

## Analisis Kinerja Sistem Servo Pada Mesin Perkakas Presisi Tinggi Yang Menggunakan Teknologi High Speed Machining

*Servo System Performance Analysis  
in High Precision Machine Tools Using High Speed Machining Technology*

### Nasril

Balai Mesin Perkakas, Teknik Produksi dan Otomasi - MEPO  
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi - BPPT  
Gedung Teknologi 2, PUSPIPTEK, Cisauk, Tanggerang Selatan, Banten – 15314.  
E-mail: [nasril65@gmail.com](mailto:nasril65@gmail.com)

### Abstrak

Pembangunan industri memerlukan mesin dan peralatan pabrik sebagai barang modalnya. Untuk mengurangi ketergantungan teknologi kepada luar negeri perlu dikembangkannya suatu kemandirian teknologi dalam negeri pada industri mesin perkakas sebagai dasar atau penyokong utama industri mesin dan industri manufaktur.

Perancangan mesin perkakas berbeda dengan mesin pada umumnya karena perancangan mesin perkakas mengutamakan ketelitian dan kekakuan, sedangkan perancangan selain mesin perkakas umumnya lebih mengutamakan aspek kekuatan. Ketelitian hasil pemotongan benda kerja dapat ditelusuri dari ketelitian mesin perkakas yaitu ketelitian bidang-bidang referensi (ketelitian geometrik dan ketelitian kinematik) dan ketelitian sistem pengaturannya. Penerapan Teknologi *high speed machining* sangat berpotensi untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil pemotongan benda kerja. Dengan menerapkan sistem kontrol dengan kinerja yang tinggi dan teknologi *high speed machining* sehingga diperoleh mesin perkakas dengan produktivitas dan presisi tinggi.

Sistem pengaturan posisi dibentuk oleh tiga rangkaian pengaturan tertutup yaitu pengaturan arus, pengaturan kecepatan dan pengaturan posisi. Pada sistem servo, rangkaian pengaturan arus dan pengaturan kecepatan berada pada bagian servo *amplifier* dan pengaturan posisi berada pada bagian *computerized numerical control*. Arus pada belitan rotor yang berada dalam medan magnet permanen ini akan membangkitkan torsi yang akan digunakan untuk memberikan percepatan pada rotor yang memiliki inertia massa termasuk komponen penggerak dan untuk melawan torsi dari luar atau beban. Sistem servo yang merupakan penyedia torsi, gaya dan kecepatan ini digunakan untuk melakukan gerakan sumbu.

Pada tulisan ini dilakukan pemodelan matematik dalam *domain-s* dari sistem servo pada mekanisme gerakan sumbu yang akan digunakan untuk analisis kesalahan posisi. Kesalahan posisi yang disebabkan oleh sistem servo antara lain disebabkan oleh ketidak kekakuan sistem servo pada mekanisme gerakan sumbu. Kesalahan posisi pada kondisi *transient* dari gerakan sumbu merupakan akibat dari keterlambatan pencapaian kecepatan dimana keterlambatan posisi berbanding lurus dengan keterlambatan kecepatan.

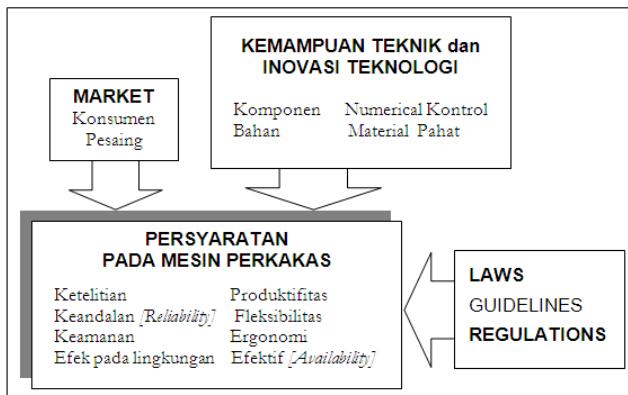
Penerapan pengaturan parameter yang optimal telah dilakukan pada mesin perkakas buatan MEPO-BPPT (*high speed and high precision machine tools for intra ocular lens manufacturing*) sehingga diperoleh kesalahan posisi sistem servo sebesar  $0.2 \mu\text{m}$ . Hasil kerekayasaan mesin perkakas presisi tinggi yang menggunakan teknologi *high speed machining* ini diharapkan dapat meningkatkan daya saing serta kemandirian teknologi nasional dalam rancang bangun mesin perkakas dan diharapkan dapat memicu perkembangan teknologi yang lebih canggih lagi di masa yang akan datang.

**Kata Kunci :** Mesin perkakas, *high speed machining*, kekakuan sistem servo,*transient*, kesalahan posisi.

## Pendahuluan

Pembangunan industri memerlukan mesin dan peralatan pabrik sebagai barang modalnya. Untuk mengurangi ketergantungan teknologi kepada luar negeri perlu dikembangkannya suatu kemandirian teknologi dalam negeri pada industri mesin perkakas sebagai dasar atau penyokong utama industri mesin dan industri manufaktur.

Perancangan mesin perkakas berbeda dengan mesin pada umumnya karena perancangan mesin perkakas mengutamakan ketelitian dan kekakuan, sedangkan perancangan selain mesin perkakas umumnya lebih mengutamakan aspek kekuatan. Ketelitian hasil pemotongan benda kerja dapat ditelusuri dari ketelitian mesin perkakas yaitu ketelitian bidang-bidang referensi (ketelitian geometrik dan ketelitian kinematik) dan ketelitian sistem pengaturannya. Penerapan Teknologi *high speed machining* sangat berpotensi untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil pemotongan benda kerja. Dengan menerapkan sistem kontrol dengan kinerja yang tinggi dan teknologi *high speed machining* sehingga diperoleh mesin perkakas dengan produktivitas dan presisi tinggi.



Gambar 1. Persyaratan pada mesin perkakas [8].

## Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Pada tulisan ini dilakukan pemodelan matematik dalam *domain-s* dari sistem servo pada mekanisme gerakan sumbu yang akan digunakan untuk analisis kesalahan posisi. Kesalahan posisi yang disebabkan oleh sistem servo antara lain disebabkan oleh ketidakkekakuan sistem servo pada mekanisme gerakan sumbu. Kesalahan posisi pada kondisi *transient* dari gerakan sumbu merupakan akibat dari keterlambatan pencapaian kecepatan dimana keterlambatan posisi berbanding lurus dengan keterlambatan kecepatan.

Fasilitas yang digunakan dalam kegiatan ini adalah mesin perkakas buatan Balai MEPPPO-BPPT “*high speed and high precision machine tools for intra ocular lens manufacturing*”. Sistem kontrol yang

digunakan adalah sistem digital kontrol presisi untuk motor dc servo magnet permanen dengan resolusi maximum 0.2  $\mu\text{m}$ . *Spindle* yang digunakan pada mesin perkakas ini adalah *Westwind Air Bearings High Speed Spindle* dengan kecepatan putar hingga 60.000 rpm dan *high precision ballscrew* dengan 2 mm *pitch*.

## Skema dan Numerik

Pada sistem pengaturan servo yang menggunakan motor dc magnet permanen pengaturan kecepatan dilakukan dengan memberikan tegangan masukan ( $e_i$ ) pada belitan *rotor* melalui sikat dan cincin (*brushes* dan *commutator*). Belitan rotor ini memiliki tahanan ( $R$ ) dan induktansi ( $L$ ). Tegangan masukan ( $e_i$ ) ini akan menghasilkan arus pada belitan rotor ( $R.i$  dan  $L.di/dt \ll$ ) dan tegangan balik (*back elektromatic voltage*,  $e_b = K_E \cdot \omega$ ) :

$$\begin{aligned} e &= R.i + K_E \cdot \omega \\ i &= \frac{e - K_E \cdot \omega}{R} \end{aligned} \quad (1)$$

Arus pada belitan rotor yang berada dalam medan magnet permanen ini akan membangkitkan torsi sebesar :

$$T = K_T \cdot i \quad (2)$$

Torsi ini digunakan untuk memberikan percepatan pada rotor yang memiliki inertia massa termasuk komponen penggerak ( $J$ ) dan melawan torsi dari luar atau beban ( $T_L$ ). Torsi ini juga digunakan untuk melawan gesekan pada motor dan menggerakkan kipas yang sebanding dengan kecepatan tetapi dapat diabaikan.

$$K_T \cdot i = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + T_L \quad (3)$$

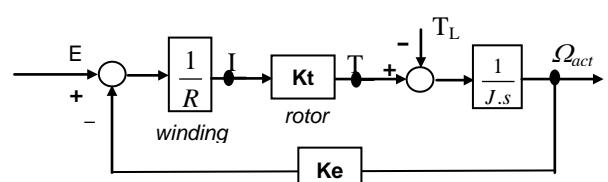
Persamaan-1 di substitusikan pada persamaan-3 maka diperoleh :

$$\frac{K_T}{R} (e - K_E \cdot \omega) = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + T_L \quad (4)$$

dan dalam domain-s Laplace :

$$\frac{K_T}{R} (E - K_E \cdot \Omega) = J \cdot s \cdot \Omega + T_L \quad (5)$$

Persamaan diatas dapat digambarkan dengan diagram block dalam domain-s *Laplace* :



Gambar 2. Diagram block motor dc servo.

Persamaan-4 juga dapat dituliskan sebagai :

$$\frac{J.R}{K_T K_E} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = \frac{1}{K_E} e - \frac{R}{K_T K_E} T_L \quad (6)$$

bila didefinisikan :

$$\tau_m = \frac{J.R}{K_T \cdot K_E} \text{ dan } K_m = \frac{1}{K_E}$$

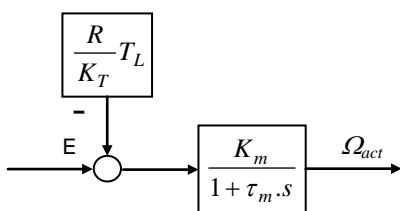
maka persamaan di atas dapat dituliskan sebagai :

$$\tau_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_m \left( e - \frac{R}{K_T} T_L \right) \quad (7)$$

dan dalam domain-s Laplace :

$$\Omega(s) = \frac{K_m}{1 + \tau_m \cdot s} \left[ E(s) - \frac{R}{K_T} T_L(s) \right] \quad (8)$$

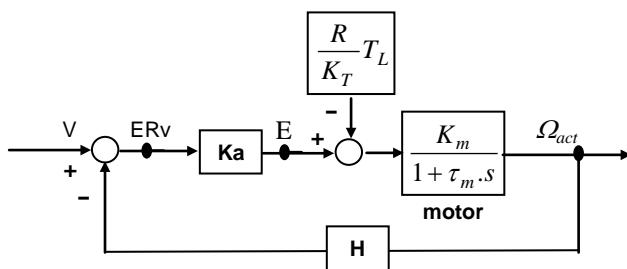
Fungsi transfer motor servo ini merupakan sistem orde pertama. Fungsi transfer motor servo diatas dapat digambarkan dengan diagram block dalam domain-s *Laplace* seperti pada gambar berikut :



**Gambar 3.** Diagram block motor servo dc magnet permanen .

Fungsi transfer rangkaian pengaturan kecepatan tertutup dapat diturunkan dengan menyatakan :

$$e = K_a ( v - H\omega ) \quad (9)$$



**Gambar 4.** Diagram block pengatur kecepatan.

Dengan memasukkan persamaan-9 pada persamaan-7 maka diperoleh :

$$\tau_m \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_m \left( K_a ( v - H\omega ) - \frac{R}{K_T} T_L \right)$$

$$\tau_{CL} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_{CL} \left( v - \frac{R}{K_a \cdot K_T} T_L \right) \quad (10)$$

dimana :

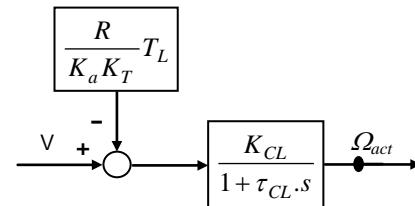
$$\tau_{CL} = \frac{\tau_m}{1 + K_m K_a H} \quad \text{dan}$$

$$K_{CL} = \frac{K_m K_a}{1 + K_m K_a H}$$

dan dalam domain-s Laplace :

$$\Omega(s) = \frac{K_{CL}}{1 + \tau_{CL} \cdot s} \left[ V(s) - \frac{R}{K_a K_T} T_L(s) \right] \quad (11)$$

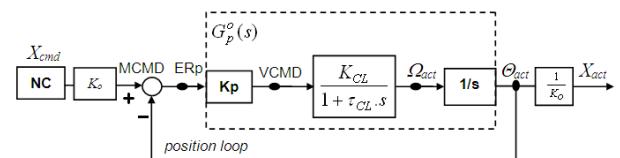
Fungsi transfer rangkaian pengatur kecepatan ini juga merupakan sistem orde pertama dan juga dapat dilihat dari ciri persamaan differensial orde pertama. Persamaan ini dapat digambarkan dengan diagram block dalam domain-s *Laplace* seperti berikut :



**Gambar 5.** Diagram block rangkaian pengatur kecepatan

Jika sistem penggerak (kopling, bearing, *ballscrew* dan *nut*) dapat dianggap kaku maka fungsi transfer rangkaian pengaturan posisi tertutup dapat diturunkan dengan menyatakan :

$$ER_p = \Theta_{cmd} - \Theta_{act} \quad (12)$$



**Gambar 6.** Diagram block rangkaian pengatur posisi  
Jika hubungan :

$$\Theta_{cmd} = X_{cmd} \cdot K_o \text{ dan } X_{act} = \frac{\Theta_{act}}{K_o}$$

maka kesalahan posisi ( $ER_p$ ) adalah

$$ER_p = K_o \cdot (X_{cmd} - X_{act}) \quad (13)$$

Dari diagram block rangkaian pengatur posisi dapat diperoleh fungsi transfer dalam domain-s *Laplace*. Gain pengaturan posisi terbuka  $G_p^o(s)$  adalah :

$$G_p^o(s) = \frac{K_p \cdot K_{CL}}{(1 + \tau_{CL} \cdot s) \cdot s} = \frac{K}{(1 + \tau_{CL} \cdot s) \cdot s} \quad (14)$$

$$\text{dan } ER_p \cdot G_p^o(s) = K_o \cdot X_{act}$$

$$K_o \cdot (X_{cmd} - X_{act}) \cdot G = K_o \cdot X_{act}$$

$$G \cdot X_{cmd} - G \cdot X_{act} = X_{act}$$

$$G \cdot X_{cmd} = X_{act} \cdot (1 + G)$$

$$\frac{X_{act}}{X_{cmd}} = \frac{G}{(1+G)} \quad (15)$$

Subtitusikan persamaaan-14 pada persamaan di atas,

$$\begin{aligned} \frac{X_{act}}{X_{cmd}} &= \frac{K/(1+\tau_{CL} \cdot s) \cdot s}{1+K/(1+\tau_{CL} \cdot s) \cdot s} \\ \frac{X_{act}}{X_{cmd}} &= \frac{K}{\tau_{CL} \cdot s^2 + s + K} \\ \frac{X_{act}}{X_{cmd}} &= \frac{K/\tau_{CL}}{s^2 + s/\tau_{CL} + K/\tau_{CL}} \end{aligned} \quad (16)$$

Persamaan ini merupakan bentuk standar dari sistem orde kedua. Persamaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk domain frekuensi. Jika didefinisikan  $s = j\omega$ , maka diperoleh :

$$\frac{X_{act}(j\omega)}{X_{cmd}(j\omega)} = \frac{\omega_n^2}{\omega_n^2 - \omega^2 + 2 \cdot j \cdot \zeta \cdot \omega \cdot \omega_n} \quad (17)$$

dimana :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau_{CL}}}$$

$$\zeta = \frac{1}{2 \cdot \tau_{CL} \cdot \omega_n} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{K \cdot \tau_{CL}}}$$

Dari teori dasar sistem kontrol linier, diketahui bahwa respon dari persamaan ini terhadap masukan ramp ( $x_{cmd}(t) = F \cdot t$ , dan  $F = \text{feedrate}$ ) adalah [7] :

$$x = F \cdot \left( t + \frac{e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t}}{\omega_d} \sin(\omega_d \cdot t + 2\phi) - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) \quad (18)$$

dimana :

$$\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad \text{dan}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}$$

Respon kondisi tunak (*steady-state*) untuk persamaan ini dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$x_{act,ss} = F \cdot \left( t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) \quad (19)$$

Gerakan dalam selang waktu  $t_1$  pada gambar-1 memperlihatkan bahwa selama waktu  $t_{tr}$  gerakan mengalami kondisi transien, dan memiliki kesalahan ( $x_{cmd}$  terhadap  $x_{act,ss}$ ) yang dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$e_{p,ss} = \frac{F \cdot 2\zeta}{\omega_n} = \frac{F}{\tau_{CL} \cdot \omega_n^2} = \frac{F}{K_p \cdot K_{CL}} = \frac{F}{K} \quad (20)$$

dimana  $K$  adalah komponen dari proposional gain

rangkaian pengatur posisi.

Kesalahan posisi kondisi tunak ini dinamakan sebagai keterlambatan kecepatan (*velocity lag*) dimana keterlambatan posisi berbanding lurus dengan kecepatan. Jika didefinisikan bahwa time konstant berbanding terbalik dengan *gain* (kekakuan),

$$T_p = \frac{1}{K}$$

$T_p$  : konstanta (detik).

$K$  : *gain* (1/detik).

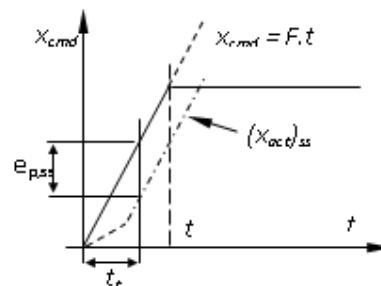
maka persamaan-20 dapat dinyatakan sebagai :

$$e_{p,ss} = F \cdot T_p \quad (21)$$

Kesalahan posisi dari gerakan sumbu-X dan gerakan sumbu-Y dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan diatas :

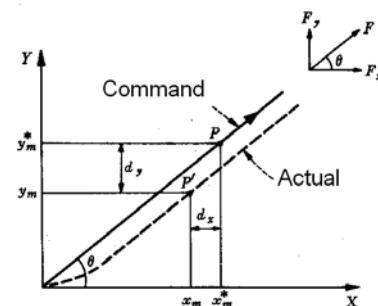
$$d_x = x_{cmd} - x_{act} = F_x \cdot T_{px} \quad \text{dan} \quad (22)$$

$$d_y = y_{cmd} - y_{act} = F_y \cdot T_{py} \quad (23)$$



Gambar 7. Respon posisi terhadap masukan ramp

Kesalahan-kesalahan posisi untuk gerakan *interpolasi linear* sumbu-x dan sumbu-y dinyatakan seperti ada gambar-8.



Gambar 8. Kesalahan gerakan sumbu-x dan sumbu-y pada interpolasi linier

Pada persamaan-20 dapat dilihat bahwa kesalahan posisi keadaan tunak dipengaruhi oleh kecepatan ( $F$ , feedrate) dan kekakuan servo ( $K = K_p \cdot K_{CL}$ ), dimana  $K_{CL}$  adalah parameter dari rangkaian pengatur kecepatan, dan perubahan pada parameter rangkaian pengatur kecepatan lebih sensitif terhadap perubahan kesalahan posisi keadaan tunak.

Ketidaksamaan kekakuan servo (*servo mismatch*) pada metode ballbar adalah perbedaan kekakuan

sistem servo dari gerakan dua sumbu pada interpolasi lingkaran yang mengakibatkan kesalahan posisi pada gerakan sumbu referensi yang disebabkan oleh gerakan suatu sumbu lainnya yang mendahului atau terlambat (*leading* atau *lagging*). Gerakan dua sumbu pada *interpolasi* lingkaran yang memiliki perbedaan kekakuan sebesar  $\Delta T_p$  maka persamaan gerakan masing-masing sumbu dapat dinyatakan sebagai berikut [3]:

$$X_{act} = X_{cmd} + exX \quad (24)$$

$$Y_{act} = Y_{cmd}$$

dimana :

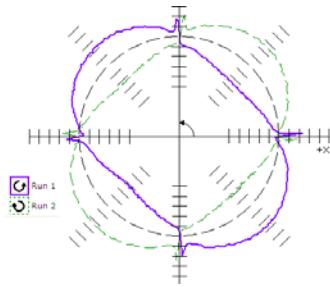
$$exX = B \cdot y_{cmd}.$$

$$B \approx \Delta T_p$$

$\Delta T_p$  = perbedaan kekakuan sistem servo.

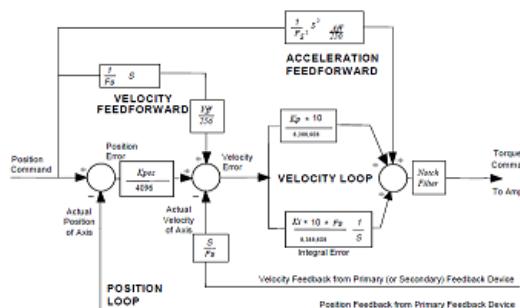
secara matrik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} x_{act} \\ y_{act} \end{bmatrix}_{2 \times N} = \begin{bmatrix} 1 & B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{2 \times 2} * \begin{bmatrix} x_{cmd} \\ y_{cmd} \end{bmatrix}_{2 \times N}$$



Gambar 9. Kesalahan karena servo mismatch pada interpolasi lingkaran (metoda ballbar).

Untuk mendapatkan kualitas dan produktivitas yang tinggi pada produksi lensa katarak perlu diterapkannya sistem kontrol yang memiliki tingkat kekakuan sistem servo yang tinggi. Kekakuan dan ketelitian sistem servo sangat dipengaruhi oleh kecepatan respon sistem servo tersebut untuk mencapai kestabilan.



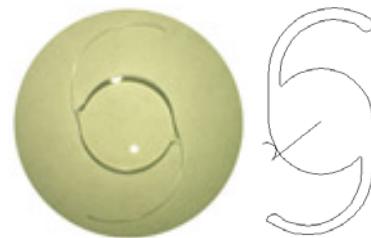
Gambar 10. Aerotech U500 servo loop.[1]

## Hasil dan Pembahasan

Penerapan pengaturan parameter yang optimal telah dilakukan pada mesin perkakas HIGH SPEED MACHINING MEPPO – BPPT sehingga diperoleh kesalahan posisi sistem servo sebesar  $0.2 \mu\text{m}$ . Hasil

kerekayasaan mesin perkakas presisi tinggi yang menggunakan teknologi *high speed machining* ini diharapkan dapat meningkatkan daya saing serta kemandirian teknologi nasional dalam rancang bangun mesin perkakas dan diharapkan dapat memicu perkembangan teknologi yang lebih canggih lagi di masa yang akan datang.

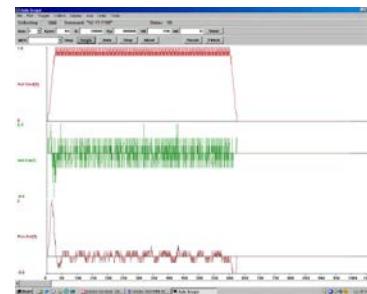
Mesin perkakas presisi tinggi dengan penerapan teknologi *high speed machining* dibutuhkan untuk memproduksi lensa katarak atau *Intra Ocular Lens* (IOL) dengan diameter  $5.25 - 6.50 \text{ mm}$  dan lebar kaki pemegang lensa atau *haptic*  $0.130 - 0.150 \text{ mm}$  serta kontur tanpa catat.



Gambar 9. Lensa Katarak, Intra Ocular Lens (IOL) [11]

Untuk memproduksi lensa katarak sesuai spesifikasi diatas dengan ketelitian yang diinginkan maka dibutuhkan teknologi sistem kontrol servo yang presisi dan respon tinggi, maka setiap perubahan gerakan terkecil pada blok program dalam sistem memory *computerized numerical control* dapat direspon dengan cepat. Gerakan sumbu sebesar  $0.015 \text{ mm}$  dengan kecepatan gerakan  $100 \text{ mm/min}$  harus diselesaikan dalam waktu  $9 \text{ ms}$  sehingga dibutuhkan percepatan dan perlambatan yang tinggi (respon kecepatan  $25 \text{ ms}$ ) agar overshoot gerakan transient masih berada dalam batas toleransi. Respon sistem servo yang tinggi dibutuhkan untuk melakukan gerakan interpolasi lingkaran yang saling bergantian CW dan CCW dengan panjang gerakan yang sangat pendek.

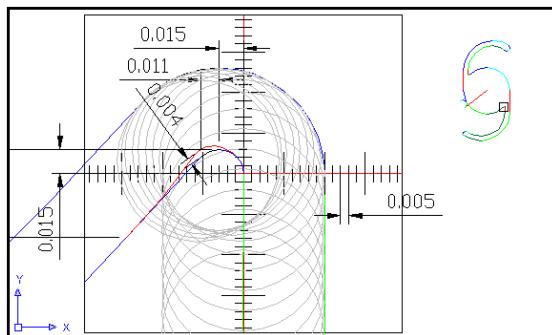
Dengan menggunakan fasilitas *auto tune* pada sistem kontrol servo maka diperoleh parameter gain servo diantaranya:  $K_{pos} = 66$ ,  $K_i = 13.000$ ,  $K_p = 110.000$ ,  $V_{ff} = 256$ ,  $A_{ff} = 0$ . Nilai kesalahan transien gerak pemosision adalah max  $2 \mu\text{m}$ .



Gambar 5. Auto Tune. Respon dan Parameter.

Pemeriksaan kualitas hasil *cutting test* dengan

parameter hasil *auto tune* terdapat *over cutting* pada bagian gerakan perubahan interpolasi lingkaran cw dengan ccw.

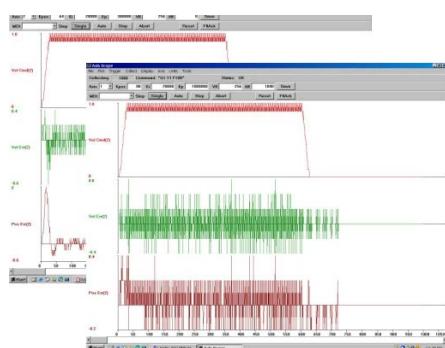


**Gambar 6.** Lintasan pahat pada bagian sudut tajam.



**Gambar 7.** Hasil cutting test ada over cutting

Setelah *auto tune*, kekakuan sistem servo dioptimalkan secara manual: Kpos = 68, Ki = 70.000, Kp = 1.000.000. Vff = 256, Aff = 1000. Gambar 9. menunjukkan hasil respon servo dengan setting parameter secara manual diatas dan diperoleh kesalahan posisi sebesar 0.2 um.



**Gambar 8.** Manual Tune. Respon dan Parameter



**Gambar 9.** Hasil cutting test tidak ada over cutting.

Pemeriksaan kualitas hasil *cutting test* dengan parameter hasil optimasi sudah tidak terdapat kontur yang memiliki *over cutting* pada bagian gerakan perubahan interpolasi lingkaran cw dengan ccw.

#### Spesifikasi :

Model	: RP-11.
Lebar Haptic	: 0.130 mm
Toleransi lebar haptic	: 0.120 – 0.150 mm.
Diameter Optic	: $5.25 \pm 0.1$ mm

No.	Diameter Optic mm	1/3 dari ujung haptic		Kontur
		mm	mm	
1.	5.254	0.129	0.131	OK
2.	5.251	0.125	0.132	OK
3.	5.251	0.129	0.133	OK
4.	5.250	0.130	0.133	OK
5.	5.250	0.124	0.133	OK
6.	5.251	0.129	0.130	OK
7.	5.259	0.132	0.138	OK
8.	5.250	0.127	0.132	OK
9.	5.266	0.133	0.140	OK
10.	5.255	0.133	0.144	OK
11.	5.266	0.134	0.143	OK
12.	5.264	0.132	0.140	OK
13.	5.264	0.132	0.141	OK
14.	5.255	0.139	0.142	OK

Error diameter optic :  $\pm 0.008$  mm.  
Error lebar haptic :  $\pm 0.010$  mm.



**Gambar 10.** Prototype Mesin Perkakas Presisi Tinggi dengan teknologi High Speed Machining.

**Kesimpulan**

Untuk mendapatkan kualitas dan produktivitas yang tinggi pada produksi lensa katarak dengan menggunakan mesin perkakas presisi tinggi dan teknologi high speed machining perlu diterapkannya sistem kontrol yang memiliki tingkat kekakuan sistem servo yang tinggi. Kekakuan dan ketelitian sistem servo sangat dipengaruhi oleh kecepatan respon sistem servo tersebut untuk mencapai kestabilan. Hasil *cutting test* dengan parameter hasil optimasi dapat memperbaiki kualitas kontur lensa, sehingga *over cutting* dapat dihindarkan .

[11].<http://www.rohtolab.com>, “NeoEye Intra Ocular Lens”, Jakarta, 2011.

**Nomenklatur**

NC	: <i>Numerical control.</i>
MCMD	: <i>Motion command.</i>
VCMD	: <i>Velocity command.</i>
TCMD	: <i>Torque command.</i>
1/s	: <i>Integrator (domain-s Laplace).</i>
K <sub>T</sub>	: Konstanta torsi motor servo.
K <sub>o</sub>	: $2\pi/pitch$ .
K <sub>p</sub>	: <i>Position gain</i>

**Referensi**

- [1]. Aerotech, “The Unidex 500 Motion Controller and Windows Software”, Pittsburgh, USA, 2000.
- [2]. Kakino, Y, Ihara, Y, Sinohara, A, Accuracy Inspection of NC Machine Tools by Double ball Bar Method, Hanser, Munich, 1993.
- [3]. Nasril, “Penerapan Metode MTH Dalam Diagnosis Sumber Kesalahan Mesin Perkakas NC”, Tugas Sarjana S-2, Jurusan Teknik Mesin, ITB, 2003.
- [4]. O’Connor. P.D.T, Practical Reliability Engineering, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [5]. Ogata.K, Modern Control Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 1997.
- [6]. Slocum, A.H., Precision Machine Design, Prentice Hall Int, New Jersey, 1992.
- [7]. Tlusty, J, ”Manufacturing Process and Equipment”, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- [8]. VDMA, “Machine Tools “made in germany”: economic trends and technical prospects”, Munchen, 1994.
- [9]. Weck, M., Machine Tools Hand Book, John Wiley & Sons, Ney York, 1980.
- [10].Weswind-GSI, “Air Bearing Techno-logy”, Dorset, United Kongdom, 2007.