

Perancangan Awal dalam Pengembangan Spindel Kecepatan Tinggi

Tri Prakosa*, Agung Wibowo dan Arie Nugraha
 Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara
 Institut Teknologi Bandung
 Jl Ganesha 10, Bandung, 40132
Email korespondensi: triprakosa@yahoo.com

Abstrak

Untuk menghasilkan produk dengan ketelitian tinggi tentu saja memerlukan mesin perkakas (*machine tools*) dengan ketelitian yang tinggi pula. Salah satu komponen yang cukup penting dalam proses pemesanan adalah spindel. Spindel memegang peranan penting dalam meningkatkan produktivitas proses pemesinan melalui gerakan rotasi yang dilakukan.

Makalah ini merupakan penjabaran awal dari perancangan spindel kecepatan tinggi yang bertujuan untuk dapat meningkatkan kecepatan spindel yang dapat dibuat oleh industri dalam negeri sehingga dapat bersaing dengan spindel buatan luar negeri yang memiliki kecepatan tinggi. Pada artikel ini dibahas mengenai metode perancangan spindel, penentuan spesifikasi dari bearing spindel dan serta sistem pendinginan spindel. Proses desain ini merupakan bagian dalam proses pengembangan Spindel Mesin Freis CNC dalam negeri yang sedang dilakukan.

Keywords: Spindel, Mesin Freis, Kecepatan Tinggi, Desain, CNC

Pendahuluan

Ketelitian suatu produk yang dimanufaktur dengan mesin perkakas tergantung pada ketepatan proses pemesinan dan ketelitian mesin perkakas yang digunakan. Ketepatan proses pemesinan dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain: pahat, material benda kerja, pencekaman, parameter pemesinan, urutan pemesinan dan lain-lain. Ketelitian mesin perkakas dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain: ketelitian geometrik, kontraksi/ekspansi termal, ketelitian akibat beban statik dan dinamik, ketelitian sistem kontrol, ketelitian spindel, dan lain-lain.

Salah satu industri mesin perkakas di Indonesia telah berhasil membuat mesin perkakas milling vertikal. Untuk meningkatkan *performance* (ketelitian dan produktivitas) mesin tersebut, maka dibentuk kerjasama antara produsen mesin perkakas yang bersangkutan, FTMD ITB dan Kementerian Perindustrian Indonesia. Hasil uji ketelitian mesin tersebut dapat dibaca pada referensi [1]. Setelah dilakukan pengukuran ketelitian geometrik, kemudian metode peningkatan ketelitiannya dapat dibaca pada referensi [2].

Setelah peningkatan ketelitian geometrik, langkah selanjutnya adalah peningkatan produktivitas, dalam hal ini peningkatan kecepatan penghasilan geram. Hal ini dapat dilakukan dengan meningkatkan kecepatan makan dan/atau kecepatan putar spindel. Peningkatan kecepatan makan relatif sulit karena harus mampu

mengatasi tambahan gaya inersia struktur, yang relatif berat, akibat tambahan kecepatan makan. Cara yang lebih mudah adalah dengan meningkatkan kecepatan putar spindel, karena tambahan gaya inersia putar yang relatif tidak sebesar inersia struktur.

Spindel yang ada memiliki kecepatan putar 2.300 rpm, sedangkan mesin-mesin yang setara dari luar negeri berkisar antara 6.000 – 10.000 rpm. Dalam penelitian ini spindel yang ada akan dinaikkan kecepatan putarnya menjadi 8.000 rpm.

Untuk merancang spindel *from the scratch* relatif susah mengingat belum adanya pengalaman. Untuk itu dilakukan *reverse engineering* spindel yang sudah ada dengan beberapa perubahan. Parameter utama yang diambil dari mesin yang sudah ada antara lain:

- Dimensi poros spindel
- Jarak antar bantalan

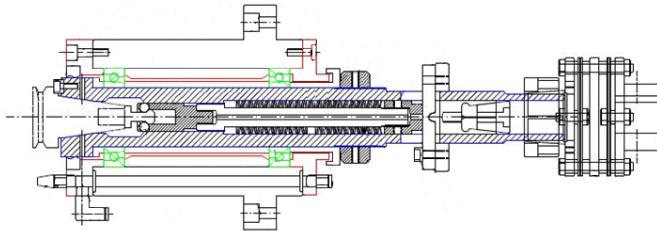
Sedangkan parameter lain yang dirancang berbeda antara lain: sistem pendinginan, *draw bar system*, pemasangan servo motor (*direct coupling* atau *pulley*), pemilihan bantalan dan asesori.

Spesifikasi spindel yang dirancang dituliskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi teknik poros spindel

1	Kecepatan putar	8000 rpm
2	Diameter spindel	45 mm
3	Panjang spindel	383,6 mm
4	Bahan spindel	Baja
5	Jarak antar bantalan	118 mm
6	Tipe konus	BT40
7	Jenis bantalan	<i>angular contact ball bearing,</i>
8	Sudut kontak	25°
9	Kode bantalan	FAG B7009-C-T-P4S
10	Diameter dalam	45 mm
11	Diameter luar	75 mm
12	Tebal bantalan	16 mm

Gambar teknik spindel (tanpa dimensi) yang dirancang diperlihatkan pada Gambar 1.

**Gambar 1.** Gambar teknik spindel (tanpa dimensi)

Metoda perancangan yang digunakan

Setelah diperoleh dimensi spindel dan jarak antar bantalan, dilakukan langkah-langkah verifikasi atas beberapa parameter berikut:

1. Kekakuan spindel, terutama pada arah lateral (pada bidang yang tegak lurus sumbu spindel)
2. Sistem pelumasan yang ada, apakah dengan gemuk (*grease*) sudah cukup atau tidak. Untuk menentukannya perlu dihitung faktor kecepatan atau nd_m yaitu perkalian antara kecepatan putar spindel dengan diameter rata-rata bantalan.
3. K
4. Konfigurasi bantalan, yang akan menentukan kaku tidaknya spindel. Pemilihan didasarkan pada *good practice* yang diambil dari referensi.
5. Jarak antar bantalan, yang akan menentukan rasio ℓ/d optimal berdasarkan *good practice* yang diambil dari referensi.
6. Frekuensi resonansi pertama spindel yang harus lebih besar dari frekuensi putar spindel.

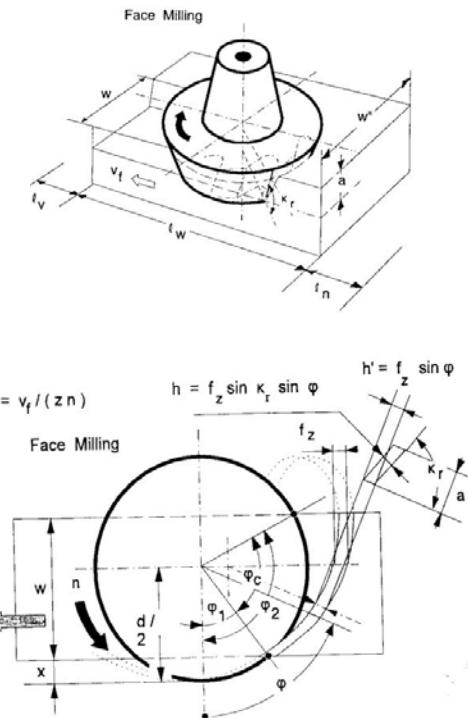
Kekakuan spindel arah lateral

Kekakuan spindel arah lateral dihitung dengan membagi besarnya gaya lateral (gaya potong) dengan

deformasi yang dihasilkannya. Gaya potong dihitung secara teoritik sedangkan deformasi dihitung dengan menggunakan program FEA (*finite element analysis*).

Penentuan gaya pemotongan

Gaya potong pada proses milling dihitung berdasarkan skema berikut [3].

**Gambar 2.** Gaya-gaya pemotongan pada proses milling [3].

Perhitungan gaya pemotongan tidak dibahas pada makalah ini, dan dapat dilihat pada referensi [3]. Hasil perhitungannya diperlihatkan pada Tabel 2.

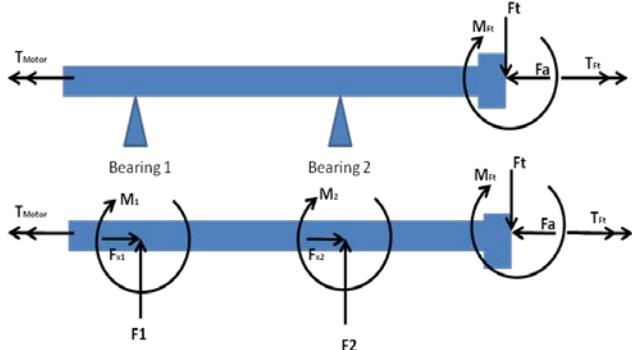
Tabel 2. Hasil perhitungan gaya-gaya

Benda Kerja		F _t _{maks}	Momen lentur	Gaya aksial
		[N]	[Nm]	[N]
Baja struktur	St 50	2551	0.13	31666
	St 60	1646	0.09	20435
Besi Tuang	GG 26	1571	0.08	19506
	GG 30	1490	0.08	18497
Alumnum		769	0.04	9548

Diagram benda bebas spindel

Gaya-gaya yang bekerja selama proses pemesinan, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2, akan menyebabkan deformasi pada ujung pahat. Deformasi ini sangat menentukan ketelitian benda kerja yang akan dihasilkan. Dengan demikian kekakuan lateral

(pada bidang tegak lurus sumbu spindel) harus dihitung. Untuk menghitung kekakuan ini maka pertama-tama digambarkan DBB (diagram benda bebas) spindel, kemudian hasil DBB tadi dimodelkan dengan menggunakan program ANSYS®. Diagram benda bebas spindel diperlihatkan pada Gambar 3.



Keterangan:

T_{Motor} = torsi motor

F_t = gaya tangensial/potong

F_{x1}, F_{x2} = gaya aksial bearing

F_a = gaya aksial

F_1, F_2 = gaya tangensial bearing

M_{Ft} = momen puntir akibat F_t

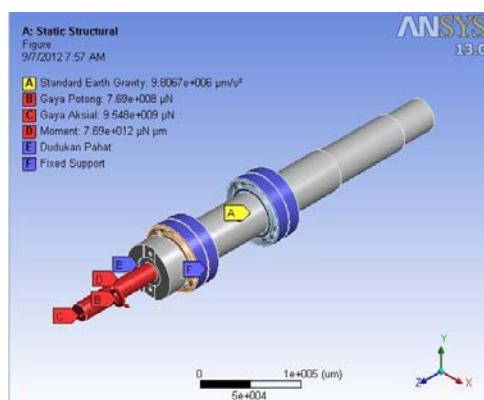
M_1, M_2 = momen bearing

M_{Ft} = momen bending akibat F_t

Gambar 3. Gambar diagram benda bebas spindel

Spindel disimulasikan memotong benda kerja aluminium dengan pemodelan seperti pada Gambar 4. Dalam simulasi ini pahat dilibatkan dan dimodelkan sebagai batang pejal, dengan:

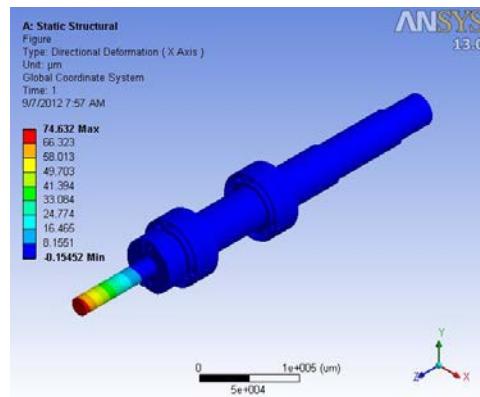
- Diameter : 20 mm
- Panjang : 200 mm



Gambar 4. Pemodelan pemotongan aluminium

Hasil perhitungan deformasi pada arah lateral diperlihatkan pada Gambar 5.

Deformasi lateral maksimum pemotongan aluminium adalah 74,6 μm.



Gambar 5. Deformasi lateral ujung pahat

Gaya tangensial yang menyebabkan deformasi lateral ini adalah 769 N, sehingga kekakuan lateral ujung pahat adalah:

$$K_{ujung\ pahat} = 769/74,6 = 10,3 \text{ [N/}\mu\text{m}] \quad (1)$$

Faktor kecepatan

Poros spindel dipasang pada *spindle housing* dengan menggunakan tiga buah *angular contact ball bearing* yang diberi *preload*. Masalah utama yang perlu diperhatikan dalam hal ini adalah pemilihan diameter luar poros spindel dan/atau diameter dalam bantalan. Semakin besar diameter luar poros spindel, maka kecepatan tangensial dan putaran (*spins*) menjadi semakin besar sehingga *skid* (kombinasi gerakan putar dan *sliding*) bola bantalan menjadi semakin besar. Selain itu gaya sentrifugal, yang membebani bola serta alur luar bantalan (*bearing outer race*) menjadi semakin besar^[4].

Dalam perancangan spindel, pemilihan diameter poros dan kecepatan putar spindel agar berkerja dengan baik serta berumur panjang, maka faktor kecepatan, $n.d_M$ value harus diperhatikan. $n.d_M$ value merupakan perkalian antara diameter rata-rata (*mean diameter*) bantalan D (mm) dan kecepatan putar spindel N (rpm).

Bantalan yang digunakan memiliki diameter dalam 45 mm dan diameter luar 75 mm, sehingga diameter rata-ratanya (*mean diameter*) adalah 60 mm. Kecepatan putar maksimum spindel adalah 10 000 rpm, sehingga faktor kecepatannya adalah:

$$n.d_M \text{ value} = 10\,000 \times 60 = 600\,000 \quad (2)$$

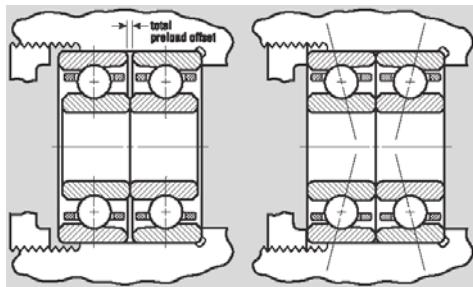
Pelumasan dengan menggunakan gemuk (*grease*) dapat digunakan sampai dengan dN value 2 000 000 $\text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{[5]}$. Dengan demikian pelumasan dengan menggunakan gemuk sudah cukup.

Konfigurasi/tata letak bantalan^[6]

Terdapat tiga jenis konfigurasi bantalan pada spindel, yaitu:

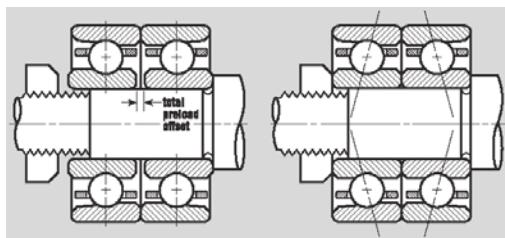
- Konfigurasi *face-to-face* atau “X”
- Konfigurasi *back-to-back* atau “O”
- Konfigurasi *tandem*

Konfigurasi *face-to-face* atau DF, diperlihatkan pada Gambar 6. Pada saat belum ada *preload*, *outer race* dibuat bebas dan setelah *pre-load* diberikan pada *outer race* maka garis kontaknya membentuk huruf “X”. Konfigurasi ini dapat menahan beban baik dalam arah aksial maupun radial. Meskipun demikian, konfigurasi ini jarang digunakan untuk spindel karena dua titik potong garis kontak terletak berdekatan, sehingga rigiditasnya kurang. Konfigurasi ini banyak digunakan untuk aplikasi yang banyak memerlukan *self-alignment*.



Gambar 6. Konfigurasi bantalan “*face-to-face*”

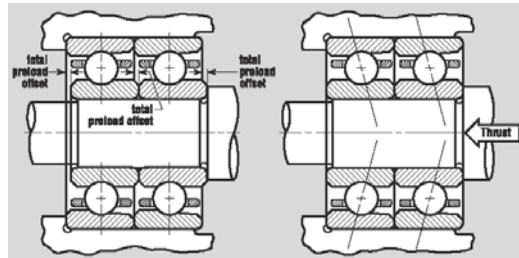
Konfigurasi *back-to-back* atau DB, diperlihatkan pada Gambar 7. Pada saat belum ada *preload*, *inner race* dibuat bebas dan setelah *pre-load* diberikan pada *inner race* maka garis kontaknya membentuk huruf “O”. Konfigurasi ini paling banyak digunakan pada spindel karena menghasilkan ketelitian dan rigiditas yang baik.



Gambar 7. Konfigurasi bantalan “*back-to-back*”

Apabila pada satu lokasi pada poros spindel, terdapat lebih dari satu bantalan, misalkan dua pasang di lokasi dekat *spindle nose* dan dua pasang di bagian belakang (*rear*), maka masing-masing pasangan dapat diatur sesuai dengan konfigurasi *tandem* atau DT, seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Pada saat belum ada beban, *inner race* dan *outer race* sudah disatukan (tanpa *space*), sehingga setelah ada beban maka garis

kontak kedua bantalan saling sejajar dan hal ini akan menambah rigiditas. Dua pasang tandem kemudian dapat dibentuk sesuai dengan konfigurasi *back-to-back*.



Gambar 8. Konfigurasi bantalan “*tandem*”

Jarak antar bantalan

Untuk mendapatkan kemungkinan rigiditas spindel terbaik, maka hal yang harus dilakukan adalah^[6]:

- meminimalkan jarak antara posisi bantalan depan (*front support position*) dengan ujung spindel (*spindle nose*).
- Jarak antara bantalan depan (*front support*) dengan bantalan belakang (*rear support*) harus cukup dekat. Sebagai *guideline*, rasio $\ell/d = 2,5-3$ dapat dijadikan sebagai harga optimal, dalam hal ini ℓ = jarak antar bantalan (bantalan paling belakang dengan paling depan), dan d = diameter lubang bantalan pertama.

Spindel yang dirancang menggunakan diameter dalam bantalan $d = 45$ mm dan jarak antar bantalan $\ell = 118$ mm, sehingga:

$$\ell/d = 118/45 = 2,6 \quad (3)$$

Rasio ini masih dalam rentang 2,5 – 3, sehingga tidak perlu diubah.

Frekuensi resonansi dan modus getar

Spindel yang dirancang harus dapat diputar sampai dengan 8000 rpm, sehingga frekuensi resonansi pertama poros spindel harus di atas 8000 rpm atau (133,3 Hz). Untuk menghitung frekuensi resonansi teoritik maka dilakukan pemodelan dengan menggunakan software Ansys®. Makalah ini tidak membahas detail pemodelan yang dilakukan. Hasil pemodelan di tuliskan dalam Tabel 3.

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa frekuensi resonansi pertama (148 Hz atau 8880 rpm) di atas kecepatan putar spindel yang dirancang (133,3 Hz atau 8000 rpm).

Tabel 3. Frekuensi resonansi

Modus	Frekuensi [Hz]	Rpm	Modus getar
1	148	8880	bending
2	148,13	8887,8	bending
3	1465,7	87942	bending
4	1637,8	98268	bending
5	1640	98400	bending
6	2843,8	170628	bending

Dengan demikian hasil rancangan dapat diteruskan ke proses manufakturing.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan di atas, maka proses perancangan spindel kecepatan tinggi dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Perancangan spindel secara *reverse engineering* dapat dimulai dengan menggunakan dimensi poros spindel serta jarak bantalan spindel komersial yang sudah ada.
- Kekakuan spindel pada ujung pahat yang dirancang adalah 10,3 [N/ μm].
- $n.d_M$ value spindel yang dirancang adalah 600 000 $\text{min}^{-1}.\text{mm}$, dan sistem pelumasannya cukup dengan gemuk (*grease*).
- Spindel dirancang menggunakan konfigurasi bantalan *back-to-back* dengan cara mengendorkan *inner race*, dan begitu diberi preload maka garis kontaknya membentuk huruf X.
- Rasio ℓ/d spindel yang dirancang adalah 118/45 atau 2,6 sehingga masuk dalam daftar kategori tenda.
- Frekuensi resonansi pertama spindel adalah 148 Hz atau 8880 rpm di atas kecepatan putar spindel yang dirancang (133,3 Hz atau 8000 rpm).
- Hasil rancangan spindel dapat dilanjutkan ke proses manufakturing.

Referensi

1. Prakosa, T., et. al., *Pengujian Ketelitian Geometrik Mesin Perkakas CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri*, Jurnal Teknik Mesin Indonesia, Vol. 6, no. 2, ISSN 1907-350X (2011)
2. Prakosa, T., et. al., *Metode Penyelarasan Servo (servo tuning) untuk Meningkatkan Ketelitian Mesin Perkakas CNC, Studi Kasus: Mesin CNC Milling Vertikal Buatan Dalam Negeri*, Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik mesin X (2011)
3. Rochim, T., *Klasifikasi Proses, Gaya, & Daya Pemesinan, Machining & machine tools laboratory, Mechanical and production*

engineering (MPE), FTI-ITB, 2007.

4. López de Lacalle, L.N., and Lamikiz, A., *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer-Verlag, London (2009)
5., *FAG - Super Precision Bearings*, Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, (2010)
6., *The book of spindles – Dynomax spindle facts*, www.dynospindles.com