

## Evaluasi Prototipe Mesin Perkakas Nasional

Agung Wibowo\*, Tri Prakosa, Sri Raharno dan Arie Nugraha

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara

Institut Teknologi Bandung

Jl Ganesh 10, Bandung, 40132

Email korespondensi: a\_wibowo\_m@yahoo.com

### Abstrak

Perancangan struktur mesin perkakas merupakan suatu hal yang unik dibandingkan dengan dibandingkan dengan perancangan peralatan atau produk lainnya, dimana hampir seluruh komponen penyusunnya harus mampu menahan defleksi statik dan dinamik, dan memenuhi kriteria kekakuan. Lebih lanjut, ketelitian, performa dan kapabilitas mesin perkakas sangat mempengaruhi kualitas produk yang dihasilkannya disamping kemampuan mesin perkakas tersebut dalam menghasilkan produk secara produktif dan ekonomis.

Suatu perusahaan swasta nasional telah berhasil membangun prototipe mesin perkakas (Mesin freis vertikal CNC 3 axis) dan untuk mengetahui kemampuan mesin perkakas tersebut perlu dilakukan beberapa evaluasi yang pada akhirnya hasil evaluasi tersebut akan digunakan untuk melakukan perbaikan dan pengembangan selanjutnya. Beberapa pengujian telah dilakukan pada prototipe mesin perkakas tersebut, diantaranya adalah pemeriksaan karakter dinamik dari struktur mesin perkakas, dan pengetesan ketelitian geometri. Beberapa kelemahan telah ditemukan dan beberapa saran perbaikan akan dikemukakan. Beberapa tindakan telah dicobakan dalam rangka meningkatkan ketelitian mesin perkakas. Secara keseluruhan kegiatan ini merupakan tahap awal dari rangkaian kegiatan pengembangan mesin perkakas nasional yang sedang dilakukan.

Kata kunci: Mesin Perkakas, CNC, Freis, Pengetesan, Evaluasi, ketelitian

### Pendahuluan

Kemajuan Industri manufaktur di Indonesia saat ini sedang berkembang relatif pesat, dan hal ini tentu saja patut disyukuri. Meskipun demikian, patut pula diperhatikan bahwa mesin perkakas, sebagai penopang utama industri manufaktur, sebagian besar masih diimpor karena industri mesin perkakas dalam negeri yang belum berkembang. Kondisi ini diperparah dengan ketidaksadaran sebagian masyarakat industri di Indonesia, yang masih menggunakan kriteria harga bukan kualitas sebuah mesin, dalam memilih mesin perkakas yang akan dibeli.

Dalam kondisi pengguna mesin perkakas seperti ini, terdapat sebuah industri dalam negeri Indonesia yang berani berinvestasi dan melakukan pengembangan dalam pembuatan mesin perkakas. Agar mesin perkakas yang diproduksinya dapat bersaing dengan buatan luar negeri maka ketelitian, produktivitas serta harganya harus dapat bersaing.

Untuk tujuan tersebut, kerjasama dilakukan antara tiga pihak yaitu Kemenperin (Kementerian Perindustrian Indonesia), salah satu industri mesin perkakas di Indonesia dan Institut Teknologi Bandung (ITB) dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas mesin perkakas buatan dalam negeri. Sebagai bahan kajian, dipilih mesin perkakas CNC Milling Vertikal VMC 250, yang memiliki panjang langkah 250 mm.

### Desain dan Konstruksi

Prototipe mesin perkakas CNC Milling Vertikal VMC 250 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Prototipe Mesin Freis Vertikal

Konstruksi dari mesin perkakas ini menggunakan material baja konstruksi SS400 yang dilas dan dilengkapi dengan perangkat *with automatic tools changing* (ATC).

### Karakteristik Dinamik

Ketelitian mesin perkakas tidak hanya dipengaruhi oleh ketelitian geometrik, tetapi juga dipengaruhi oleh: Beban statik, karakteristik dinamik, dan beban termal. Pada saat ini pengujian karakteristik mesin terhadap beban termal dan beban statik masih belum dilaksanakan sementara pengujian yang terkait pemodelan dan pengujian terhadap karakteristik dinamik telah dilaksanakan.

Pada Karakteristik dinamik yang diketahui adalah frekuensi pribadi dan modus getar dari mesin. Pemodelan mesin perkakas ini dilakukan dengan menggunakan Perangkat lunak Elemen Hingga ANSYS® untuk mendapatkan perkiraan frekuensi pribadi dan modus getar. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1.

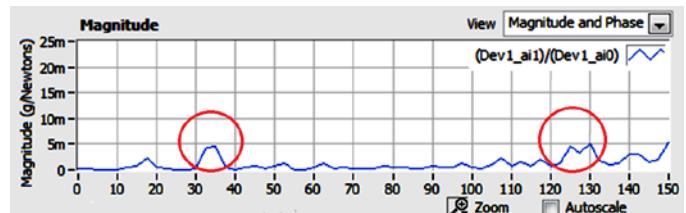
Tabel 1 Frekuensi Pribadi dan Modus getar yang diperoleh saat dimodelkan dengan Perangkat lunak ANSYS®

Modus Getar	Frekuensi Pribadi	
	Hertz	Rpm
1	32.944	1977
2	40.449	2427
3	89.97	5398
4	97.84	5870
5	121.05	7263
6	126.21	7573

Hasil ini harus divalidasi oleh eksperimen untuk menemukan Fungsi Respon Frekuensi (FRF). Penelitian dilakukan dengan menggunakan

accelerometer piezoelektrik, *Impulse Hammer* yang dilengkapi dengan *Loadcell* piezoelektrik dan *Signal Analyzer*. Dalam proses pengujian posisi accelerometer berada di ujung rumah spindel sedangkan sumber dekat dengan accelerometer. Titik FRF ditunjukkan dalam Gambar 2. Perlu dicatat bahwa karena proses Pembesaran Grafis, FRF menjadi mulus.

Gambar 2 menunjukkan (lingkaran merah) bahwa ada frekuensi alami, diukur dari percobaan, sekitar 20-30 Hz dan sekitar 125-130 Hz. Frekuensi ini sesuai dengan frekuensi: 32,944 Hz, 40,449 Hz, 121,05 Hz dan 126,21 Hz dihasilkan dari model elemen hingga. Frekuensi ini sesuai dengan kecepatan rotasi 1977 rpm, 2427 rpm, 7263 rpm dan 7573 rpm. Ini berarti bahwa spindel tidak bisa diputar pada kecepatan rotasi 1977 rpm dan 2428 rpm. Karena prototipe ini dirancang untuk mencapai 2800 rpm, putaran tersebut dekat dengan frekuensi alami 40,449 Hz (2427 rpm), maka frekuensi ini harus bergeser. Proses desain ulang untuk menggeser frekuensi tidak dibahas dalam tulisan ini.



Gambar 2 FRF Prototipe Mesin Perkakas (Titik Pengujian pada spindel housing)

### Hasil Pengukuran Laser Interferometer

Pengukuran Laser Interferometer telah dibahas pada paper yang dirujuk [1]. Tetapi pada paer ini dilakukan pembadungan terhadap standar ISO *Machining Center*. Hasil pengukuran ditampilkan pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 2 Hasil Pengukuran kesalahan Posisi

No	Kesalahan Pemosisian			
	Item	X-axis	Y-axis	Z-axis
	<i>Measurement length</i>	280 mm	250 mm	350 mm
1	<i>Mean reversal</i>	-33.393µm	-50.277µm	11.713µm
2	<i>Unidirectional repeatability</i>			
	<i>forward</i>	17.393 µm	62.367 µm	14.425 µm
	<i>reverse</i>	25.880 µm	73.398 µm	60.245 µm
3	<i>Bidirectional repeatability</i>	70.975 µm	123.633 µm	60.245 µm
	<i>Max Error Bidirectional Repeatability</i>	12 µm	12 µm	12 µm

	<i>ISO 10791-4 [1]</i>			
4	<i>Unidirectional accuracy</i>	189,284 $\mu\text{m}$	145,543 $\mu\text{m}$	90,047 $\mu\text{m}$

Tabel 3 Hasil Pengukuran Kelurusan

No	Arah	Kesalahan Kelurusan		
		X-axis	Y-axis	Z-axis
1	<i>Vertical</i>	6,2 $\mu\text{m}/$ 200 mm	6,8 $\mu\text{m}/$ 200 mm	42,4 $\mu\text{m}/$ 225 mm
	<i>Kesalahan Vertikal Maksimum menurut standar ISO10791-2</i>	10 $\mu\text{m}$ /500 mm	10 $\mu\text{m}$ /500 mm	10 $\mu\text{m}$ /500 mm
2	<i>Horizontal</i>	16,6 $\mu\text{m}/$ 275 mm	6,5 $\mu\text{m}/$ 125 mm	13,0 $\mu\text{m}/$ 300 mm
	<i>Kesalahan Horizontal Maksimum menurut standar ISO10791-2 [1]</i>	10 $\mu\text{m}$ /500 mm	10 $\mu\text{m}$ /500 mm	10 $\mu\text{m}$ /500 mm

Tabel 4 Hasil Pengukuran Kesalahan Angular Pitch

No	Kesalahan Angular Pitch			
	Item	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	<i>Mean reversal</i>	0,0070 $\mu\text{m}/$ mm	0,0056 $\mu\text{m}/\text{mm}$	-0,0005 $\mu\text{m}/\text{mm}$
2	<i>Unidirectional repeatability</i>			
	<i>forward</i>	0,0064 $\mu\text{m}/$ mm	0,0195 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0127 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	<i>reverse</i>	0,0148 $\mu\text{m}/$ mm	0,0424 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0106 $\mu\text{m}/\text{mm}$
3	<i>Bidirectional repeatability</i>	0,0170 $\mu\text{m}/$ mm	0,0424 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0127 $\mu\text{m}/\text{mm}$
4	<i>Unidirectional accuracy</i>	0,0657 $\mu\text{m}/$ mm	0,0982 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0665 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	<i>Kesalahan Angular Maksimum menurut standar ISO10791-2 [1]</i>	0,060 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,060 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,060 $\mu\text{m}/\text{mm}$

Tabel 5 Hasil Pengukuran Kesalahan Angular Yaw

No	yaw			
	Item	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	<i>Mean reversal</i>	-0,0688 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0048 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0005 $\mu\text{m}/\text{mm}$
2	<i>Unidirectional repeatability</i>			
	<i>forward</i>	2,1077 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0155 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0051 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	<i>reverse</i>	2,1854 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0276 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0064 $\mu\text{m}/\text{mm}$
3	<i>Bidirectional repeatability</i>	2,1854 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0276 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0064 $\mu\text{m}/\text{mm}$

4	<i>Unidirectional accuracy</i>	82,6200 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,0487 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,5759 $\mu\text{m}/\text{mm}$
	<i>Kesalahan Angular Maksimum menurut standar ISO-10791-2 [1]</i>	0,060 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,060 $\mu\text{m}/\text{mm}$	0,060 $\mu\text{m}/\text{mm}$

**Hasil Pengukuran Menggunakan DBB**

Pengukuran menggunakan *Double Ballbar* dilakukan pada bidang XY dan YZ. Hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6 Pengukuran pada Bidang XY

No	Jenis Kesalahan	Hasil Pengukuran	
1	<i>Backlash-X</i>	► 80,1 $\mu\text{m}$	◀ 29,8 $\mu\text{m}$
2	<i>Backlash-Y</i>	▲ 29,4 $\mu\text{m}$	▼ 40,5 $\mu\text{m}$
3	<i>Reversal spikes-X</i>	► 17,9 $\mu\text{m}$	► 38,9 $\mu\text{m}$
4	<i>Reversal spikes-Y</i>	▲ 32,5 $\mu\text{m}$	▼ 21,2 $\mu\text{m}$
5	<i>Lateral play-X</i>	► 7,2 $\mu\text{m}$	◀ 54,2 $\mu\text{m}$
6	<i>Lateral play-Y</i>	▲ 1,7 $\mu\text{m}$	▼ 28,5 $\mu\text{m}$
7	<i>Cyclic error-X</i>	↑ 7,2 $\mu\text{m}$	↓ 54,2 $\mu\text{m}$
8	<i>Cyclic error -Y</i>	↑ 17,5 $\mu\text{m}$	↓ 16,3 $\mu\text{m}$
9	<i>Servo mismatch</i>	-22,56 ms	
10	<i>Squareness</i>	-221,0 $\mu\text{m}/\text{m}$	
11	<i>Straightness-X</i>	1,8 $\mu\text{m}$	
12	<i>Straightness-Y</i>	9,4 $\mu\text{m}$	
13	<i>Circularity</i>	479,5 $\mu\text{m}$	

Tabel 7 Pengukuran pada Bidang YZ

No	Jenis Kesalahan	Hasil Pengukuran	
1	<i>Backlash-Y</i>	► 13,7 $\mu\text{m}$	◀ 20,0 $\mu\text{m}$
2	<i>Backlash-Z</i>	▲ 25,5 $\mu\text{m}$	▼ 35,7 $\mu\text{m}$
3	<i>Reversal spikes-Y</i>	► 11,6 $\mu\text{m}$	► 0,0 $\mu\text{m}$
4	<i>Reversal spikes-Z</i>	▲ 35,8 $\mu\text{m}$	▼ 0,0 $\mu\text{m}$
5	<i>Lateral play-Y</i>	► -14,0 $\mu\text{m}$	◀ 8,0 $\mu\text{m}$
6	<i>Lateral play-Z</i>	▲ 3,9 $\mu\text{m}$	▼ -3,1 $\mu\text{m}$
7	<i>Cyclic error-Y</i>	↑ 37,5 $\mu\text{m}$	↓ 18,4 $\mu\text{m}$
8	<i>Cyclic error -Z</i>	↑ 14,8 $\mu\text{m}$	↓ 14,5 $\mu\text{m}$
9	<i>Servo mismatch</i>	0,14 ms	
10	<i>Squareness</i>	3,9 $\mu\text{m}/\text{m}$	
11	<i>Straightness-Y</i>	-27,0 $\mu\text{m}$	
12	<i>Straightness-Z</i>	3,0 $\mu\text{m}$	
13	<i>Circularity</i>	114,9 $\mu\text{m}$	

**Perbaikan**

Mengacu pada ISO 10791–2 dan 4 ada beberapa nilai yang tidak dapat memenuhi standar:

- Kesalahan Pemosisian sumbu X, Y dan Z melebihi standar yang ditetapkan pada standar maksimal adalah 12  $\mu\text{m}$  sementara kesalahan sumbu X adalah 70,975  $\mu\text{m}$ , Sumbu Y 123,633  $\mu\text{m}$  dan sumbu Z 60,245  $\mu\text{m}$ .
- Kesalahan *Angular pitch* pada sumbu X 0,0657  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , Sumbu Y 0,0982  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , dan sumbu Z 0,0665  $\mu\text{m}/\text{mm}$

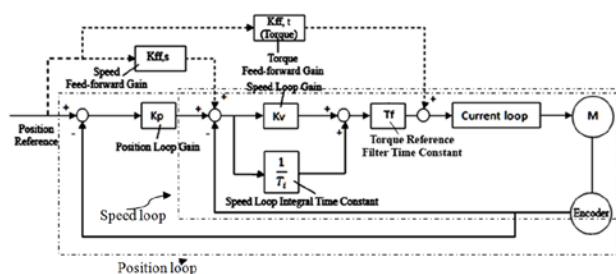
- Kesalahan *Angular yaw* pada sumbu X adalah 82,6200  $\mu\text{m}/\text{mm}$ .
- Kesalahan Ketegak lurusan (Perpendicularity) maksimum berdasarkan standar ISO 10791-2 adalah adalah 20  $\mu\text{m} / 500\text{mm}$  [1] sementara hasil pengujian antara sumbu X dan sumbu Y: -221,0  $\mu\text{m}/\text{m}$  (-110,5  $\mu\text{m}/500 \text{ mm}$ )
- *Servo mismatch* pada bidang XY: -20,88 ms dan *circularity error*: 1133  $\mu\text{m}$

Upaya yang perlu dilakukan untuk meningkatkan ketelitian mesin perkakas agar diharapkan dapat memenuhi standar ISO adalah:

- Perbaikan proses *scrapping* pada kolom sumbu Z terutama pada permukaan bertumpunya *linear guide* sehingga diharapkan kelurusan sumbu Z meningkat.
- Kesalahan *angular pitch* dan *yaw* pada sumbu X, Y dan Z dapat dilakukan dengan melakukan perbaikan pada proses perakitan *linear guide*.
- Ketegak lurusan bidang XY dapat ditingkatkan dengan memperbaiki ketegak lurusan *saddle* dan *table*.
- Kesalahan *Circularity* pada bidang XY dapat diperkecil dengan melakukan *tuning* pada motor servo untuk memperkecil *servo mismatch*.

Proses perakitan ulang dan proses *scrapping* hingga saat ini masih belum selesai maka perbaikan yang dilakukan dan dibahas pada paper ini adalah cara untuk melakukan *servo tuning*.

Motor servo 400W dan *servo drive/servopack* yang digunakan pada CNC Milling Vertikal VMC 250 adalah buatan Yaskawa SGMAH-04A/SGDM ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram sistem kontrol dari *servo drive* [1]

Proses *tuning* dimulai dengan proses *autotuning*, dimana *controller* akan melakukan set secara otomatis nilai Momen Inertia dan parameter lainnya seperti *Speed Loop Gain* ( $K_v$ ), *Speed Loop Integral Time Constant* ( $T_i$ ), *Position Loop Gain* ( $K_p$ ) dan *Torque Reference Filter Time Constant* ( $T_f$ ). Dalam kasus ini proses *autotuning* tidak dapat mengurangi kesalahan *servo mismatch*, sehingga proses *tuning* perlu dilakukan secara manual.

*Servo mismatch* erat hubungannya dengan kecepatan, oleh karena itu proses *tuning* dilakukan pada *velocity gain*. Pertama, proses *tuning velocity gain* dilakukan pada mode *feedback*. Akan tetapi nilai kesalahan *servo mismatch* relatif masih cukup besar. Kemudian proses *tuning* dilanjutkan dengan mengatur *speed feedforward gain*. Pada pengaturan ini nilai *servo mismatch* berkurang secara signifikan, dari -20,88 ms dan kesalahan *circularity* 1133  $\mu\text{m}$  menjadi -0,03 ms dan 144,7  $\mu\text{m}$  kesalahan *circularity*. Akan tetapi kesalahan ini masih relatif tinggi karena mesin memiliki kesalahan ketegak lurusan yang relatif masih tinggi.

### Kesimpulan

Sebuah penelitian antara universitas, pemerintah dan industri telah berhasil membangun prototipe mesin perkakas nasional, berupa mesin freis vertikal CNC. Penelitian ini dilaksanakan untuk mengantisipasi meningkatnya mesin perkakas impor di sektor industri manufaktur Indonesia.

Dalam Proses perancangannya prototipe tersebut dimodelkan dengan perangkat lunak *Finite Element* untuk menghitung frekuensi alaminya. Hasil perhitungan kemudian divalidasi melalui percobaan. Penelitian menunjukkan bahwa satu frekuensi alami dekat dengan kecepatan maksimum rotasi spindel, karena itu harus digeser frekuensi pribadi tersebut agar jauh dari hasil kecepatan maksimum rotasi spindel.

Ketelitian mesin ini kemudian diukur dengan menggunakan laser interferometer dan *Double Ball Bar* (DBB). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kesalahan geometrik mesin masih lebih tinggi dari nilai yang diijinkan. Dalam rangka untuk meminimalkan kesalahan maka proses perbaikan dilakukan, yang terdiri atas: *scrapping*, pemasangan ulang dan *tuning servo gain*. Pada langkah perbaikan Paper ini hanya membahas terkait *tuning servo gain*. Sebelum *tuning*, *servo mismatch* pada bidang XY adalah -20,88 ms dan kesalahan bundar adalah 1133  $\mu\text{m}$ . Setelah dilakukan penyetelan kecepatan *feedforward*, *servo mismatch* berkurang menjadi 0,03 ms dan kesalahan bundar berkurang menjadi 144,7  $\mu\text{m}$ .

### Referensi

1. **ISO 10791-4.** *Test conditions for machining centres -- Part 4: Accuracy and repeatability of positioning of linear and rotary axes.* 1998-03-01.
2. **ISO 10791-2.** *Test conditions for machining centres —Part 2:Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis).* 2011-03-01.
3. **Tri Prakosa, Agung Wibowo, Yatna Yuwana, Indra Nurhadi.** *Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri.* Palembang : Jurnal Teknik Mesin Indonesia Vol. 6, no. 2, ISSN 1907-350X , 2010.
4. **Tri Prakosa, Agung Wibowo, Yatna Yuwana, Indra Nurhadi.** *Metode Penyelarasan Servo (servo tuning) untuk Meningkatkan Ketelitian Mesin Perkakas CNC, Studi Kasus: Mesin CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri.* Malang : Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik mesin X, 2011. Vol. X.