beda. Selain itu, pada Gambar 27 dan Gambar 28 dapat dilihat bahwa hasil pengujian FRF menunjukkan karakteristik redaman tinggi akibat adanya sabuk pada perangkat uji roda gigi miring. Berdasarkan hasil pengujian FRF dari keempat grafik FRF tersebut maka dilakukan pengolahan sehingga diperoleh grafik-grafik FRF rotasi normalisasi yang ditampilkan pada Gambar 30.



Gambar 30. FRF rotasi dari berbagai impact

Pada Gambar 30 dapat dilihat bahwa frekuensi puncak yang memiliki karakteristik redaman rendah sebagai salah satu sifat dari

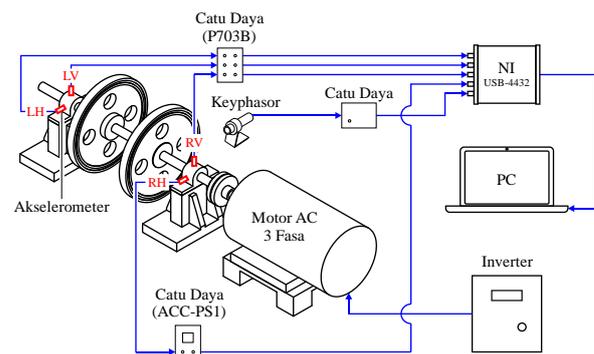
getaran torsional adalah frekuensi 247,7 Hz. Berdasarkan hal tersebut maka frekuensi ini diduga sebagai salah satu frekuensi pribadi torsional dari perangkat uji roda gigi miring.

Pengukuran Peta Spektrum

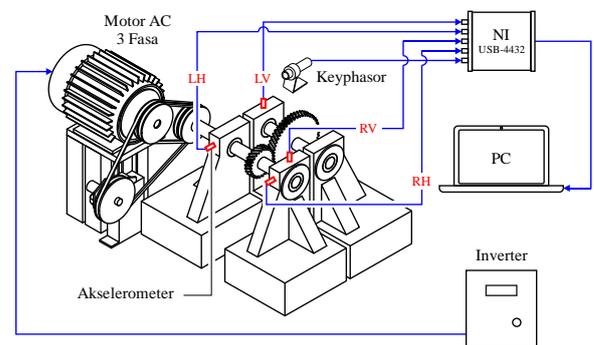
Skema Instrumen Pengukuran Peta Spektrum. Pengukuran peta spektrum pada perangkat uji poros-rotor dan perangkat uji roda gigi miring dilakukan untuk memeriksa kemunculan frekuensi pribadi torsional pada pengukuran getaran lateral. Pengukuran peta spektrum pada kedua perangkat uji tersebut dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen pengukuran meliputi

- ❖ Empat buah akselerometer untuk mengukur respon percepatan komponen perangkat uji masing-masing memiliki sensitivitas sebesar 100 mV/G. Keempat akselerometer diberi kode berdasarkan letak dan arah pengukuran. Kode yang digunakan adalah LH, LV, RV, dan RH di mana L (*Left*) dan R (*Right*) digunakan sebagai kode letak akselerometer pada rumah bantalan perangkat uji bagian kiri atau bagian kanan. Sementara itu, H (*Horizontal*) dan V (*Vertical*) digunakan sebagai kode arah pengukuran akselerometer pada rumah bantalan.
- ❖ Sebuah keyphasor yang digunakan untuk mengukur kecepatan putar aktual poros.
- ❖ Motor AC induksi 3 fasa digunakan sebagai penggerak perangkat uji.
- ❖ Sebuah inverter untuk mengatur kecepatan putar motor AC induksi 3 fasa.
- ❖ Sebuah alat akuisisi data NI USB-4432 untuk mengakuisisi data getaran.
- ❖ Sebuah PC yang dilengkapi perangkat lunak LabVIEW untuk mengatur parameter dan menampilkan hasil pengukuran.

Skema instrumen pengukuran dari kedua perangkat uji ditampilkan pada Gambar 31 dan Gambar 32. Pada kedua gambar tersebut dapat dilihat letak dan kode akselerometer.



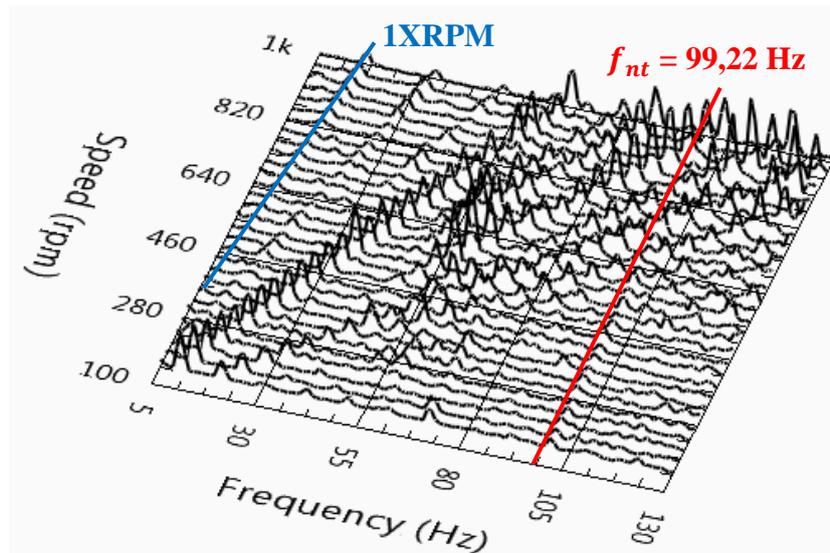
Gambar 31. Skema instrumen pengukuran peta spektrum pada perangkat uji poros-rotor



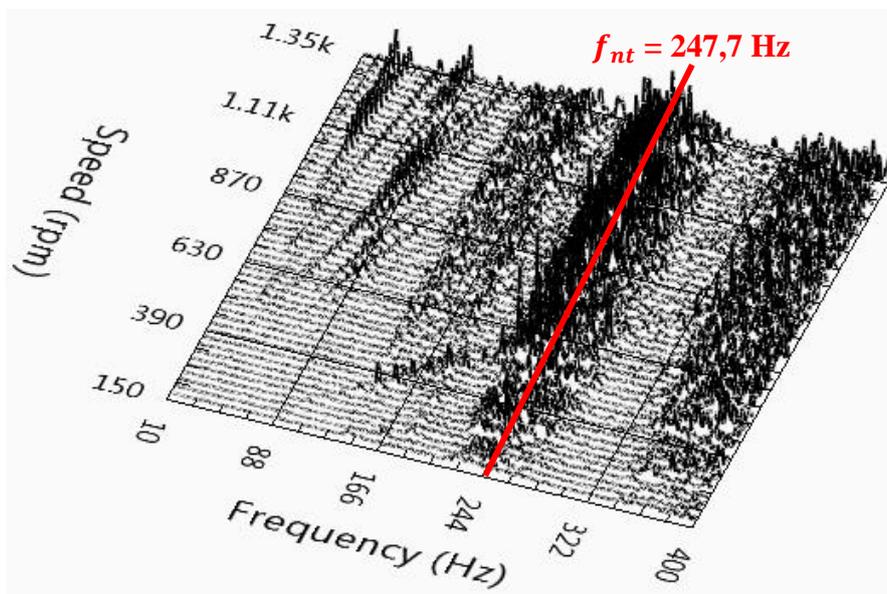
Gambar 32. Skema instrumen pengukuran peta spektrum pada perangkat uji roda gigi miring

Hasil Pengukuran Peta Spektrum pada Perangkat Uji Poros-Rotor. Pengukuran peta spektrum pada perangkat uji poros-rotor dilakukan pada rentang kecepatan putar 100 - 1000 RPM. Berdasarkan pengukuran ini, diperoleh peta spektrum yang ditampilkan pada Gambar 33. Peta spektrum yang ditampilkan pada gambar tersebut merupakan hasil yang diperoleh dari respon Akselerometer LH dan dapat mewakili hasil pengukuran dari tiga buah akselerometer lain.

Hasil Pengukuran Peta Spektrum pada Perangkat Uji Roda Gigi Miring. Pengukuran peta spektrum pada perangkat uji roda gigi miring dilakukan pada rentang kecepatan putar 150 - 1350 RPM. Berdasarkan pengukuran ini, diperoleh peta spektrum yang ditampilkan pada Gambar 34. Peta spektrum yang ditampilkan pada Gambar 34 merupakan hasil yang diperoleh dari respon Akselerometer RV dan dapat mewakili hasil pengukuran peta spektrum dari tiga buah akselerometer yang lain.



Gambar 33. Peta spektrum perangkat uji poros-rotor: Akselerometer LH



Gambar 34. Peta spektrum perangkat uji roda gigi miring: Akselerometer RV

Analisis Hasil Pengukuran Peta Spektrum. Berdasarkan hasil pengukuran peta spektrum dari perangkat uji poros-rotor (Gambar 33) dan roda gigi miring (Gambar 34) dapat dilihat bahwa frekuensi pribadi torsional muncul pada pengukuran getaran lateral. Frekuensi pribadi torsional dari perangkat uji poros-rotor sebesar 99,22 Hz muncul pada peta spektrum dari Gambar 33. Sementara itu, frekuensi pribadi torsional dari perangkat uji roda gigi miring sebesar 247,7 Hz pun muncul pada peta spektrum dari Gambar 34. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi pribadi

torsional dapat diperoleh dari pengukuran getaran lateral.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, metode pengujian FRF yang dipaparkan dalam makalah ini telah cukup berhasil diterapkan pada dua perangkat uji, yaitu perangkat uji poros-rotor dan roda gigi miring. Metode ini dapat digunakan dengan cukup baik untuk membedakan frekuensi pribadi translasional dan torsional. Metode ini diterapkan dengan menggunakan dua buah

akselerometer linier dan satu buah palu impak yang disertai dengan teknik pengolahan data untuk mengubah sinyal percepatan linier menjadi sinyal percepatan sudut dan sinyal gaya menjadi sinyal torsi. Selain pengujian FRF, dari pengukuran peta spektrum lateral pada dua perangkat uji diperoleh bahwa terdapat frekuensi pasif yang sesuai dengan frekuensi pribadi translasional maupun frekuensi pribadi torsional. Hal ini menunjukkan bahwa frekuensi pribadi torsional dapat diperoleh dari pengukuran getaran lateral. Namun demikian, perlu dipelajari lebih lanjut mengenai penyebab kemunculan frekuensi pribadi torsional pada pengukuran getaran lateral.

Referensi

- [1] [Tony L. Schmitz, *Torsional and Axial Frequency Response Prediction by RCSA*, University of Florida, 2009.](#)
- [2] [Yun Yang, Wei-Hong Zhang, Ying-Chao Ma, Min Wan, *Generalized Method for The Analysis of Bending, Torsional, and Axial Receptances of Tool-Holder-Spindle Assembly*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015.](#)
- [3] Haleyna Arstianti, *Pemodelan, Pengujian, dan Analisis Getaran Torsional dari Perangkat Uji Sistem Poros-Rotor*, Tugas Sarjana Teknik Mesin ITB, Bandung, 2008.
- [4] Arsyad Hendrawan, *Pengukuran Getaran Torsional pada Perangkat Uji Roda Gigi Miring*, Tugas Sarjana Teknik Mesin ITB, Bandung, 2009.
- [5] Muhammad Arifiandi, *Pengukuran Getaran Torsional pada Perangkat Uji Poros-Rotor dan Roda Gigi Miring*, Tugas Sarjana Teknik Mesin ITB, Bandung, 2016.