

# Optimasi Karakteristik Statik Spindel Mesin Perkakas Buatan Dalam Negeri

Danny Kusuma\*, Agung Wibowo dan Tri Prakosa

Jl. Ganesha 10, Bandung, Indonesia

dannyk\_xe9@yahoo.com; a\_wibowo\_m@yahoo.com; prakosa@dynamic.pauir.itb.ac.id

## Abstrak

Pada tahun 2015, Indonesia tergabung dalam Masyarakat Ekonomi ASEAN (MEA). Pengembangan mesin perkakas dalam negeri merupakan salah satu strategi dalam penguatan industri manufaktur. Paper ini membahas optimasi desain VMC 500, yakni mesin freis CNC buatan PT Sarimas Ahmadi Pratama. Optimasi desain fokus pada karakteristik statik spindel.

Metode elemen hingga dengan perangkat lunak ANSYS digunakan sebagai sarana analisis statik. Pemodelan spindel menggunakan elemen 3D dengan *bearing* dimodelkan sebagai pegas dan rumah spindel *fixed*. Model tersebut dapat memprediksi deformasi pada ujung spindel akibat beban pemotongan yang terjadi.

Target optimasi desain spindel adalah meminimalkan deformasi pada ujung spindel. Analisis setiap variabel penyusun sistem *spindle-bearing* dilakukan untuk mendapatkan sensitivitasnya terhadap kekakuan spindel. Variabel-variabel tersebut antara lain material dan geometri poros, *preload*, sudut kontak, susunan dan jarak antar *bearing*. Data sensitivitas variabel menjadi pedoman dalam optimasi desain spindel. Variabel paling sensitif menjadi prioritas utama dalam design ulang spindel. Hasil akhir desain menghasilkan kekakuan statik spindel paling optimal.

Kata Kunci: spindel, mesin perkakas, kekakuan statik, model elemen hingga.

## 1. Pendahuluan

Kualitas mesin perkakas diukur dari produktivitas dan akurasi. Produktivitas menentukan kecepatan mesin menghasilkan produk, sedangkan akurasi menentukan kualitas geometrik produk yang dihasilkan.

Spindel merupakan ‘jantung’ mesin perkakas. Dalam proses pemotongan, spindel terdefromasi akibat gaya potong yang dirasakan spindel. Kekakuan menunjukkan kemampuan spindel menahan beban tersebut. Dengan demikian, diperlukan desain spindel yang memiliki kekakuan tinggi untuk mencapai ketelitian geometrik yang diharapkan.

Kekakuan didefinisikan sebagai perbandingan gaya terhadap deformasi [1]:

$$k = \frac{F}{\delta} \text{ (N } \mu\text{m}^{-1}\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai spindel menggunakan rumus-umus matematik untuk mendapatkan deformasi yang terjadi pada ujung spindel. Model yang digunakan yakni batang kantilever yang ditumpu dua pegas. Serenac [2] menggunakan model ini dan dari analisis persamaan deformasinya didapatkan fungsi kekakuan terhadap berbagai parameter terkait *bearing*. Dengan model yang sama, Shuzi [3] menunjukkan pengaruh *multibearing* dan El-Sayed [4] menunjukkan pengaruh step spindel terhadap kekakuan

optimal. Selanjutnya, Prakosa dkk. [5] menggunakan metode ini untuk mendapatkan kekakuan spindel buatan dalam negeri dan membandingkannya dengan hasil eksperimen.

Penelitian terkini menggunakan perangkat lunak elemen hingga untuk memodelkan spindel dan mendapatkan deformasi akibat gaya pembebanan. Telang [6] menggunakan metode ini dan membandingkan dengan hasil eksak oleh rumus matematik. Model elemen hingga yang digunakan adalah elemen 1 dimensi dan kekakuan *bearing* yang digunakan konstan.

Pada paper ini, perangkat lunak elemen hingga digunakan untuk mendapatkan kekakuan spindel. Model menggunakan elemen 3 dimensi sehingga memungkinkan geometri asli spindel direpresentasikan. Model juga mengakomodir nonlinearitas kekakuan *bearing* dan penggunaan *multibearing* pada spindel. Hasil analisis divalidasi dengan uji konvergensi dengan dibandingkan dengan hasil analisis matematik.

## 2. Model Sistem Spindle-Bearing

Poros spindel VMC 500 berdiameter 45 mm ditumpu 4 buah angular contact *bearing* dengan sudut kontak 150. *Bearing* terpasang dengan susunan ‘O’ tandem dan *preload light*. Jarak antar *bearing* depan dan belakang 94 mm.

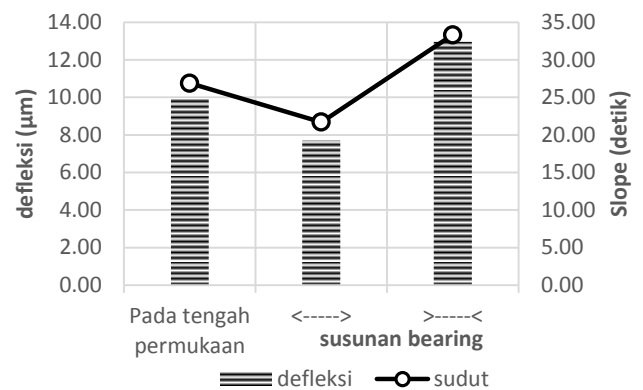
Mirip dengan model Serenac [2], *bearing* dimodelkan dengan pegas dengan nilai kekakuan nonlinear. Poros spindel dimodelkan dengan elemen 3D yaitu

hexahedron dan tetrahedron. Elemen diatur sedemikian sehingga memiliki *skewness* rata-rata maksimal 0,5. *Skewness* diusahakan seminimal mungkin untuk menjamin kualitas elemen tetap tinggi dan hasil konvergen ke nilai eksak.

Model Serenac [2] dimodifikasi sehingga sesuai dengan kondisi spindel VMC500. Usaha perbaikan model antara lain dengan mengakomodir pergeseran *load centre*, penggunaan tumpuan kopling pada ekor spindel dan penggunaan nilai kekakuan *bearing* nonlinear.

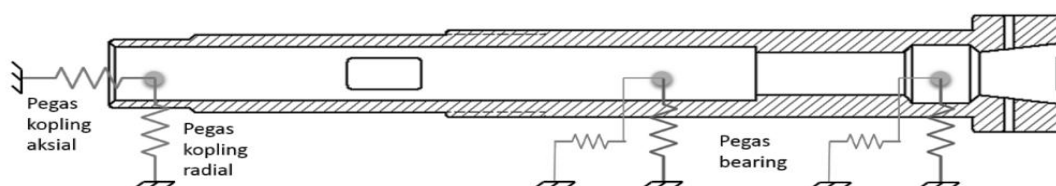
### 2.1 Pengaruh Pergeseran *Load centre*

Penggunaan angular contact *bearing* menyebabkan pergeseran *load centre*. Karena disusun ‘O’, jarak antar pusat tumpuan *bearing* bertambah 16 mm dari posisi *bearing* terpasang. Pergeseran *load centre* ini membuktikan bahwa susunan ‘O’ memberikan kekakuan lebih tinggi dari pada susunan ‘X’ seperti ditampilkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pengaruh posisi *load centre*

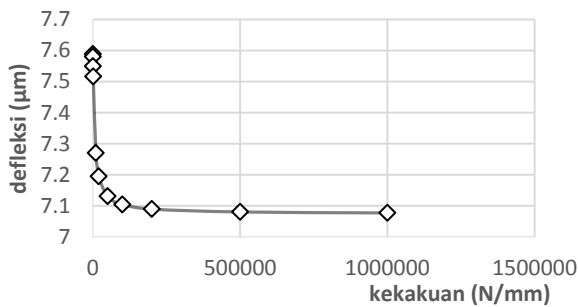
### 2.2 Pengaruh Kekakuan Kopling



Gambar 3. Model Spindel

**terhadap Kekakuan Spindel**

Pemasangan tumpuan kopling sebagai tumpuan menjadi pertimbangan pula. Namun demikian, dari hasil analisis dengan kopling sebagai salah satu tumpuan menunjukkan bahwa kekakuan kopling tidak signifikan mempengaruhi kekakuan spindel seperti disajikan pada gambar 2.



Gambar 2. Pengaruh kekakuan kopling

**2.3 Pengaruh Nonlinearitas Kekakuan Bearing**

Kekakuan bearing tidak proporsional terhadap beban dan juga tidak konstan seperti yang tercantum pada katalog. Kekakuan bearing bergantung pada gaya dan jenis bearing. Deformasi radial bearing dapat dihitung dengan formula Palmgren seperti yang digunakan oleh Mourad [7].

$$\delta r = \frac{2}{\cos \alpha} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{db}} \dots \dots \dots (2)$$

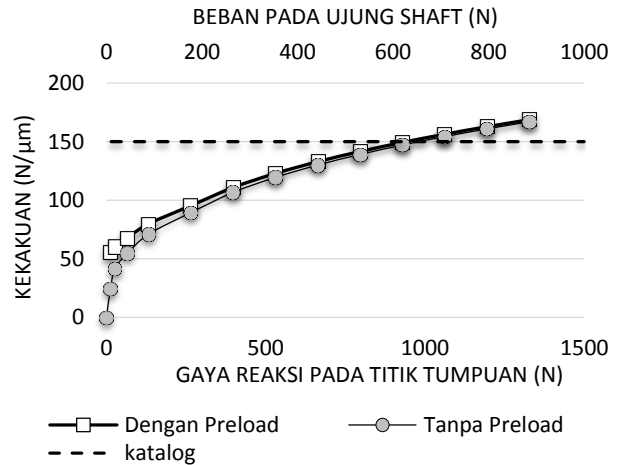
Dimana,

$$Q = \frac{5 Fr}{i z \cos \alpha} \dots \dots \dots (3)$$

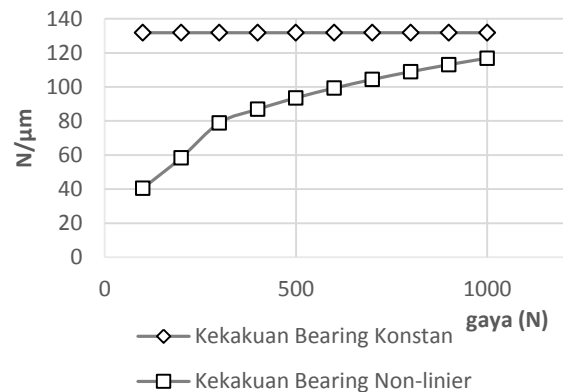
- δr – defleksi radial, μm
- db – diameter bola, μm
- z – jumlah bola
- α<sup>0</sup> – sudut kontak
- Fr – gaya aksial

Berdasarkan persamaan (2), dihasilkan kurva kekakuan bearing seperti ditunjukkan

pada gambar 4. Dengan menggunakan data ini, didapatkan kekakuan spindel sebagai fungsi dari gaya pembebanan. Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin tinggi gaya yang diterima spindel, kekakuannya semakin tinggi.



Gambar 4. Nonlinearitas kekakuan bearing



Gambar 5. Pengaruh nonlinearitas kekakuan bearing terhadap kekakuan spindel

**2.4 Uji Konvergensi**

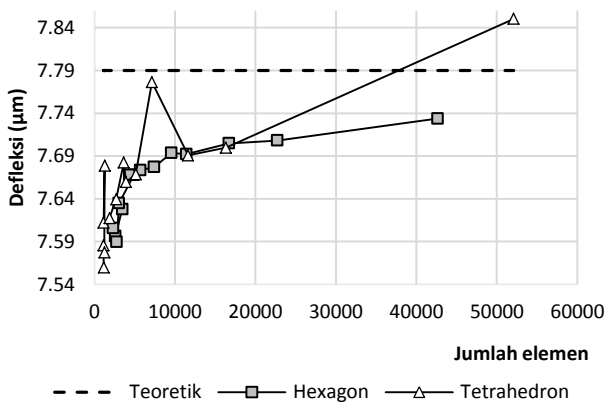
Validasi hasil analisis dilakukan dengan uji konvergensi dengan membandingkan hasil ANSYS dengan hasil teoretik. Jenis dan jumlah elemen divariasikan sedemikian rupa sehingga didapatkan hasil analisis yang semakin konvergen dan semakin dekat dengan hasil teoretik.

Nilai defleksi teoretik didapatkan dari persamaan berikut :

$$\delta = F \times \left\{ \frac{A^2 L}{3E I_L} + \frac{A^3}{3E I_A} + \frac{1}{C_f} \left( 1 + \frac{A}{L} \right)^2 + \frac{1}{C_r} \left( \frac{A}{L} \right)^2 \right\} (\mu\text{m}) \dots\dots\dots (4)$$

- F : Gaya Radial (N)
- A : jarak *bearing* depan dengan spindle nose (mm)
- L : jarak *bearing* depan dengan *bearing* belakang (mm)
- I<sub>L</sub> : Momen inersia badan spindle (mm<sup>4</sup>)
- I<sub>A</sub> : Momen inersia kepala spindle (mm<sup>4</sup>)
- C<sub>f</sub> : Kekakuan *bearing* depan (N/μm)
- C<sub>r</sub> : Kekakuan *bearing* belakang (N/μm)

Persamaan (4) didasarkan pada model spindle batang kantilever dan pegas yang digunakan juga oleh Serenac [2], Telang [6] dan Prakosa dkk. [5]. Selanjutnya, nilai defleksi dari hasil perhitungan persamaan di atas digunakan sebagai nilai pembanding dalam uji konvergensi.



Gambar 6. Uji Konvergensi

Gambar 6 menunjukkan bahwa elemen hexagon lebih cepat konvergen dibandingkan elemen tetrahedron. Pada jumlah elemen lebih dari 10.000, *error* hasil analisis tidak lebih dari 0,1 μm (1,5%).

### 3. Optimasi Karakteristik Statik

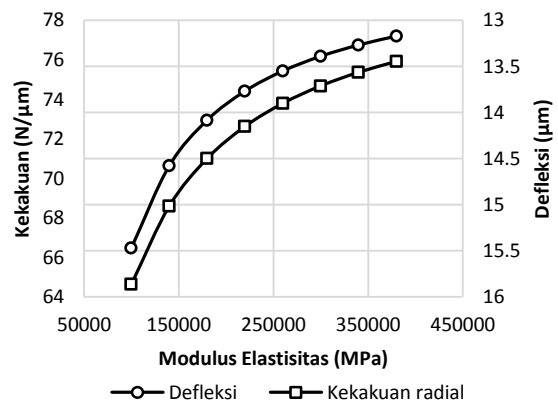
Setiap variabel penyusun sistem spindle-*bearing* memiliki pengaruh berbeda terhadap kekakuan spindle. Analisis terhadap variabel dilakukan untuk mendapatkan sensitivitas

variabel. Variabel paling sensitif menjadi fokus utama dalam desain spindle.

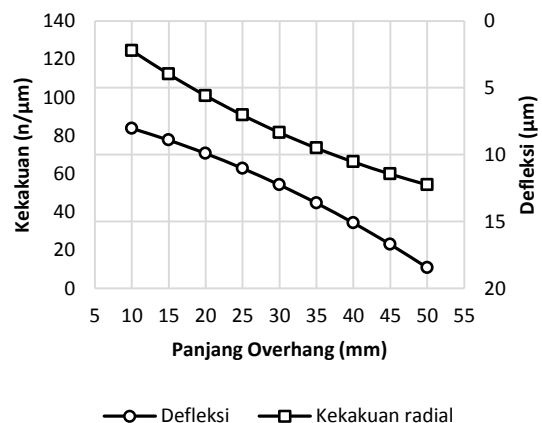
### 3.1 Pengaruh Material dan Dimensi Poros

Poros merupakan bagian yang seringkali terbatas konstruksional. Perubahan terhadap geometri dan material poros perlu dipertimbangkan matang karena terkait dengan berbagai komponen lain dan tidak dapat diubah secara bebas.

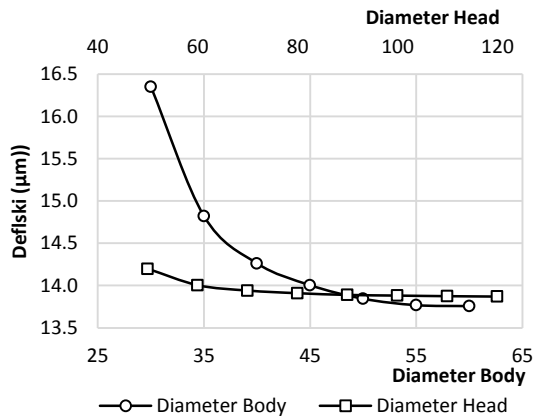
Parameter penyusun poros antara lain modulus elastisitas, panjang overhang dan diameter. Secara umum, peningkatan modulus elastisitas, perbesaran diameter dan overhang yang sependek mungkin akan menghasilkan kekakuan spindle yang lebih tinggi seperti ditunjukkan pada gambar 7, 8 dan 9.



Gambar 7. Pengaruh perubahan modulus elastisitas terhadap deformasi pada ujung spindle



Gambar 8. Pengaruh perubahan overhang terhadap deformasi pada ujung spindle



Gambar 9. Pengaruh perubahan diameter poros terhadap deformasi pada ujung spindle

### 3.2 Pengaruh Preload Bearing

Preload menentukan kekakuan bearing. Berdasarkan persamaan (2), semakin besar gaya maka bearing semakin kaku. Katalog bearing memberikan nilai kekakuan berdasarkan besar preload yang terbagi menjadi 3 kelas, light, medium, heavy. Katalog satu dengan lainnya memberikan nilai yang berbeda. Nilai pada katalog juga berbeda jika dibandingkan dengan nilai kekakuan yang dihitung dengan persamaan (2).

Berdasarkan data katalog dan hasil perhitungan persamaan (2), didapatkan kekakuan spindle pada berbagai kelas

preload. Seperti ditunjukkan pada gambar 10, preload heavy menghasilkan kekakuan spindle paling tinggi. Namun perlu dicermati pula bahwa semakin besar preload, semakin besar pula gaya interal pada bearing sehingga memperpendek umur bearing.

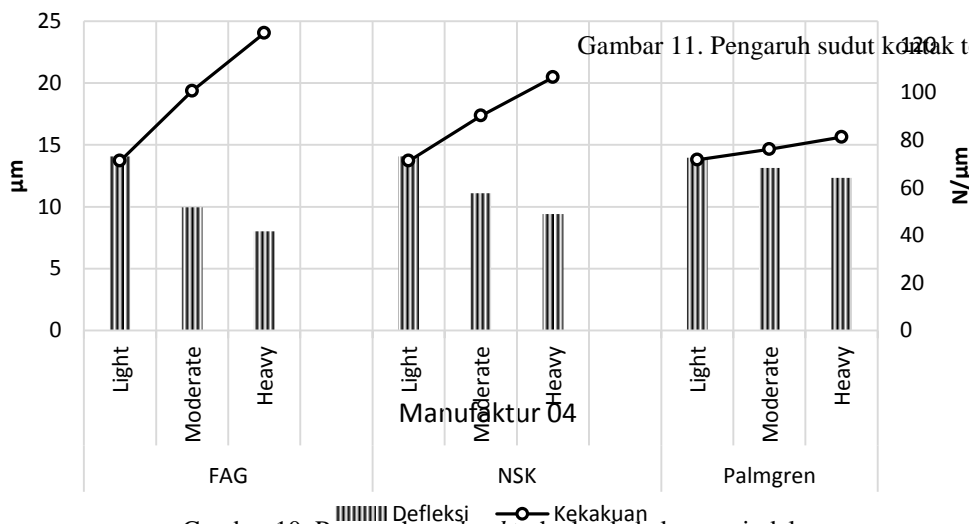
### 3.3 Pengaruh Sudut Kontak Bearing

Sudut kontak merupakan salah satu ciri khas angular contact bearing. Sudut kontak tersedia antara 15° hingga 25°. Sudut kontak menentukan rasio kekakuan radial terhadap aksial. Bearing dengan sudut kontak besar memiliki kekakuan aksial lebih besar.

Demikian pula pengaruhnya terhadap kekakuan spindle. Bearing dengan sudut kontak tinggi memberikan kekakuan aksial spindle lebih besar sehingga cocok digunakan untuk spindle mesin gundi. Perbandingan kekakuan spindle dengan berbagai macam sudut kontak disajikan pada gambar 11.

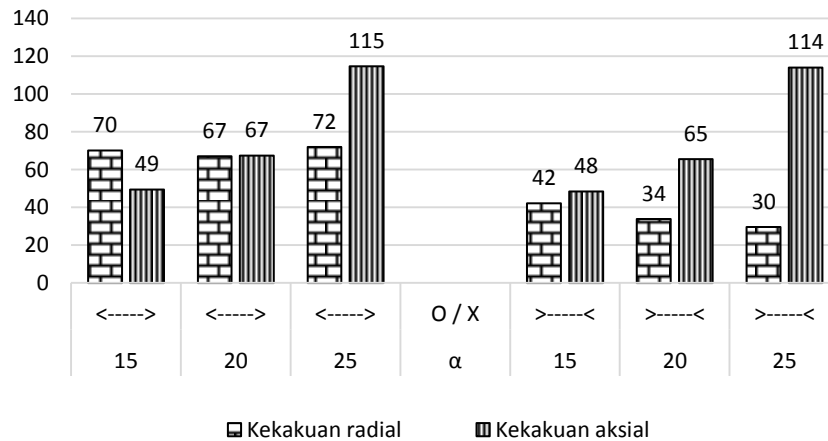
### 3.4 Pengaruh Susunan Bearing

Angular contact bearing dapat disusun menjadi berbagai macam kombinasi. Tentu penambahan jumlah bearing dapat meningkatkan kekakuan spindle. Namun perlu diperhatikan pula bahwa semakin banyak bearing maka semakin tinggi pula pembangkitan panas akibat gesekan ketika spindle berputar. Temperatur tinggi menyebabkan kesalahan akibat pemuaian. Secara umum, bearing dengan susunan ‘O’



Gambar 10. Pengaruh preload terhadap kekakuan spindle

Gambar 11. Pengaruh sudut kontak terhadap kekakuan spindle



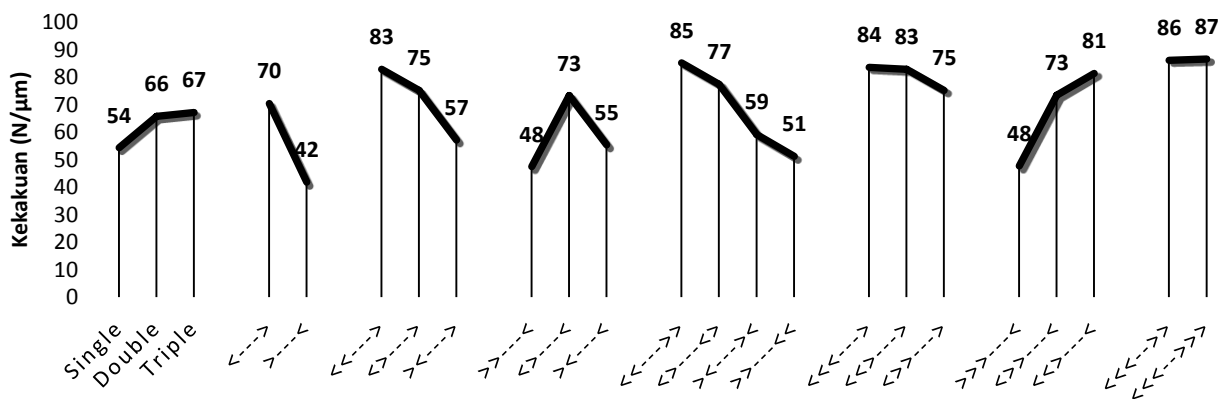
memberikan kekakuan lebih tinggi dan jumlah bearing depan lebih signifikan dalam meningkatkan kekakuan spindle.

Gambar 12 menunjukkan hasil kekakuan spindle pada berbagai susunan bearing. Kolom pertama memberikan gambar umum peningkatan kekakuan dengan menggunakan satu, dua dan tiga bearing di setiap posisinya. Terlihat bahwa penggunaan lebih dari dua bearing baik pada posisi depan maupun belakang tidak memberikan peningkatan kekakuan spindle yang signifikan.

### 3.5 Jarak Optimum Antar Bearing

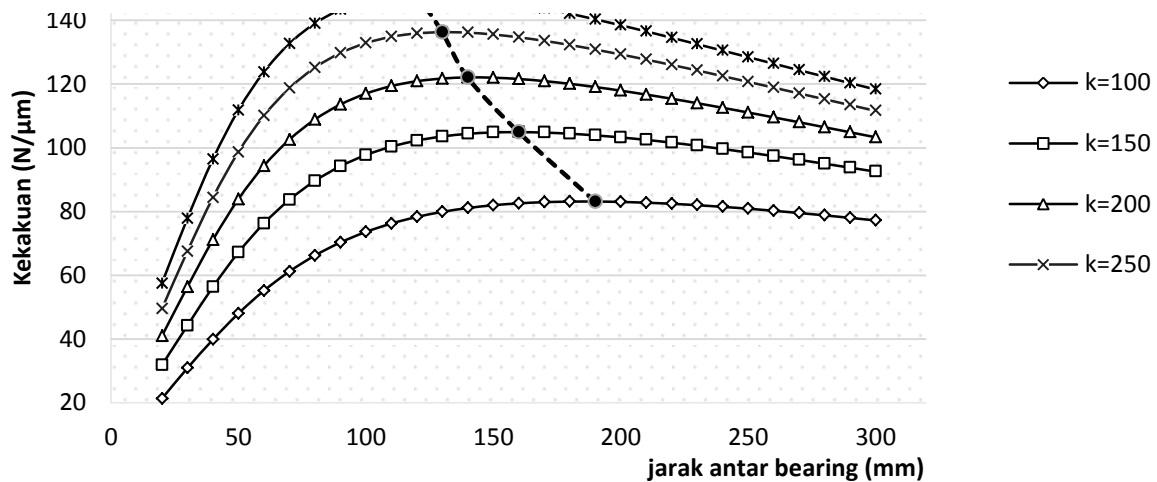
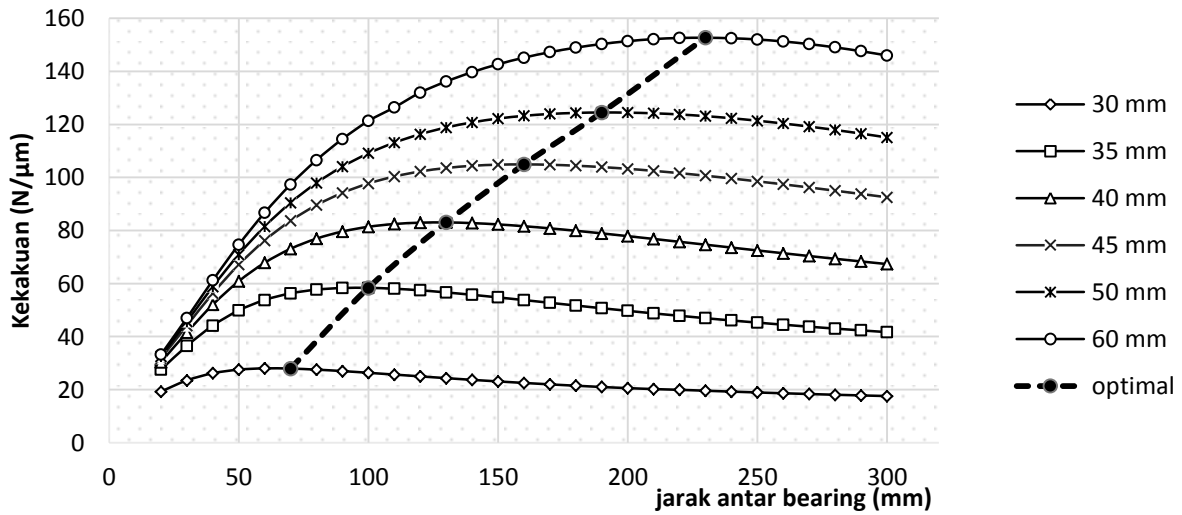
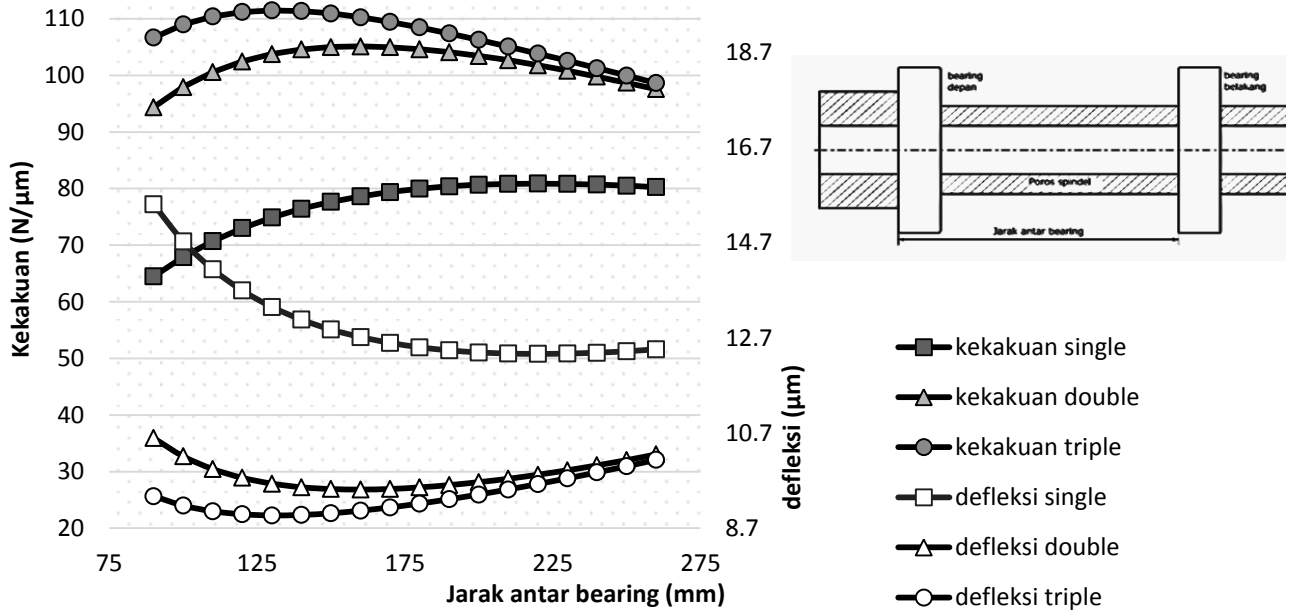
Jarak antar bearing merupakan variabel yang tidak dapat diprediksi dengan mudah. Menambah jarak ini belum tentu meningkatkan kekakuan spindle. Jarak ini perlu dioptimalkan untuk mendapatkan kekakuan maksimal.

Jarak optimum dipengaruhi oleh variabel-variabel lainnya. Dari sisi poros, semakin besar diameter poros spindle, bearing depan dan belakang harus diletakkan semakin menjauhi. Sedangkan dari sisi bearing, semakin kaku dan semakin banyak jumlah bearing yang



Gambar 12. Kekakuan spindle pada berbagai susunan bearing

terpasang, maka jarak antar bearing harus diletakkan semakin dekat. Dengan demikian desain spindel menjadi unik bergantung pada parameter-parameter yang dipilih.



Tabel 1. Sensitivitas Variabel

No	Variabel	Sensitivitas terhadap kekakuan	Keterangan
1	Modulus Elastisitas	0.4	N/ $\mu$ m tiap peningkatan 10 GPa
2	<i>Overhang</i>	-35	N/ $\mu$ m tiap peningkatan 1 mm
3	Diameter	1.3	N/ $\mu$ m tiap peningkatan 5 mm
4	<i>Preload</i>	30	N/ $\mu$ m, <i>light</i> ke <i>Moderate</i>
5	Sudut Kontak	-3	N/ $\mu$ m, 15 ke 20
6	Jumlah <i>bearing</i>	12	N/ $\mu$ m, single ke double
7	Jarak antar <i>bearing</i>	5	N/ $\mu$ m, penambahan 50 mm

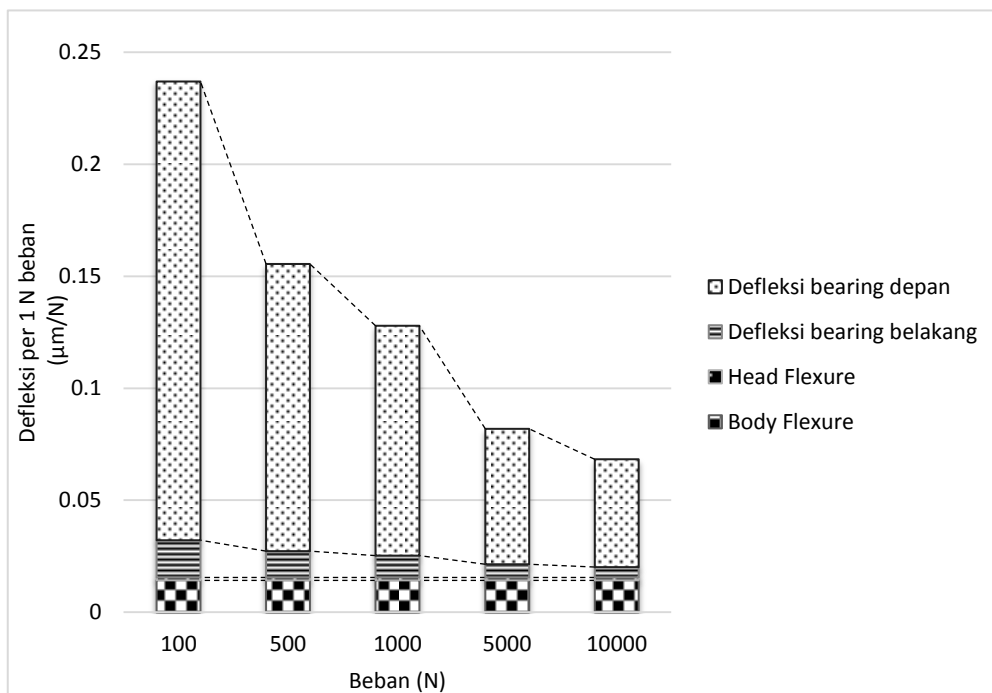
#### 4. Optimasi Desain

Setiap variabel memiliki fungsi tersendiri terhadap kekakuan spindel. Secara ringkas, pengaruh variabel penyusun sistem spindel-*bearing* dirangkum dalam tabel 1.

Deformasi pada ujung spindel disebabkan oleh melendutnya poros dan defleksi *bearing*. Berdasarkan analisis terhadap persamaan (4), didapatkan kontribusi deformasi masing-masing komponen terhadap deformasi total pada ujung spindel seperti pada gambar 16.

Dari tabel sensitivitas dan grafik kontribusi, dapat disimpulkan bahwa *bearing*, terutama *bearing* depan menjadi variabel utama yang menentukan kekakuan spindel. Peningkatan kekakuan *bearing* depan akan sangat mempengaruhi kekakuan spindel.

Berdasarkan data-data tersebut, spindel VMC 500 didesain ulang dengan rangkuman perubahan desain pada tabel 2. Material dan geometri poros dijaga tetap agar tidak mengubah desain komponen lainnya. Peningkatan kekakuan *bearing* tanpa mengubah konstruksi spindel dilakukan dengan cara penambahan *preload*.



Gambar 16. Defleksi masing-masing komponen spindel Manufaktur 04



Tabel 2. Desain Ulang Spindel

No	Variabel	Awal	Optimasi	Keterangan
1	Jumlah <i>bearing</i>	4 buah	4 buah	penggunaan 6 <i>bearing</i> tidak efektif dan beresiko memperburuk karakteristik termal
2	Susunan <i>bearing</i>	O'; tandem setiap pasangan	O'; tandem setiap pasangan	tetap
3	<i>Preload</i>	<i>Light</i>	<i>Moderate</i>	Perlu analisis lebih lanjut terhadap karakteristik termal
4	Sudut kontak	15°	15°	tetap
5	Jarak antar <i>bearing</i>	94 mm	110 mm	
6	<b>Kekakuan spindel</b>	<b>70 N/μm</b>	<b>139 N/μm</b>	<b>peningkatan 98,6 %</b>

Hasil desain ulang spindel menghasilkan kekakuan optimal 139 N/μm. Nilai ini lebih tinggi dari kekakuan radial spindel NSK (137 N/μm) dan GMN (131 N/μm) dengan diameter poros yang sama. Dengan demikian, spindel dapat bersaing dengan produk spindel kelas dunia.

### 5. Kesimpulan

Model spindel pada perangkat lunak elemen hingga dapat merepresentasikan spindel dan mengakomodir pergeseran *load centre* dan nonlinearitas kekakuan *bearing*. Hasil analisis model ini terbukti cukup mendekati hasil eksak dengan validasi melalui uji konvergensi.

Setiap variabel memiliki pengaruh masing-masing terhadap kekakuan spindel. Peningkatan kekakuan spindel dapat dilakukan dengan cara memperpendek overhang, memperbesar diameter, meningkatkan *preload* dan menambah jumlah *bearing* serta meletakkan *bearing* pada posisi yang tepat.

Kekakuan optimal spindel hasil desain ulang adalah 139 N/μm. Desain spindel dapat bersaing dengan spindel-spindel kelas dunia.

### 6. Referensi

- [1] M. Weck, Handbook of Machine Tool, Volume 2: Construction and Mathematical Analysis, Wiley Heyden Ltd., Dusseldorf, 1984.
- [2] M. Šarenac, Stiffness of Machine Tool Spindle as a Main Factor For Treatment Accuracy, Facta Universitatis (1999) 655-674.
- [3] Y. Shuzi, A Study Of The Static Stiffness Of Machine Tool Spindle, Int. J. Mach. Tool (1981) 23-40.
- [4] H. R. El-Sayed, Optimum Nose Stiffness of Stepped Machine Tool Spindle, Wear (1980) 231-237.
- [5] T. Prakosa, A. Wibowo, R. Ilhamsyah, Optimizing Static And Dynamic Stiffness Of Machine Tools Spindle Shaft For Improving Machining Product Quality, Journal of KONES Powertrain and Transport 20 (4) (2013).
- [6] A. Telang, Static Stiffness Analysis of High Frequency Milling Spindle, International Journal of Research in Engineering and Technology 3 (03) (2014) 577-585.
- [7] D. Mourad, The Calculation of Ball Bearing Nonlinear Stiffness Theoretical and Experimental Study with Comparisons. Journal of Engineering and Applied Sciences, 3 (11) (2008) 872-833.
- [8] FAG, Super Precision *Bearings*, Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 2014.

[9] NSK, *Rolling Bearing*, NSK Ltd.,  
2005.