

## Korelasi Kekasaran Permukaan Produk Pemotongan Dengan Faktor Redaman Struktur Mesin Perkakas

Susilo Adi Widyanto, David Siahaan, Achmad Widodo, Sri Nugroho

Jurusan Teknik Mesin Undip, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof Sudarto SH, Tembalang, Semarang  
[susilo70@yahoo.com](mailto:susilo70@yahoo.com)

### Abstrak

Tuntutan kualitas, produktivitas dan efisiensi produksi mendorong industri menerapkan proses produksi terotomasi. Demikian halnya dalam proses pemesinan, penggunaan mesin-mesin CNC telah terbukti mampu memberikan dampak yang besar pada perkembangan industri manufaktur. Untuk menghasilkan mesin perkakas CNC murah, berbagai upaya dilakukan baik dari sistem mekanis maupun sistem kendalinya. Penggunaan bahan baku alternatif yang murah dan mudah dibuat berpeluang besar pada penurunan ongkos produksi mesin perkakas, karena berdasarkan analisis ongkos produksinya, 80% harga mesin perkakas CNC ditentukan oleh ongkos produksi struktur utama mesin (Kushnir and Sheehan, 2003). Paper ini mengusulkan penggunaan kayu sebagai bahan struktur utama mesin milling CNC.

Desain prototipe mesin menggunakan bahan kayu sebagai struktur utama mesin milling dimana dimensinya mengacu pada mesin milling berbahan besi cor produksi satu pabrikan yang sudah ada. Lintasan luncur prototipe mesin terbuat dari bahan baja profil yang dibaut dengan struktur kayu. Sebelum diuji pemotongan, mesin diuji getaran untuk menghitung faktor redaman struktur. Accelerometer diletakkan pada meja mesin sedangkan stimulasi gaya diberikan pada pahat end mill. Uji pemotongan dilakukan dengan variasi kecepatan makan (20, 50 dan 80 mm/min) dan kedalaman potong (0,2; 1,2; 1,3 dan 1,65 mm). Pengukuran faktor redaman dan uji pemotongan juga dilakukan pada mesin milling besi cor. Hasil pengujian kedua mesin dibandingkan.

Hasil pengujian getaran menunjukkan bahwa faktor redaman prototipe mesin kayu lebih rendah dibandingkan mesin milling besi cor, yaitu 0,0416 dan 0,0642 (faktor redaman rata-rata). Dari hasil pengujian faktor redaman pada dua posisi yang berbeda diperoleh bahwa harga faktor redaman mesin kayu pada masing-masing posisi menunjukkan perbedaan yang relatif besar, yaitu 0,0436 dan 0,0397. Hal ini menunjukkan bahwa harga faktor redaman ditentukan oleh kondisi struktur antara accelerometer dengan ujung pahat termasuk didalamnya kondisi sambungan antar sumbu gerak terutama pada bidang kontak lintasan luncur. Hasil pengujian kekasaran permukaan produk pemotongan dengan variasi kecepatan makan dan kedalaman potong antara prototipe mesin kayu dan mesin besi cor menunjukkan kecenderungan yang sama, tetapi pengaruh dua parameter pemotongan tersebut pada prototipe mesin kayu lebih besar dibandingkan mesin besi cor. Permukaan produk yang dihasilkan oleh mesin kayu lebih kasar dibandingkan produk mesin besi cor. Kondisi kekasaran permukaan produk dipengaruhi oleh faktor posisi pemotongan terhadap mekanisme dudukan *bearing leadscrew*.

Kata kunci: struktur kayu, mesin perkakas cnc, kekakuan, peredaman getaran, perilaku dinamik.

### PENDAHULUAN

Dalam desainnya, struktur mesin perkakas harus memenuhi kriteria kekakuan dan kemampuan peredaman getaran. Mangacu pada pertimbangan tersebut, konstruksi mesin perkakas pada umumnya sangat kokoh dan terbuat dari bahan-bahan yang memiliki kemampuan peredaman getaran yang baik seperti bahan besi cor. Dari perhitungan ongkos produksinya, 80 % harga mesin perkakas ditentukan oleh ongkos produksi struktur mekaniknya (Kushnir and Sheehan, 2003). Dengan memodifikasi bahan yang mudah diperoleh dan mudah dibuat akan

mampu menurunkan ongkos produksi mesin perkakas CNC secara signifikan. Salah satu bahan tersebut adalah kayu. Beberapa jenis kayu memiliki sifat mekanis yang sangat baik, sekalipun kayu bersifat orthothropik.

Beberapa bahan lain telah diteliti dalam penggunaannya sebagai struktur utama mesin perkakas, antara lain dilakukan oleh Roysarkar dan Banerjee (2003) yang mengembangkan penggunaan *Epoxy Concrete*. Penelitian lainnya dilakukan oleh Ping dan Hua (2008) dengan menggunakan material *steel-fibber Polymer Concrete* (SFPC). Penelitian

mereka ditujukan untuk menganalisis unjuk kerja statik, dinamik dan termal bahan SFPC. Hasil yang diperoleh membuktikan bahwa bahan SFPC lebih bagus dibandingkan besi cor pada unjuk kerja dinamik dan termal. Untuk mengoptimasi kekakuan struktur mesin perkakas, Nakaminami dkk menginvestigasi metode perancangan struktur untuk mesin perkakas multi aksis. Mereka menganalisis kekakuan statik dan dinamik juga ketelitian gerakan struktur mesin secara teoritis menggunakan FEM. Dari hasil penelitian tersebut ditemukan bahwa penggunaan struktur kotak di dalam kotak menghasilkan ketelitian dan produktivitas terbaik untuk aplikasi struktur mesin perkakas multi aksis.

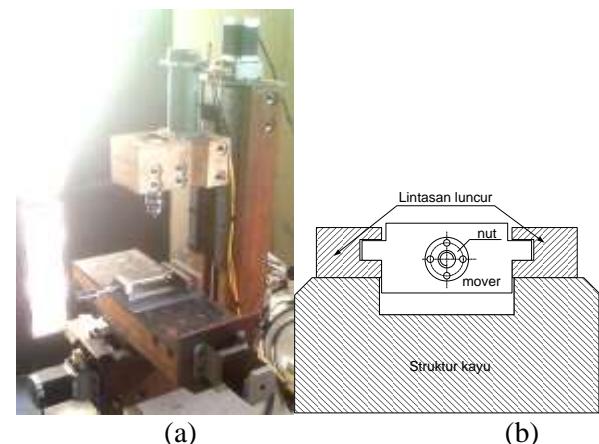
Untuk meningkatkan kekakuan dinamik struktur mesin perkakas, Koci (2003) mengusulkan pengujian karakteristik dinamik mesin perkakas, sedangkan Harm (2006) mengembangkan konsep analisis nodal untuk memperoleh modus frekuensi getar yang terjadi pada saat mesin dioperasikan. Alexander dkk (2003) memperkenalkan konsep internal *damping device* untuk meredam getaran mesin perkakas. Mereka menggunakan suatu internal beam yang dilingkupi cairan yang diletakkan di dalam struktur mesin. Lee dkk (2004) merancang struktur high speed milling machine yang menggunakan bahan *reinforced composite*. Selain mampu menurunkan bobot mesin sekitar 30%, kemampuan peredaman getaran meningkat dari 1,5 sampai 5,7 tanpa mengurangi kekakuannya. Sedangkan ketepatan pemasian meningkat menjadi  $0,5 \mu\text{m}$  untuk gerakan sejauh 300 mm. Yasunori dkk (2004) meningkatkan kapasitas peredaman struktur mesin perkakas dengan menggunakan *balls packing*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa ukuran bola merupakan faktor penting dalam struktur tersebut.

Paper ini membahas penggunaan bahan kayu sebagai struktur utama mesin perkakas. Lintasan luncur tiap sumbu gerak terbuat dari bahan baja karbon rendah (ST-37) yang dibaut dengan struktur kayu. Struktur mesin perkakas berbahan kayu diuji faktor redamannya dan kemudian digunakan untuk uji pemotongan. Prosedur serupa juga diterapkan pada mesin milling berstruktur besi cor yang berdimensi sama dengan mesin milling prototipe. Hasil pengujian pemotongan kedua mesin dibandingkan untuk memperoleh korelasi empiris antara faktor redaman dan kualitas permukaan produk pemesinan.

## METODE PENELITIAN

Rancang bangun prototipe mesin milling CNC berbahan kayu didasarkan pada konstruksi mesin milling yang sudah ada berbahan besi cor. Struktur utama prototipe mesin milling terbuat dari bahan

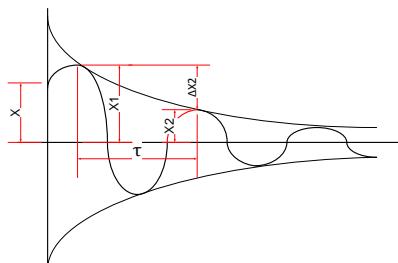
kayu bengkirai (*Shorea laevis*) dengan perlakuan awal berupa proses pengeringan pada temperatur  $45^\circ\text{C}$  hingga tingkat kelembaban mencapai 17%. Konstruksi lintasan luncur terbuat dari bahan baja profil (ST-37) yang disambung baut dengan struktur kayu tersebut. Dudukan motor dan dudukan sistem bantalan *leadscrew* terbuat dari bahan baja plat yang dibaut dengan struktur kayu. Sedangkan dudukan nut terbuat dari bahan nylon sekaligus sebagai konstruksi mover dalam sistem gerak tiap sumbu. Geometri prototipe mesin milling dan konstruksi mekanisme geraknya ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. a. Prototipe mesin milling berbahan kayu, b. Konstruksi mekanisme gerak tiap sumbu gerak mesin

## Pengujian Faktor Redaman Struktur Mesin

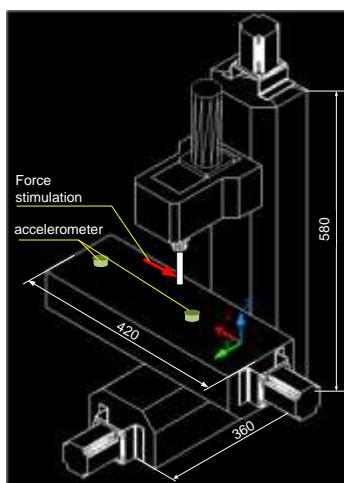
Sebelum dilakukan uji getaran dan pemotongan, prototipe mesin milling kayu diuji ketelitian geometris berdasarkan standar Schlesinger (1978). Faktor redaman sistem mekanis mesin diuji pada dua posisi relatif pahat terhadap meja dengan menggerakkan ketiga sumbu gerak mesin. Pengujian getaran pada masing-masing posisi dilakukan sebanyak 5 kali. Contoh hasil pengukuran getaran seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Berdasarkan data hasil pengukuran tersebut, faktor redaman dihitung dengan mencari harga logartima dekremen (Persamaan 2) dan memasukkannya ke dalam persamaan faktor redaman (Persamaan 1). Setiap data pengukuran diambil tiga harga faktor redaman. Prosedur yang sama dilakukan untuk 5 pengukuran dalam satu posisi tersebut, sehingga akan diperoleh 15 data faktor redaman. Harga faktor redaman yang mewakili tiap posisi merupakan harga faktor redaman rata-ratanya.



**Gambar 2.** Contoh hasil pengujian getaran yang merupakan bentuk getaran teredam.

$$\delta = \ln\left(\frac{X_1}{X_2}\right) = \ln(e^{\varphi f \tau}) = \varphi f \tau \dots \dots \dots \quad (1)$$

Dengan prosedur yang sama, pengukuran faktor redaman juga dilakukan untuk mesin milling berstruktur besi cor. Set-up pengujian faktor redaman mesin milling seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.



**Gambar 3.** Skema pengujian faktor redaman struktur mesin.

## Pengujian pemotongan

Pengujian pemotongan menggunakan pahat end mill berdiameter 6 mm dengan empat mata potong pada pengaturan kecepatan potong 37,68 m/menit. Kecepatan makan divariasikan meliputi: 20, 50, 80 mm/menit, sedangkan kedalaman potong divariasikan 0,2; 1,2; 1,3 dan 1,65 mm. Raw material berupa paduan Al-Cu atau duralumin. Permukaan hasil pemotongan diuji kekasaran permukaannya dengan surface roughness tester. Prosedur pengujian pemotongan juga dilakukan pada mesin milling berbahan besi cor. Kekasaran permukaan hasil pemotongan kedua mesin, yang diwakili oleh harga kekasaran rata-rata ( $R_a$ ), dibandingkan sehingga diperoleh pengaruh faktor redaman getaran terhadap kondisi permukaan terpotong.

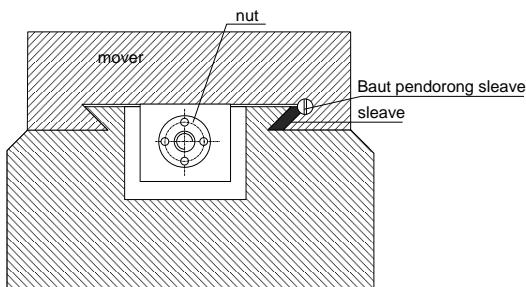
## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

## **Hasil Pengujian Faktor redaman**

Hasil pengujian getaran menunjukkan bahwa faktor redaman mesin milling berbahan besi cor lebih besar dibandingkan mesin milling berbahan kayu, yaitu 0,0642 dan 0,0416 (faktor redaman rata-rata). Dari hasil pengujian faktor redaman pada dua posisi yang berbeda diperoleh bahwa harga faktor redaman mesin kayu pada masing-masing posisi menunjukkan perbedaan yang mencolok, yaitu 0,0436 dan 0,0397. Perubahan posisi mesin perkakas menyebabkan perubahan kondisi sambungan antar komponen geraknya baik untuk lintasan luncur maupun konstruksi ulir penggeraknya. Dari kondisi tersebut terlihat bahwa untuk tiap posisi (yang merupakan variasi posisi dari ketiga sumbu gerak mesin) akan menghasilkan harga faktor redaman yang berbeda-beda. Pada kondisi sambungan yang memungkinkan terjadinya celah (luas bidang kontak minimum) cenderung mereduksi dampak getaran yang terjadi pada komponen-komponen yang lebih jauh dari sumber getarannya (susunan komponen digambarkan dalam bentuk rangkaian serial).

Dari konstruksi lintasan luncur yang digunakan, prototipe mesin milling kayu menggunakan dua bidang gesek untuk menahan beban vertikal dan horisontal. Luasan bidang gesek pada tahanan gaya horisontal lebih kecil dibandingkan tahanan gaya vertikalnya. Komponen mover (dudukan nut) yang digunakan untuk menghubungkan dengan sumbu gerak lainnya terbuat dari bahan nylon dan pengaturan kondisi kontaknya dengan lintasan luncur menggunakan lubang slot.

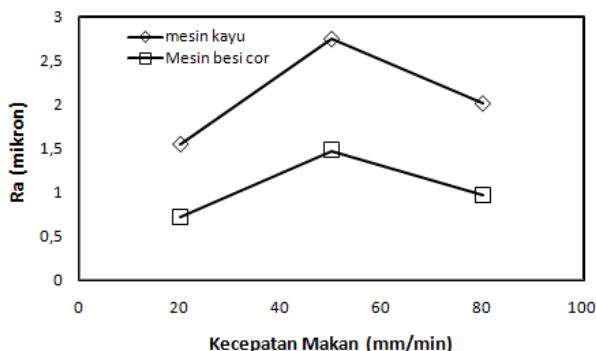
Faktor redaman mesin berbahan besi cor lebih baik dibandingkan faktor redaman mesin milling kayu. Hal tersebut tidak terlepas dari kontribusi luasnya bidang kontak pada sistem gerak terutama pada sistem lintasan luncur. Konstruksi lintasan luncur mesin berbahan besi cor menggunakan model ekor burung dengan proses grinding permukaan. Kondisi kontak antar permukaan antara mover dan lintasan luncur diatur dengan mekanisme sleave. Konstruksi lintasan luncur mesin berbahan besi cor ditunjukkan dalam Gambar 4.



**Gambar 4.** Konstruksi mekanisme gerak mesin milling dari bahan besi cor.

### Hasil pengujian pemotongan

Kondisi kekasaran permukaan rata-rata untuk mesin milling kayu maupun mesin milling besi cor menunjukkan kecenderungan yang sama pada pemvariasian kecepatan makan (Gambar 5). Namun dari hasil pengukuran kondisi permukaan produk pemotongan, mesin milling kayu menghasilkan permukaan yang lebih kasar dibandingkan mesin milling besi cor.

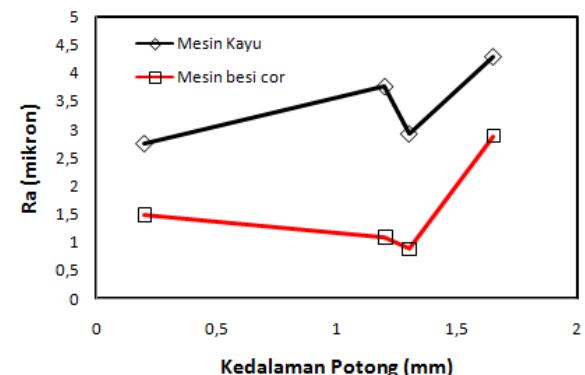


**Gambar 5.** Kondisi kekasaran permukaan produk pemotongan mesin kayu dan mesin besi cor pada variasi kecepatan makan (dept of cut = 0.2 mm, raw material of duralumin).

Peningkatan harga kedalaman potong secara langsung akan meningkatkan gaya pemotongan yang terjadi sehingga kekasaran permukaan produk cenderung meningkat. Hal yang sama ditunjukkan dari kecenderungan grafik yang dihasilkan dari uji pemotongan. Berdasarkan analisis gaya pemotongan yang bekerja, benda kerja menerima gaya pemotongan yang dapat diuraikan menjadi tiga arah gaya, yaitu gaya aksial (sesumbu pahat-vertikal), gaya tangensial dan gaya arah pemakanan. Gaya aksial pahat dipengaruhi oleh sudut helikal pahat yang akan menghasilkan gaya normal pada permukaan gesek lintasan luncur yang berperan dalam memastikan gerakan. Gaya arah tangensial menyebabkan gerakan rotasi meja yang dampaknya

tidak signifikan terhadap kekasaran permukaan, sedangkan gaya yang bekerja pada arah pemakanan, kondisinya ditentukan oleh ketelitian geometri ulir penggerak (*leadscrew*) termasuk *backlash*.

Kekasaran permukaan terpotong yang dihasilkan mesin kayu lebih besar dibandingkan mesin milling besi cor pada variasi kedalaman potong (Gambar 6). Kondisi kekasaran permukaan produk hasil pemotongan mesin kayu dominan disebabkan oleh aspek kondisi permukaan lintasan luncur dan ketidaktelitian gerakan sistem ulir penggerak. Dengan konstruksi lintasan luncur Gambar 1, luas bidang kontak antara permukaan gesek lintasan luncur dengan dudukan nut secara langsung berdampak pada kesalahan dimensi arah vertikal berdampak langsung pada kondisi kekasaran permukaan produk pemotongan.

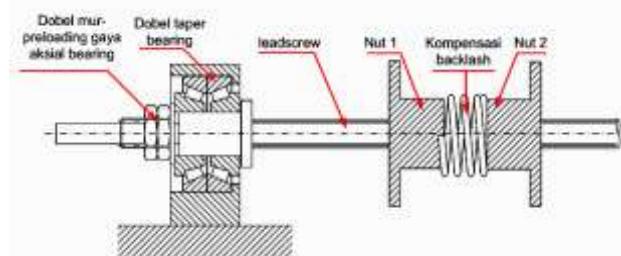


**Gambar 6.** Kondisi permukaan produk pemotongan mesin kayu dan mesin besi cor pada variasi kedalaman potong (*feeding speed* of 50 mm/min, raw material of duralumin)

Hasil pengujian kekasaran permukaan produk juga menunjukkan bahwa arah pemotongan mesin milling kayu berpengaruh pada kualitas permukaan produk. Untuk kedalaman potong 1,2 mm, pada arah X positif kekasaran permukaan produk adalah 3,224 mikron, sedangkan pada arah X negatif kekasaran permukaan produk adalah 3,707. Ketidak-konsistennan kekasaran permukaan produk pemotongan disebabkan oleh masalah akurasi geometri antara lintasan luncur dengan mover serta akibat kondisi kekakuan aksial ulir penggerak. Akibat kontur permukaan bidang gesek antara lintasan luncur dan mover yang relatif kasar menyebabkan pola gerakan mover yang tidak konsisten pada arah maju dan mundur.

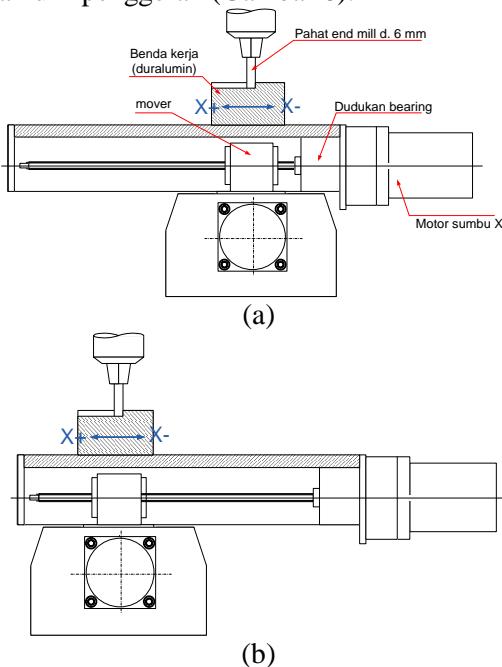
Untuk memastikan pengaruh kekakuan aksial konstruksi ulir penggerak pada kualitas permukaan produk, posisi pemotongan divariasikan menurut posisi relatifnya terhadap sistem dudukan bantalan. Mesin milling kayu menggunakan sistem bantalan

fixed-free (Gambar 7) dengan bentuk ulir segitiga hasil proses penggerolan.



**Gambar 7.** Sistem bantalan fixed-free untuk ulir penggerak.

Pada posisi pertama ragum diletakkan di atas meja mesin dengan posisi berdekatan dengan sistem dudukan *bearing*. Sedangkan posisi kedua ragum diletakkan pada ujung meja mesin yang berdekatan dengan ulir penggerak (Gambar 8).



**Gambar 8.** a. Posisi pemotongan dekat dengan dudukan *bearing*, b. Posisi pemotongan dekat dengan ujung ulir penggerak.

Hasil pengujian kekasaran menunjukkan bahwa posisi yang berdekatan dengan sistem dudukan *bearing* menghasilkan permukaan yang lebih halus dibandingkan permukaan yang dihasilkan oleh posisi di dekat ujung ulir penggerak baik untuk arah X positif maupun X negatif (Tabel 1). Berdasarkan analisis gaya-gaya yang bekerja pada ulir penggerak, gaya pemakanan membebani ulir penggerak sejajar dengan sumbunya. Sedangkan arah gaya pemotongan yang lain ditahan oleh sistem lintasan luncur. Pada arah pemakanan X positif, ulir penggerak mengalami beban tekan, sedangkan pada arah X negatif ulir penggerak mengalami beban tarik.

Tabel 1. Kekasaran Permukaan Produk Pemotongan Pada Variasi Posisi Pemotongan dan Arah Pemotongan (Kedalaman potong = 0,5 mm)

Posisi Pemotongan	Arah Pemotongan	
	X+	X-
Dekat dudukan <i>bearing</i>	1,818	2,387
Dekat ujung ulir penggerak	3,015	2,717

Kondisi kekakuan aksial ulir penggerak pada dua posisi pemotongan tersebut berbeda, dimana posisi yang berdekatan dengan dudukan sistem *bearing* menghasilkan kakauan aksial yang lebih besar. Untuk sistem dudukan *bearing* model fixed-free (Gambar 8), kekakuan aksial ulir penggerak berbanding terbalik terhadap posisi sistem dudukan *bearing* seperti ditunjukkan dalam Persamaan (3).

$$K_s = \frac{A \cdot E}{1000 \cdot L} \quad \dots \dots \dots (3)$$

A : luas penampang poros ulir ( $\text{mm}^2$ )

d1 : diameter minor pros ulir (mm)

E : Modulus Young ( $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ )

L : jarak antara dua pemukaan dudukan bantalan (mm)

## KESIMPULAN

Faktor redaman mesin milling kayu lebih rendah dibandingkan mesin milling berbahan besi cor. Kondisi tersebut berpengaruh pada kualitas permukaan produk pemotongan yang dihasilkan. Permukaan produk hasil pemotongan mesin milling kayu dengan variasi *feeding speed* dan kedalaman potong lebih kasar dibandingkan mesin milling besi cor. Namun rendahnya kualitas permukaan produk pemotongan tersebut bukan semata-mata hanya disebabkan oleh jenis strukturnya tetapi juga akibat pengaruh konstruksi sistem gerak mesin yang meliputi lintasan luncur dan ulir penggeraknya.

## Pustaka

Alexander H. S, Eric R. M and Douglas H. S., 2003 , *A new damper design for machine tool structures: the replicated internal viscous damper*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

Harms, A., 2006,"Increasing the dynamic stiffness of Machine tools by means of Modal Analysis", *Proceeding of Machine Tool Construction Conference 23th March 2006*, Munich, Germany

Koci, P., 2003, "Assessment of machine tool dynamic properties", *Acta Montanistica Slovaca* Vol 8, No 4

Kushnir, E and Sheehan, T., 2003, "Development of machine tool structure at the early stages of design process", *Proceeding of ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition November 15-21 2003, Washington DC, USA*

Lee, D. G, Suh, J. G., Kim, H. S and Kim, J. M., 2003," Design and manufacture of composite high speed machine tool structures", *Composites Science and Technology* .., 64 (2004) 1523–1530

Nakaminami, M., Tokuma, T, Matsumoto, K, Sakashita, S., Moriwaki, T and Nakamoto, K., 2007," Optimal Structure Design Methodology for Compound MultiaxisMachine Tools ", *Int. J. of Automation Technology*, 1(2), 87.

Ping, X and Hua, Y.U.Y., 2008, " Research on steel-fiber polymer concrete machine tool structure", *Journal of coal and engineering..*, 14(4).., pp 689-692

Roysarkar, K. P and Banerjee., 2003," Designing Machine Tool Structures With Epoxy Concrete", *Buletin of Rapid prototyping and tolling group of Central Mechanical Engineering Research Institute*, Durgapur-713 209.

Schlesinger, G., 1978., *Testing Machine Tools*, Pergamon Press in Oxford [Eng.], New York

Yasunori, W., Masatoshi, H and Etsuo, M., 2004," The damping capacity improvement of machine tool structures by balls packing", *International Journal of Machine tools and Manufacture..*, 44., pp. 1527-1536