

Tuning Mass-Spring Damper Pada Rekayasa Follower Rest Untuk Meningkatkan Batas Stabilitas Proses Bubut Slender Bar

Peniel Immanuel Gultom¹, Suhardjono^{2,*}

1,2 Pascasarjana Jurusan Teknik Mesin, Fak. Teknologi Industri,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

2 Laboratorium Mesin Perkakas, Jurusan Teknik Mesin, Fak. Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh
Nopember Surabaya 60111, Indonesia

* E-mail : suhardjono@me.its.ac.id

Abstrak. Proses bubut *slender bar* yang memiliki rasio panjang-diameter ($L/D \geq 20$) dalam proses pengerjaannya membutuhkan *steady rest* atau *follower rest* untuk meningkatkan kekakuan dinamik. *Follower rest* yang asli hanya meningkatkan kekakuan saja, sedangkan *follower rest* yang dikembangkan disini selain meningkatkan kekakuan juga sekaligus dapat meredam getaran, sehingga dapat meningkatkan batas stabilitas proses pemesinannya. Dalam pembuatan sistem peredam diawali dengan membuat sistem getaran dua derajat kebebasan, data kekakuan yang ada selanjutnya digunakan dalam simulasi sistem peredam dengan dua derajat kebebasan (2DOF) dan 3DOF. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pengolah analisis numerik. Hasil simulasi yang telah sesuai selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam mendesain dan membuat sistem peredam. Selanjutnya rekayasa *follower rest* akan dilakukan dengan menambah *mass-spring damper* yaitu dengan memberikan massa tambahan tertentu dan pegas tekan dengan nilai kekakuan tertentu. Kemudian akan dilakukan percobaan uji eksitasi dengan menggunakan 5 macam kekakuan pegas masing-masing $k_1 = 7,924 \times 10^4$ N/m, $k_2 = 1,06 \times 10^5$ N/m, $k_3 = 2,07 \times 10^5$ N/m, $k_4 = 2,78 \times 10^5$ N/m, $k_5 = 4,17 \times 10^5$ N/m dan 5 posisi preload dari tiap pegas tersebut untuk mengetahui pengaruh penggunaan sistem peredam dan uji pemotongan dengan proses bubut untuk mengetahui batas stabilitas dari proses pemesinan. Benda kerja yang akan digunakan dalam percobaan adalah *slender bar* baja ST 60 dimensi $\varnothing 35$ mm x 800 mm dengan sistem pencekaman *chuck-tailstock spindle*. Putaran mesin yang akan digunakan adalah 638 rpm dan *feeding* sebesar 0,06 mm/putaran. Pahat yang akan digunakan adalah pahat *insert* jenis *carbide* dengan sudut $K_r = 45^\circ$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses bubut *slender bar* tanpa *follower rest*, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 0,4 mm dengan tinggi amplitudo $0,385 \text{ ms}^{-2}$. Pada pemotongan menggunakan *follower rest* dengan *adjustable jaw* horisontal, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 2,6 mm dengan tinggi amplitudo $0,32 \text{ ms}^{-2}$. Pada pemotongan menggunakan *follower rest* dengan *adjustable jaw* horisontal dan *adjustable jaw* vertikal optimum, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 3,2 mm dengan tinggi amplitudo $0,331 \text{ ms}^{-2}$. Rekayasa *follower rest* dapat meningkatkan batas stabilitas (*chatter*) hingga 23,08%.

Kata Kunci: *Chatter, Follower Rest, Mass-Spring Damper, Slender Bar*

1. Pendahuluan

Kecepatan potong, kecepatan pemakanan dan kedalaman potong merupakan parameter pemesinan yang menentukan besarnya laju pembuangan material atau *material removal rate* (MRR) dari proses bubut. Penentuan kedalaman pemotongan secara berlebihan justru akan menurunkan produktivitas karena adanya suatu produk yang harus dikerjakan ulang (*reworked*) bahkan diganti karena terjadinya cacat pada permukaan hasil pemotongan akibat *chatter*.

Chatter ini disebabkan oleh perubahan tebal geram dan perubahan ini proporsional dengan perubahan gaya potong yang mengeksitasi sistem getaran mesin perkakas. Getaran yang berlebihan

tidak hanya terjadi antara pahat dan benda kerja saja tetapi juga pada seluruh struktur mesin perkakas seperti *spindle head*, bantalan, poros penggerak, ulir penggerak dan lain-lain [1].

Sejumlah penelitian telah dilakukan sampai saat ini untuk meneliti fenomena terjadinya *chatter*. [2] dalam penelitiannya tentang pengaruh kecepatan potong terhadap getaran dengan membandingkan kekasaran permukaan sebelum dan sesudah terjadi *chatter*, menyimpulkan bahwa pada putaran 155 rpm dan kecepatan potong $V_c = 17.43 \text{ m/min}$ menunjukkan bahwa amplitudo getaran hampir konstan dengan naiknya lebar geram dari 1.04 mm sampai dengan 4.14 mm, tetapi saat lebar geram kritis 4.35 mm terjadi loncatan amplitudo empat kali lipat.

[3] Melakukan penelitian tentang pemodelan kesalahan dimensi benda kerja *slender bar* pada proses bubut dengan menggunakan metode *artificial neural networks* (ANN). Variabel proses yang digunakan adalah kecepatan potong, gerak makan, kedalaman potong dan kerampingan (*slenderness*). Dari penelitian ini didapatkan bahwa meningkatnya gerak makan (*feeding*) dan kedalaman potong berdampak pada bertambahnya kesalahan dimensi benda kerja *slender bar*.

[4] Melakukan penelitian tentang modifikasi *follower rest* untuk proses gerinda *ball screw*. Variabel proses yang digunakan adalah kecepatan gerak *absorber*, rasio massa peredam dan kerampingan (*slenderness*). Penelitian ini menghasilkan peredaman getaran benda kerja dengan rasio L/D = 40, bahwa menaikkan massa struktur damping merupakan cara paling efektif untuk menurunkan kemungkinan terjadinya *chatter*.

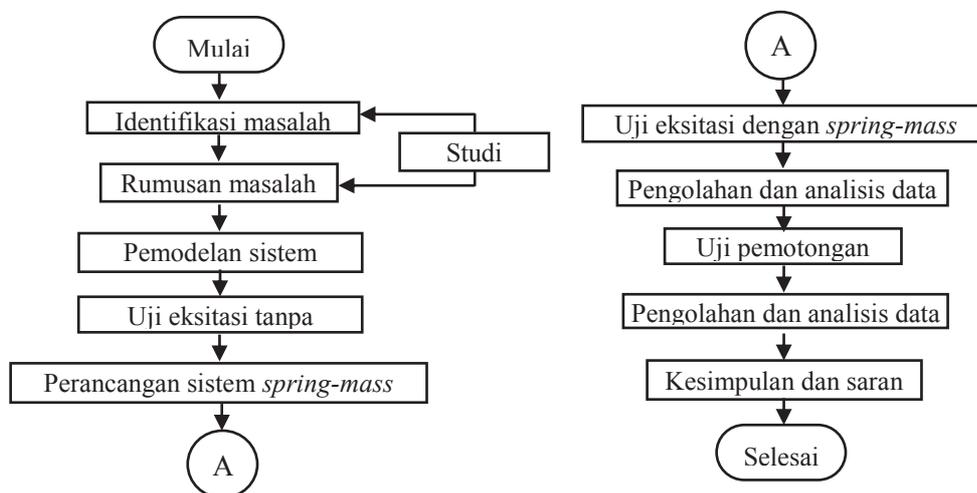
Wahyudi (2011), dalam penelitiannya tentang pengaruh penggunaan *follower rest* terhadap peningkatan batas stabilitas proses pemesinan. Diperoleh bahwa pada pembubutan *slender bar* baja AISI 1020 dengan menggunakan pahat *insert* jenis carbide dengan sudut $K_r = 45^\circ$ pada putaran 425 rpm dan *feeding* 0.06 mm/putaran terjadi peningkatan batas stabilitas proses pemesinan dari 1,0 mm dengan amplitudo 10,713 m/s² menjadi 1,5 mm dengan amplitudo 1,292 m/s² saat menggunakan *follower rest* asli. Sedangkan pada penggunaan *follower rest* yang telah dimodifikasi dalam arah horisontal saja dengan *seismic damper*, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 1,75 mm dengan tinggi amplitudo 2,359 m/s². Modifikasi *follower rest* dalam arah horisontal saja dengan *seismic damper* mampu meningkatkan batas stabilitas (*chatter*) hingga 16,7%.

Berdasarkan evaluasi dari penelitian-penelitian yang ada, perlu dilakukan penelitian tentang peningkatan batas stabilitas pada proses bubut *slender bar* dengan *seismic damper* melalui rekayasa *follower rest* baik dalam arah horisontal maupun vertikal. Variabel proses yang digunakan untuk *absorber* sebagai *spring-mass-damper* (SMD) adalah massa tambahan dan kekakuan pegas.

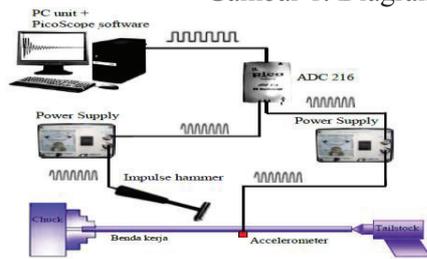
Tujuan dalam penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penggunaan *seismic damper* dalam arah horisontal dan vertikal pada *follower rest* terhadap batas stabilitas getaran benda kerja pada proses bubut benda kerja *slender bar* dengan dimensi Ø35 mm x 800 mm.

2. Metode

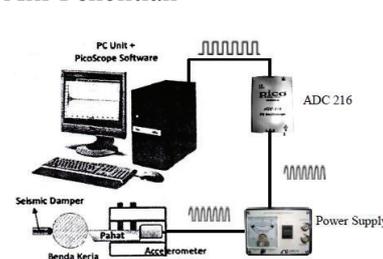
Langkah-langkah penelitian yang dilakukan pada penelitian ini mengikuti diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Skema Uji Eksitasi Tanpa *Follower Rest*



Gambar 3. Skema Uji Pemotongan

Skema pemasangan peralatan uji eksitasi ditunjukkan pada gambar 2, sedangkan skema pemasangan peralatan uji pemotongan menggunakan *follower rest* dengan *seismic damping* ditunjukkan pada gambar 3.

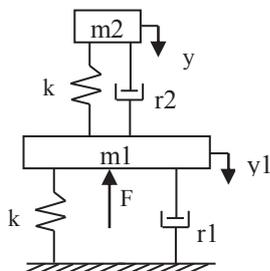
Prinsip kerja peralatan percobaan uji pemotongan sebagai berikut:

Gaya eksitasi berasal dari gaya pemotongan yang diberikan pahat ke benda kerja. Gaya pemotongan ini diukur oleh sebuah *accelerometer*. Sinyal analog dari *accelerometer* diteruskan ke *power supply* untuk diperkuat. Selanjutnya sinyal analog ini diteruskan ke unit ADC 216 untuk diubah menjadi sinyal digital. Sinyal digital yang dihasilkan ADC 216 dikirim ke PC untuk diolah menjadi spektrum yang dapat dibaca dengan bantuan perangkat lunak PicoScope. Selanjutnya spektrum tersebut dapat disimpan kedalam bentuk file lain, misalnya dalam bentuk text file (*.txt). Selanjutnya data tersebut diolah menggunakan perangkat lunak pengolah analisis numerik untuk mendapatkan nilai respon frekuensi dan amplitudonya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Sistem Getaran Dua Derajat Kebebasan Tanpa *Follower Rest*

Model dinamik sistem getaran dua derajat kebebasan tanpa *follower rest* dapat disederhanakan menjadi seperti gambar 4 berikut.



Gambar 4. Penyederhanaan Model Dinamik 2DOF Tanpa *Follower Rest*

dimana:

m_1 = massa benda kerja

m_2 = massa tambahan

k_1 = kekakuan rahang dan *tailstock spindle*

k_2 = kekakuan pegas

r_1 = redaman rahang dan *tailstock spindle*

r_2 = redaman pegas

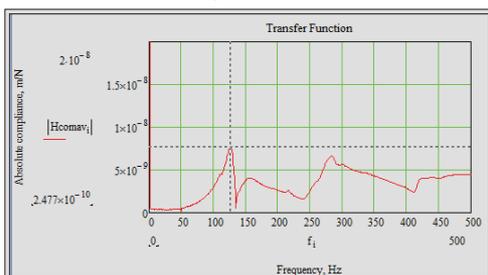
F_e = gaya eksitasi

Persamaan model matematis gerak sistem getaran 2DOF tanpa *follower rest* sebagai berikut:

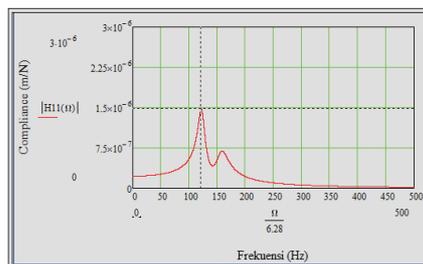
$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 + r_2 & -r_2 \\ -r_2 & r_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Hasil uji eksitasi dan simulasi 2DOF tanpa *follower rest* ditunjukkan pada gambar 5 berikut.:

Hasil uji eksitasi



Hasil simulasi 2DOF

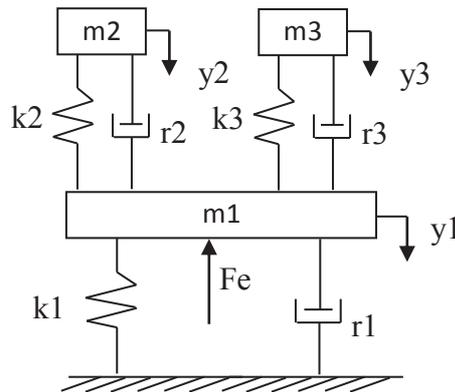


Gambar 5. Grafik FRF Uji Eksitasi Dan Simulasi 2DOF Tanpa *Follower Rest*

Grafik hasil uji eksitasi pada gambar 5 menunjukkan bahwa *compliance* tertinggi terjadi pada frekuensi 126,81 Hz dengan tinggi amplitudo $7,71 \times 10^{-9}$ m/N. Sementara itu grafik hasil simulasi 2DOF menunjukkan bahwa *compliance* tertinggi terjadi pada frekuensi 121,78 Hz dengan tinggi amplitudo $1,48 \times 10^{-6}$ m/N. Terlihat bahwa terjadi perbedaan frekuensi hasil uji eksitasi dan simulasi sebesar 4%. Pemodelan dengan 2DOF diambil pada 2 frekuensi pribadi yang berdekatan dengan frekuensi *chatter* 135 Hz.

3.2 Analisis Sistem Getaran Tiga Derajat Kebebasan Dengan *Follower Rest*

Model dinamik sistem getaran tiga derajat kebebasan dengan menggunakan *follower rest* dapat disederhanakan menjadi seperti gambar 6 berikut.



dimana:

m_1 = massa benda kerja

m_2 = massa tambahan 1

m_3 = massa tambahan 2

k_1 = kekakuan rahang dan *tailstock spindle*

k_2 = kekakuan pegas 1

k_3 = kekakuan pegas 2

r_1 = redaman rahang dan *tailstock spindle*

r_2 = redaman pegas 1

r_3 = redaman pegas 2

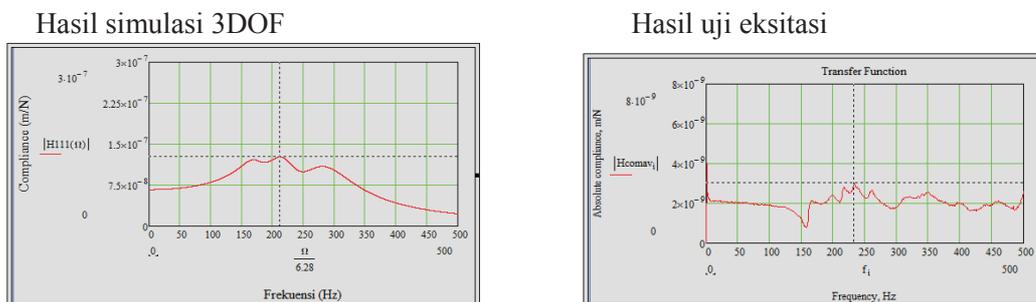
F_e = gaya eksitasi

Gambar 6. Penyederhanaan Model Dinamik 3DOF Dengan *Follower Rest*

Persamaan model matematis gerak sistem getaran 3DOF dengan *follower rest* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 + r_2 + r_3 & -r_2 & -r_3 \\ -r_2 & r_2 & 0 \\ -r_3 & 0 & r_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_3 & -k_2 & -k_3 \\ -k_2 & k_2 & 0 \\ -k_3 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_e \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Hasil uji eksitasi dan simulasi 3DOF dengan menggunakan *follower rest* ditunjukkan pada gambar 7 berikut untuk kondisi optimum dimana kekakuan pegas $k_5 = 4,17 \times 10^5$ N/m dan posisi preload 720° .

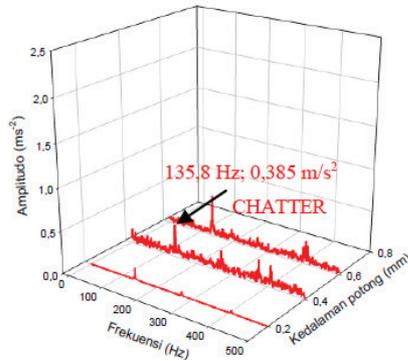


Gambar 7. Grafik FRF Uji Eksitasi Dan Simulasi 3DOF Dengan Menggunakan *Follower Rest* Pada Kondisi optimum

Grafik hasil uji eksitasi pada gambar 7 menunjukkan bahwa *compliance* tertinggi terjadi pada frekuensi 233,65 Hz dengan tinggi amplitudo $3,0 \times 10^{-9}$ m/N. Sementara itu grafik hasil simulasi 3DOF menunjukkan bahwa *compliance* tertinggi terjadi pada frekuensi 212,26 Hz dengan tinggi amplitudo $1,26 \times 10^{-7}$ m/N. Terlihat bahwa terjadi perbedaan frekuensi hasil uji eksitasi dan simulasi sebesar 9,15%.

3.3 Uji Pemotongan Tanpa Menggunakan *Follower Rest*

Pada uji pemotongan benda kerja untuk menentukan batas stabilitas dimulai dari kedalaman potong 0,2 mm dan kelipatannya untuk berikutnya hingga terjadi *chatter*. Pada uji pemotongan benda kerja tanpa menggunakan *follower rest*, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 0,4 mm seperti ditunjukkan pada gambar 8 berikut.

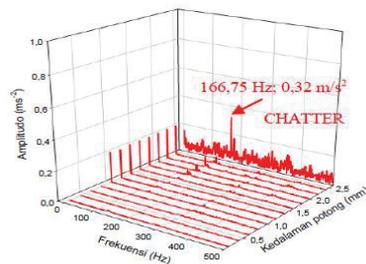


Gambar 8. Grafik *Waterfall* Pada Uji Pemotongan Tanpa Menggunakan *Follower Rest*

Pada kedalaman potong 0,4 mm dapat dilihat bahwa amplitudo naik dibandingkan dengan kedalaman potong sebelumnya. Hal ini menunjukkan telah terjadi getaran yang sangat keras pada benda kerja dan menimbulkan *chatter* pada permukaan benda kerja.

3.4 Uji Pemotongan Menggunakan *Follower Rest* Dengan *Adjustable Jaw* Horisontal

Pada uji pemotongan benda kerja menggunakan *follower rest adjustable jaw* horisontal, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 2,6 mm seperti ditunjukkan pada gambar 9 berikut.

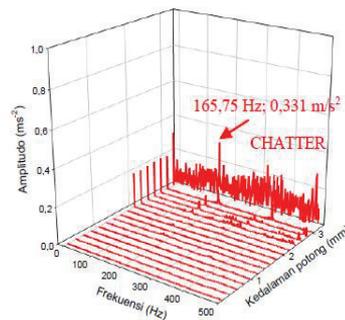


Gambar 9. Grafik *Waterfall* Pada Uji Pemotongan Menggunakan *Follower Rest* Dengan *Adjustable Jaw* Horisontal

Amplitudo naik secara linier saat kedalaman potong 0,2 mm hingga 2,4 mm berikutnya amplitudo melonjak pada kedalaman potong 2,6 mm. Kondisi ini menjelaskan bahwa sistem tidak mampu lagi meredam getaran yang terjadi dan berakibat pada kerusakan permukaan benda kerja atau dikenal sebagai *chatter*.

3.5 Uji Pemotongan Menggunakan *Follower Rest* Dengan *Adjustable Jaw* Horisontal dan *Adjustable Jaw* Vertikal Optimum ($k_5 = 4,17 \times 10^5 \text{ N/m}$ dan posisi preload 720°)

Pada uji pemotongan benda kerja menggunakan *follower rest adjustable jaw* horisontal dan *adjustable jaw* vertikal optimum, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 3,2 mm seperti ditunjukkan pada gambar 10 berikut.



Gambar 10. Grafik *Waterfall* Pada Uji Pemotongan Menggunakan *Follower Rest* Dengan *Adjustable Jaw* Horizontal Dan *Adjustable Jaw* Vertikal Optimum

Saat kedalaman potong 0,2 mm hingga 3,0 mm amplitudo getaran naik perlahan secara linier mencapai $0,095 \text{ ms}^{-2}$ akan tetapi kenaikan amplitudo meningkat tajam hingga lebih dari tiga kali lebih pada kedalaman potong 3,2 mm yang mencapai $0,331 \text{ ms}^{-2}$. Dengan demikian pada benda kerja telah terjadi *chatter*.

4. Kesimpulan

1. Rekayasa *follower rest* dapat meningkatkan batas stabilitas pada proses bubut *slender bar*.
2. Proses bubut *slender bar* tanpa *follower rest*, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 0,4 mm dengan amplitudo $0,385 \text{ ms}^{-2}$.
3. Pada pemotongan menggunakan *follower rest* dengan *adjustable jaw* horizontal, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 2,6 mm atau naik 6,5 kali lipat dibanding tanpa *follower rest*.
4. Pada pemotongan menggunakan *follower rest* dengan *adjustable jaw* horizontal dan *adjustable jaw* vertikal optimum, *chatter* terjadi pada kedalaman potong 3,2 mm atau naik 8 kali dibandingkan tanpa *follower rest* atau naik sekitar 23% dibandingkan *follower rest* dengan *adjustable jaw* horizontal saja.

5. Daftar Referensi

- [1] Suhardjono, *Ein Variabel Einsetzbarer Gedämpfter Tilger zur Reduzierung von Ratterschwingungen bei Drehmaschinen*, Wissenschaft & Technik Verlag, Berlin, 2000.
- [2] Cui, B. dan Guo, J., "Modelling of Dimensional Errors in Slender Bar Turning Process Using Artificial Neural Networks," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 16-19, hal 549-553, 2009.
- [3] Cheng, C. C., Kuo, C. P., dan Cheng, W. N., "Moving Follower Rest Design Using Vibration Absorbers For Ball Screw Grinding," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 326, hal 123-136, 2009.
- [4] Wahyudi, I. A., *Modifikasi Follower Rest Dengan Seismic Damper Untuk Meningkatkan Batas Stabilitas (Chatter) Pada Proses Bubut Slender Bar*, SEMNAS TI UGM, D-8, pp 43-48, 2011.
- [5] Zaveri, K., *Modal Analysis of Large Structures – Multiple Exciter System*, 1st edition, Bruel & Kjaer, USA, 1984.