

Simulasi untuk Memprediksi Pengaruh *Stiffener* pada Peningkatan Kekakuan Benda Kerja

Oegik Soegihardjo¹⁾ dan Suhardjono²⁾

^{1,2)} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra, Surabaya

E-mail: oegiks@peter.petra.ac.id ¹⁾, suhardjono@me.its.ac.id ²⁾

ABSTRAK

Peningkatan kekakuan benda kerja akan meningkatkan batas kestabilan benda kerja terhadap terjadinya chatter. Dengan meningkatnya kekakuan benda kerja, parameter pemesinan seperti putaran spindle dan kedalaman pemotongan dapat dinaikkan guna meningkatkan produktifitas proses pemesinan. Penggunaan *stiffener* merupakan cara sederhana untuk meningkatkan kekakuan benda kerja, dan cocok diterapkan untuk benda kerja yang berongga dan berinding tipis. Simulasi merupakan alat bantu (tool) yang bermanfaat dalam perancangan, untuk memprediksi karakteristik sistem yang sedang dikaji. Simulasi yang dilakukan bertujuan memprediksi karakteristik dinamik dari model benda kerja-*stiffener*, yang melaluinya diperoleh harga frekuensi pribadi (*natural frequency*), modus getar (*mode shape*) dan *compliance* dari model benda kerja-*stiffener*. Paper ini menyajikan simulasi untuk benda kerja tanpa *stiffener*, benda kerja dengan *stiffener* kayu sengon, kayu sono dan kayu jati. Benda kerja mempunyai dimensi panjang 400 mm, lebar 200 mm dan tinggi 150 mm dengan ketebalan 9 mm. *Stiffener* mempunyai dimensi panjang 182 mm, lebar 60 mm dan tinggi 40 mm. Hasil simulasi diverifikasi berdasarkan hasil eksperimen yang sudah dilakukan sebelumnya. Hasil simulasi menunjukkan kecenderungan yang tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen, sehingga simulasi yang dilakukan dapat digunakan sebagai langkah awal (*preliminary study*) untuk mempelajari karakteristik dinamik benda kerja-*stiffener*.

Kata kunci: Karakteristik dinamik, *stiffener*, chatter, kekakuan.

ABSTRACT

Increasing dynamic stiffness of the work-piece will improve its stability limit against chatter. Improvement of work piece stability limit will enable the machine tool operator to boost machining productivity. Many methods were applied to improve the dynamic stiffness of the system (machine tools, work piece, tools) and several of them were expensive. Stiffener can be used to improve dynamic stiffness of the work piece and also suitable for hollow work piece and will cost less. Simulation is a useful tool for preliminary design with the ability to simulate and predict the dynamic characteristic of the system being studied. Simulation presented in this paper is to predict the effect of stiffener on dynamic characteristic of the work piece. It will show the natural frequency, mode shapes and compliance of the system (work piece – stiffener), from which the dynamic characteristic of the system can be evaluated. Solid stiffener i.e. sono, sengon and jati woods are used for the simulation. Dimension of boxed-shape, hollow work piece (length, width, height and thickness) are 400 mm, 200 mm, 150 mm and 9 mm, respectively. As for the stiffener, its dimension (length, width and height) are 182 mm, 60 mm and 40 mm, respectively. The simulation is validated by experimental result. The results of simulation agree with that of the experimental results with margin of error less than 20%. For the preliminary study, the simulation presented on this paper provided good picture of dynamic characteristic of work piece – stiffener.

Keywords: Dynamic characteristic, *stiffener*, chatter, dynamic stiffness.

PENDAHULUAN

Chatter masih menjadi salah satu kendala yang membatasi produktivitas proses pemesinan, menyebabkan rendahnya kualitas permukaan

benda kerja, serta menurunnya umur pahat. Dalam kajian serta evaluasi tentang berbagai upaya yang telah dilakukan untuk mereduksi *chatter* yang dilakukan oleh Siddhpura [1] maupun Quintana [2], menunjukkan bahwa *chatter* masih belum bisa

diatasi sepenuhnya. Berbagai upaya terus dilakukan untuk meningkatkan stabilitas proses pemesinan, baik dengan meningkatkan kekakuan struktur mesin perkakas, meningkatkan kekakuan pahat maupun kekakuan benda kerja. Upaya mereduksi *chatter* dengan meningkatkan kekakuan struktur mesin milling vertikal dilakukan oleh Hung [3] dengan menggunakan *preloaded ball bearing* pada *linear guide*. Upaya ini cukup baik dan bermanfaat untuk diterapkan pada perancangan mesin baru, walaupun mungkin agak mahal bila diterapkan pada mesin yang sudah ada (mengganti *bearing* yang ada dengan *preloaded bearing*).

Catania [4] melakukan eksperimen untuk menunjukkan bahwa pahat dengan *tool holder* pendek, batas kestabilan terhadap *chatter* meningkat. Walaupun proses pemotongan disarankan memakai *tool holder* pendek, di dalam praktek sebagian proses pemesinan dilakukan dengan *tool holder* panjang untuk menjangkau posisi pemotongan di dinding bagian dalam benda kerja.

Choudhury [5] membuat *non-uniform insert pitch* (sudut antar mata yang berbeda pada *holder* pahat *insert*) pada pahat untuk *face milling* sebagai upaya mereduksi *chatter*. Pada pahat dengan *insert pitch* yang berbeda (*non uniform pitch*), batas kestabilan terhadap *chatter* memang meningkat dibandingkan dengan pahat dengan *pitch* sama (*uniform pitch*). Cara ini baik untuk mereduksi *chatter*, walaupun kurang praktis diterapkan di lapangan, karena *holder* pahat dengan *non uniform pitch* perlu dipesan secara khusus. Di samping itu, untuk kondisi pemotongan yang berbeda besaran *non-uniform insert pitch* juga berbeda.

Paper ini menyajikan simulasi penggunaan *stiffener* untuk meningkatkan batas kestabilan terhadap *chatter*. Dari sisi praktis, penggunaan *stiffener* mudah diterapkan di lapangan, terutama untuk benda kerja berongga yang ber dinding tipis. Koenigsberger [6] menguraikan manfaat penggunaan *stiffener* untuk meningkatkan kekakuan struktur kolom mesin perkakas. Bila fenomena yang ingin dipelajari bisa dimodelkan dengan baik, simulasi merupakan cara yang efektif untuk memprediksi efek penggunaan *stiffener* terhadap kekakuan benda kerja.

METODE PENELITIAN

Simulasi untuk memprediksi pengaruh *stiffener* terhadap kekakuan benda kerja, dilakukan dengan *software Ansys*, berupa *modal analysis* dan *harmonic response analysis*. Sebagaimana diuraikan oleh Moaveni [9], prosedur umum analisis yang dilakukan dalam paper ini terdiri dari beberapa tahap, berupa (1) *pre-processing*, (2) *solution*, dan (3) *post-processing*. *Modal analysis* dan *harmonic response analysis* dilakukan di tahap 2 yaitu tahap

solution dengan memilih dua *type analysis*. Analisis pertama yang dilakukan adalah *modal analysis*, sedangkan analisis kedua berupa *harmonic response analysis*.

Beberapaparameter yang bisa dievaluasi berdasarkan simulasi adalah frekuensi natural (*natural frequency*), *compliance* dan modus getar. *Compliance* merupakan rasio antara perpindahan (X) dengan gaya (P) dalam fungsi frekuensi. Semakin besar harga *compliance* mengindikasikan semakin besarnya ketidak-kakuan dari sebuah struktur. *Compliance* dirumuskan dalam bentuk [6],
$$Compliance = \frac{X}{P}(f) \quad (1)$$

Kekakuan dinamik (kebalikan dari *compliance*) merupakan rasio antara gaya (P) dengan perpindahan (X) dalam fungsi frekuensi, dan dirumuskan dalam bentuk [6],

$$K_{dyn} = \frac{P}{X}(f) \quad (2)$$

Jika sebuah sistem memiliki nilai kekakuan dinamik semakin besar, maka sistem tersebut semakin kaku. Untuk sistem yang semakin kaku, batas kestabilan terhadap *chatter* semakin meningkat.

Zaveri [8] menyatakan bahwa modus getar (*mode shape*) merupakan rasio dari amplitudo gerakan dari berbagai titik dalam sebuah struktur pada saat struktur dieksitasi pada frekuensi naturalnya (frekuensi pribadi). Dengan demikian modus getar menunjukkan pola deformasi dari suatu struktur untuk setiap frekuensi naturalnya. Lebih jauh Zaveri [8] menjelaskan dengan asumsi gerakan harmonik, maka untuk sistem getaran tidak teredam dengan 2 derajat kebebasan (*2 degree of freedom (DOF) undamped vibration system*), di mana $\ddot{y}_i = -\lambda_i y_i$ dan $\lambda_i = \omega^2$, dengan $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, maka persamaan aljabar simultan dalam u_i dapat dinyatakan sebagai,
$$[[m]^{-1}[k] - \lambda[1]]\{u\} = 0 \quad (3)$$

Persamaan karakteristik untuk sistem dengan 2 derajat kebebasan untuk sistem getaran tidak teredam (*undamped vibration system*) ditunjukkan dalam Persamaan 4,
$$[[m]^{-1}[k] - \lambda[1]] = 0 \quad (4)$$

Nilai-nilai akar λ_i dari persamaan karakteristik disebut *eigen values*. Frekuensi natural dari sistem getaran tidak teredam dapat ditentukan dari rumus $\lambda_i = \omega^2$. Dengan mensubstitusikan λ_i ke dalam Persamaan 3 maka modus getar untuk setiap frekuensi natural $\{u_i\}$ untuk suatu struktur dapat diperoleh.

Dalam simulasi yang dilakukan, *properties* material dari benda kerja berbentuk kotak berupa

cast iron alloys dengan modulus elastisitas 170 GPa, density 7800 kg/m³, Poisson's ratio 0,30. Properties material stiffener berupa kayu (wood) diambil berdasarkan data yang disajikan Moaveni [9]. Model kontak antara dinding benda kerja dengan stiffener dimodelkan sebagai surface to surface contact areas. Model kontak surface to surface contact areas lebih tepat untuk memodelkan kondisi yang sebenarnya, karena kontak antara stiffener dan benda kerja terjadi antara luas penampang stiffener dengan permukaan dinding bagian dalam benda kerja. Mengidentifikasi surface to surface contact areas antara stiffener dan benda kerja juga lebih mudah dilakukan dalam simulasi, dari pada jenis kontak lainnya misalnya node-to-node contact area.

Dalam simulasi untuk merepresentasikan kontak antara benda kerja dengan stiffener, mensyaratkan adanya target dan contact yang harus ditentukan. Benda kerja (yang lebih kaku) dipilih sebagai target sedangkan stiffener (yang kurang kaku) dipilih sebagai contact. Kontak antara benda kerja dan stiffener disimulasi melalui contact pair dengan parameter yang bisa dipilih dalam contact wizard di software Ansys.

Dua jenis analisis dipilih dalam simulasi yang disajikan di paper ini. Analisis yang pertama adalah modal analysis, dengan number of modes (modus getar) to extract = 5, pada rentang frekuensi 0 – 2000 Hz. Sedangkan analisis kedua berupa harmonic response analysis untuk mendapatkan kurva compliance maupun kurva frequency response function dari benda kerja dan stiffener. Beban sebesar 25 N bekerja ke arah sumbu Y negatif. Arah gaya ini dipilih karena disesuaikan dengan arah gaya eksitasi yang diberikan pada saat eksperimen [7].

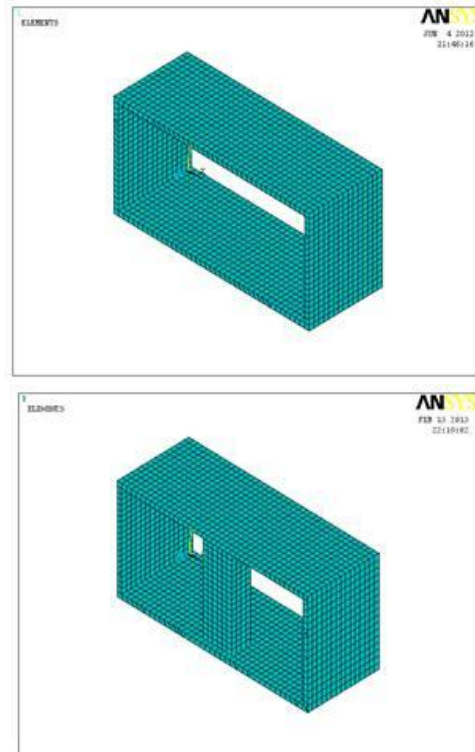
Dimensi benda kerja dalam simulasi adalah: panjang 400 mm, lebar 200 mm, tinggi 150 mm, tebal dinding 9 mm. Dimensi stiffener dalam simulasi adalah: panjang 182 mm, lebar 60 mm, tinggi 40 mm. Dalam simulasi, dimensi model benda kerja maupun stiffener dibuat dengan skala 1:1 (sesuai dengan ukuran benda kerja dan stiffener sebenarnya). Stiffener diletakkan sekitar 10 mm dari permukaan benda kerja.

Gambar 1 adalah model benda kerja tanpa stiffener (kiri) dan benda kerja dengan stiffener sudah terpasang pada benda kerja (kanan).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 adalah perbandingan frekuensi natural antara hasil simulasi modal analysis dan eksperimen. Dalam simulasi modal analysis, diambil 5 modus getar baik untuk benda kerja tanpa stiffener maupun benda kerja dengan stiffener. Lima modus getar (mode shape) untuk benda kerja tanpa stiffener hasil simulasi modal analysis ditunjukkan

di Gambar 2. Tingkat kerapatan meshing model benda kerja maupun stiffener berpengaruh terhadap hasil simulasi. Untuk nilai modulus elastisitas yang sama, ukuran meshing yang kasar cenderung menghasilkan kekakuan yang lebih tinggi. Frekuensi hasil simulasi menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen. Rentang perbedaan paling besar terhadap hasil eksperimen terjadi pada simulasi dengan stiffener kayu jati sebesar 2.7%.



Gambar 1. Model Benda Kerja Tanpa Stiffener (atas) dan Model Benda Kerja dengan Posisi Stiffener Terpasang di Benda Kerja (bawah).

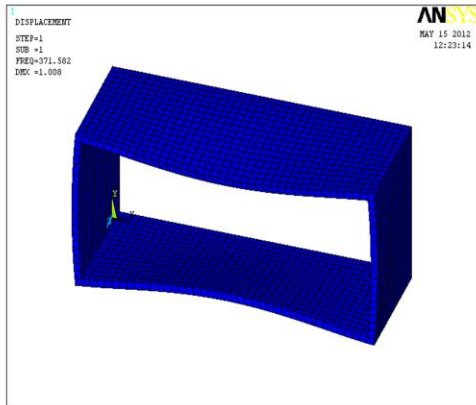
Tabel 1. Frekuensi Hasil Simulasi dan Eksperimen [7].

Stiffener	Frekuensi (Hz)		Perbedaan Hasil Simulasi & Eksperimen (%)
	Simulasi	Eksperimen	
Kosong	371,58	370	0,4
Kayu Sengon	407,39	408	0,1
Kayu Sono	420,58	418	0,6
Kayu Jati	433,52	422	2,7

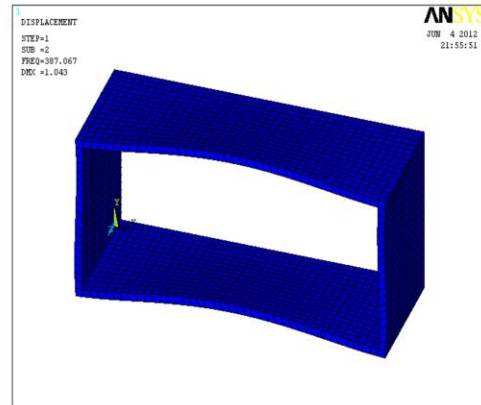
Gambar 3 merupakan lima modus getar benda kerja dengan stiffener kayu sengon. Modus getar benda kerja ini didapatkan melalui simulasi modal analysis. Modus getar benda kerja dengan stiffener kayu sono, kayu sengon maupun kayu jati menunjukkan kesesuaian dengan modus getar benda kerja tanpa stiffener. Harga compliance hasil simulasi diperoleh melalui kurva absolute compliance. Kurva absolute compliance merupakan hasil simulasi menggunakan harmonic response analysis. Nilai

compliance dicantumkan pada Tabel 2 dan di plot dalam Gambar 4. *Compliance* menunjukkan ketidak-kakuan benda kerja, di mana makin besar nilai *compliance* berarti benda kerja semakin

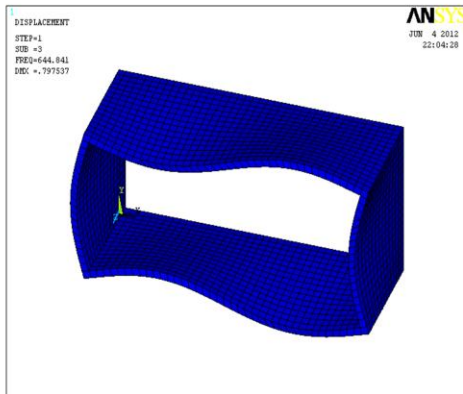
kurang kaku. Nilai *compliance* terbesar adalah untuk benda kerja tanpa *stiffener* dan berturut-turut semakin kecil untuk benda kerja dengan *stiffener* kayu sengon, kayu sono dan kayu jati.



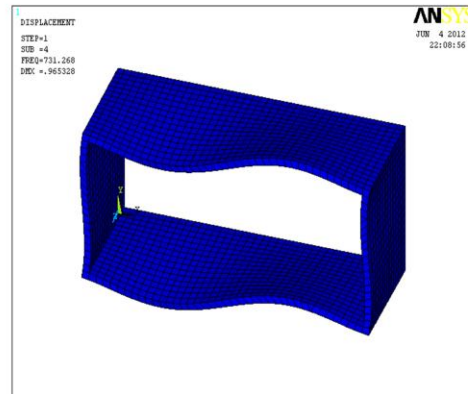
(a) modus getar 1



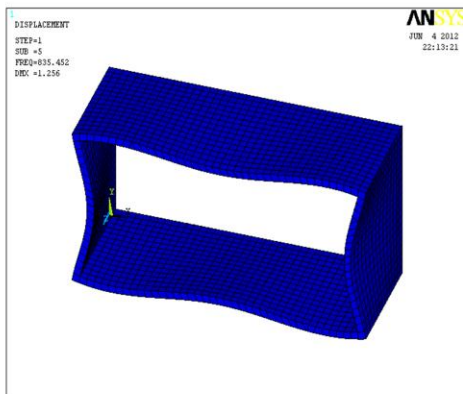
(b) modus getar 2



(c) modus getar 3

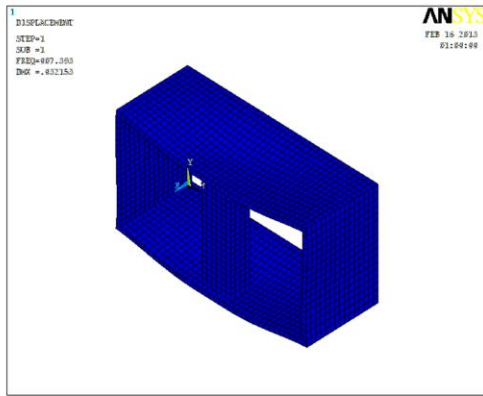


(d) modus getar 4

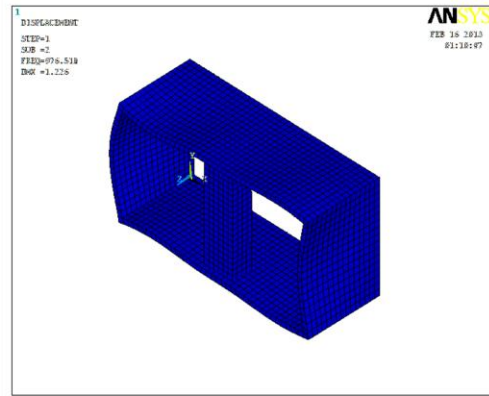


(e) modus getar 5

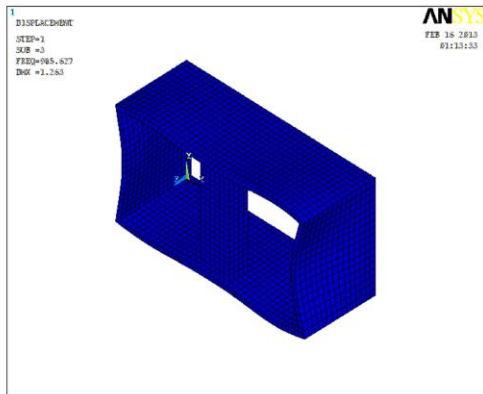
Gambar 2. Modus Getar Benda Kerja tanpa *Stiffener*



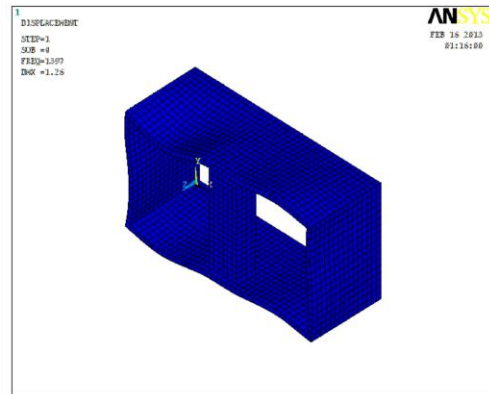
(a) modus getar 1



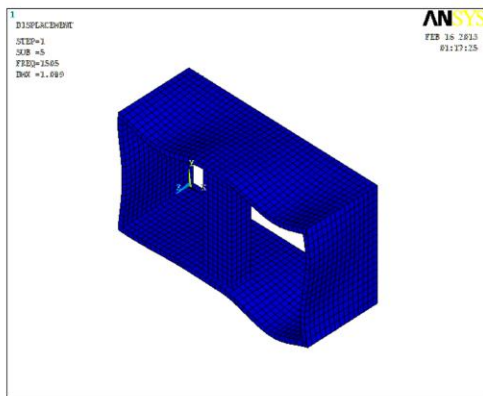
(b) modus getar 2



(c) modus getar 3



(d) modus getar 4

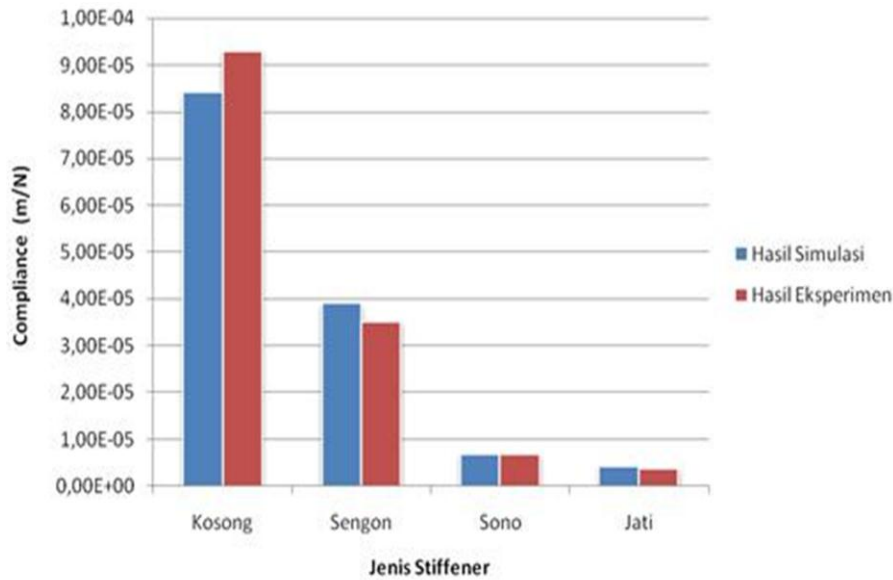


(e) modus getar 5

Gambar 3. Modus Getar Benda Kerja dengan *Stiffener* Kayu Sengon

Tabel 2. Compliance Hasil Simulasi dan Eksperimen [7].

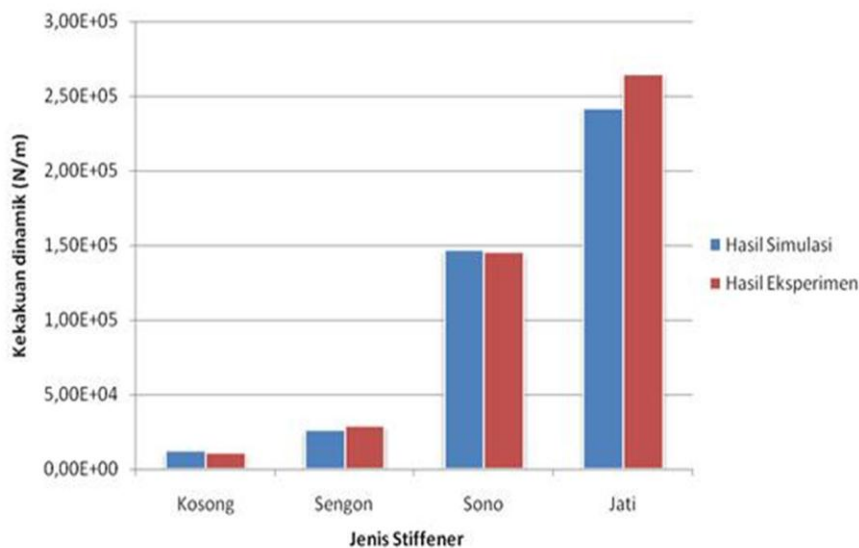
<i>Stiffener</i>	<i>Compliance (m/N)</i>		Perbedaan Hasil Simulasi & Eksperimen (%)
	Simulasi	Eksperimen	
Kosong	8,41e-05	9,30e-05	9,6
Kayu Sengon	3,90e-05	3,52e-05	10,8
Kayu Sono	6,81e-06	6,89e-06	1,2
Kayu Jati	4,14e-06	3,78e-06	9,5



Gambar 4. Kurva *Compliance* Hasil Simulasi & Eksperimen [7] untuk Benda Kerja tanpa dan dengan 3 Jenis *Stiffener*

Tabel 3. Kekakuan Dinamik Hasil Simulasi dan Eksperimen [7]

<i>Stiffener</i>	Kekakuan Dinamik (N/m)		Perbedaan Hasil Simulasi & Eksperimen (%)
	Simulasi	Eksperimen	
Kosong	11890,61	10758,47	9,6
Kayu Sengon	25641,03	28373,90	10,8
Kayu Sono	146842,88	145095,76	1,2
Kayu Jati	241545,89	264644,99	9,5



Gambar 5. Kurva Kekakuan Dinamik Hasil Simulasi & Eksperimen [7] untuk Benda Kerja tanpa dan dengan 3 Jenis *Stiffener*

Hasil simulasi menunjukkan dengan penambahan *stiffener* kayu jati meningkatkan kekakuan benda kerja sebesar 20 kali, bila dibandingkan dengan kekakuan benda kerja tanpa *stiffener*. Peningkatan kekakuan dinamik benda kerja menggunakan kayu sengon dan kayu sono, berturut-turut adalah 2,2 kali dan 12,4 kali.

Peningkatan kekakuan dinamik benda kerja (hasil eksperimen) dengan *stiffener* kayu sengon, kayu sono dan kayu jati, berturut-turut adalah 2,64 kali, 13,5 kali dan 24,6 kali. Walaupun secara numerik hasil simulasi berbeda dengan hasil eksperimen, namun trend hasil simulasi sudah menunjukkan trend yang sesuai dengan hasil eksperimen.

Penyebab potensial yang menyebabkan perbedaan hasil simulasi dan eksperimen antara lain adalah idealisasi kondisi dalam simulasi, berupa pemilihan harga-harga parameter untuk simulasi yang tidak sepenuhnya menggambarkan kondisi sebenarnya. Posisi *node* yang dipilih untuk menentukan harga *compliance* juga mempengaruhi besarnya harga kekakuan benda kerja. Dua posisi *node* yang berdekatan bisa menghasilkan harga *compliance* yang berbeda.

Parameter untuk mensimulasikan kontak antara *stiffener* dengan benda kerja (*surface to surface contact areas*) juga mempengaruhi besarnya frekuensi natural maupun *compliance*. Nilai *penalty stiffness* diambil sebesar 1 agar tidak terjadi *artificial mode of vibration* pada kontak antara benda kerja dan *stiffener*, yang bisa mempengaruhi *compliance*. Nilai *penalty stiffness* sebesar 1 atau lebih besar, adalah nilai yang disarankan agar hasilnya konvergen.

Simulasi *modal analysis* dan *harmonic response analysis* yang sudah dilakukan, dengan hasil dan trend yang tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimen bisa menjadi alternatif kajian pendahuluan untuk mempelajari pengaruh penggunaan *stiffener* terhadap kekakuan dinamik benda kerja. Untuk menjamin agar simulasi dapat merepresentasikan kondisi aktual dengan baik, pemodelan benda kerja - *stiffener* yang dibuat, serta berbagai parameter yang dipilih untuk keperluan simulasi harus dipilih dengan hati-hati.

KESIMPULAN

Fenomena yang dipelajari (benda kerja dengan maupun tanpa *stiffener*) bisa dimodelkan dengan pemodelan yang sedekat mungkin merepresentasikan kondisi aktual yang ingin dipelajari, dapat digunakan sebagai kajian awal untuk melakukan analisis pengaruh penggunaan *stiffener* terhadap kekakuan dinamik benda kerja.

Hasil simulasi penggunaan *stiffener* kayu sengon, kayu sono dan kayu jati, berturut-turut meningkatkan kekakuan dinamik benda kerja

sebesar 2,2 kali, 12,4 kali dan 20 kali bila dibandingkan dengan kekakuan dinamik benda kerja tanpa *stiffener*. Hasil simulasi ini memberikan *trend* yang sesuai dengan hasil eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Siddhpura, M. and Paurobally, R., A Review of Chatter Vibration Research in Turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 61, pp. 27-47, 2012.
- [2] Quintana, G. and Ciurana, G., Chatter in Machining Process: A Review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011.
- [3] Hung, J. P., et al., Finite Element Prediction on the Machining Stability of Milling Machine with Experimental Verification, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 72, 2010.
- [4] Catania, G. and Mancinelli, N., Theoretical-experimental modeling of milling machines for the prediction of chatter vibration, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011.
- [5] Choudhury, S. K., and Mathew, J., Investigations of the Effect of Non-uniform Insert Pitch on Vibration During Face Milling, *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 35, No. 10. pp. 1435-1444, 1995.
- [6] Koenigsberger, F. and Tlustý, J., *Machine Tool Structures*, Volume 1, 1st edition, Pergamon Press Ltd, 1970.
- [7] Utoro, J., *Studi Ekperimental Pengaruh Penggunaan Berbagai Material Stiffener Terhadap Chatter pada Proses Mengefreis Tegak untuk Benda Kerja berbentuk Kotak*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Mesin, FTI Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2006.
- [8] Zaveri, K., *Modal Analysis of Large Structures—Multiple Exciter Systems*, 1st edition, 2nd print, Bruel & Kjaer, November 1984.
- [9] Moaveni, S., *Finite Element Analysis: Theory and Application with Ansys*, 2nd edition, International Edition, Prentice Hall, Pearson Education International, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.