

Pengaturan Kecepatan *Spindle* pada *Retrofit* Mesin Bubut CNC Menggunakan Kontroler PI *Gain Scheduling*

Fikri Yoga Permana dan Moch. Rameli

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: rameli@ee.its.ac.id

Abstrak—Pada mesin bubut *Computerized Numerical Control* (CNC), proses pemahatan benda kerja memerlukan kecepatan potong yang tetap agar hasil kerja memiliki tingkat presisi tinggi. Dalam prakteknya, ketika terjadi pemotongan, diameter benda kerja akan selalu berkurang dan tingkat kedalaman pahat berubah-ubah sesuai dengan proses yang dilakukan sehingga mempengaruhi kecepatan putar motor *spindle* sehingga mengakibatkan tingkat presisi hasil kerja menjadi berkurang. Pada penelitian ini, digunakan kontroler PI *Gain Scheduling* untuk mengatur kecepatan motor *spindle*. Hasil yang didapatkan berupa simulasi kontroler PI *Gain Scheduling*. Dari hasil simulasi didapatkan kontroler PI *Gain Scheduling* mampu membuat respon sistem sesuai dengan yang diinginkan.

Kata Kunci— *spindle*, mesin bubut, CNC, kecepatan potong, PI *Gain Scheduling*.

I. PENDAHULUAN

SAAT ini, industri skala besar telah menggunakan mesin *Computerized Numerical Control* (CNC) untuk menggantikan mesin-mesin perkakas konvensional. Apabila dibandingkan dengan mesin konvensional, mesin CNC memiliki banyak kelebihan dalam hal akurasi dan tidak memerlukan keahlian operator. Namun, tidak semua industri mampu memenuhi kebutuhannya dengan menggunakan mesin CNC. Pada industri skala menengah dan kecil, mesin CNC terlalu mahal sehingga tidak cocok digunakan.

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, mesin *retrofit* CNC merupakan salah satu solusi permasalahan tersebut. *Retrofit* merupakan istilah yang merujuk pada penambahan beberapa komponen atau aksesoris kepada sesuatu yang belum dimiliki saat diproduksi. Dalam hal ini, *retrofit* berarti penggantian dan penyinkronan beberapa komponen pada mesin konvensional menjadi layaknya mesin CNC.

Mesin bubut merupakan salah satu mesin perkakas yang banyak digunakan di industri. Pada mesin bubut, benda kerja yang ingin dibentuk diputar dengan menggunakan motor *spindle* untuk kemudian dipahat menggunakan motor aksis. Agar dapat menghasilkan benda yang halus, kecepatan *spindle* pada saat pemotongan harus dijaga konstan, sedangkan pada saat pemotongan kecepatan *spindle* dapat berkurang yang diakibatkan naiknya torsi beban.

Banyak metode yang telah digunakan untuk mengatur

kecepatan *spindle* saat pemakanan. Beberapa diantaranya menggunakan metode kontrol *robust Quantitative Feedback Theory* (QFT) dan *Fuzzy Logic Controller* [2], [3]. Dengan metode tersebut didapatkan hasil sesuai dengan kriteria respon sistem yang diinginkan.

Pada penelitian ini akan dirancang *retrofit* mesin bubut CNC. Fokus permasalahan yang ingin dipecahkan adalah pengaturan kecepatan *spindle* agar tetap konstan saat terjadi pemotongan dengan menggunakan kontroler PI *Gain Scheduling*. Pemilihan kontroler ini dikarenakan tidak membutuhkan waktu yang lama dalam perhitungannya. Harapannya, algoritma kontrol ini akan dapat dijadikan referensi dalam perancangan kontrol pada mesin CNC.

II. DASAR TEORI

A. Pengaturan Kecepatan *Spindle* pada Mesin Bubut

Mesin bubut merupakan mesin perkakas yang bekerja dengan cara memutar benda kerja dengan menggunakan motor *spindle* dan proses pemotongannya menggunakan motor aksis dua koordinat (X dan Z) [1]. Proses pemotongan pada mesin bubut ditunjukkan pada Gambar 1. Kecepatan potong pada mesin bubut disesuaikan dengan tahap pemotongan dan memiliki batas berbeda-beda sesuai dengan jenis material yang digunakan. Kecepatan putar *spindle* harus disesuaikan dengan kecepatan potong dan diameter benda kerja saat itu. Fungsi yang menghubungkan kecepatan potong, kecepatan *spindle* dan diameter benda kerja ditunjukkan dalam (1).

$$C_s = \frac{\pi dn}{1000} \quad (1)$$

dimana:

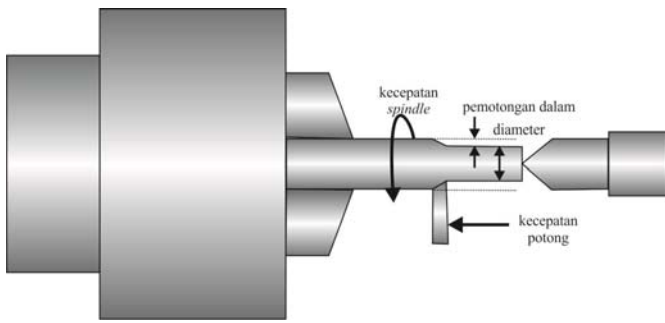
C_s : kecepatan potong

d : diameter benda kerja

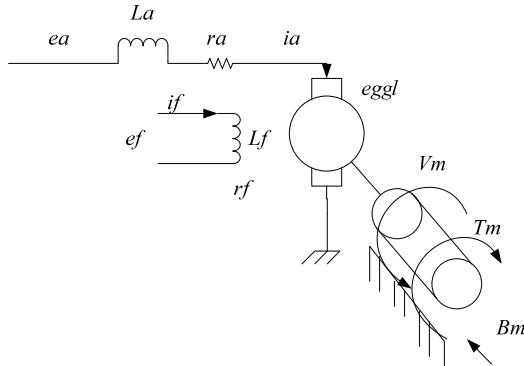
n : kecepatan putar *spindle*.

B. Motor DC [2]

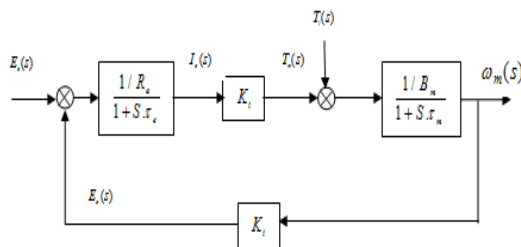
Skema rangkaian motor DC digambarkan pada Gambar 2. Kecepatan motor DC berbanding terbalik dengan GGL lawan. Motor DC memiliki fungsi tegangan terminal dan GGL lawan



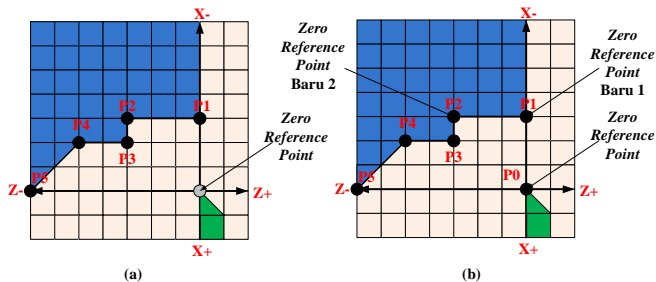
Gambar. 1. Proses pemotongan pada mesin bubut.



Gambar. 2. Rangkaian elektrik motor DC penguat terpisah



Gambar. 3. Diagram blok motor DC



Gambar. 4. (a) Mode Pemrograman Absolut, (b) Mode Pemrograman Inkremental

seperti yang ditunjukkan pada (2) dan (3).

$$V_t = E_a + I_a \tag{2}$$

$$E_a = Cn\phi \tag{3}$$

Fungsi tegangan terminal dan GGL lawan dapat diturunkan menjadi rumus kecepatan motor (n).

$$n = \frac{V_t - I_a}{C\phi} \tag{4}$$

Dari (4), dapat dilihat bahwa kecepatan motor DC (n), dapat diatur dengan mengubah besaran tegangan jangkar (V_t), tahanan jangkar (R_a) dan fluks magnet (Φ). Diagram blok motor DC ditunjukkan pada Gambar 3.

C. Computerized Numerical Control (CNC) [3]

Mode pemrograman pada CNC terbagi menjadi dua, yaitu mode pemrograman absolut dan mode pemrograman inkremental. Mode pemrograman absolut cocok digunakan untuk gerakan cepat sedangkan mode pemrograman inkremental cocok digunakan gerakan interpolasi. Gerakan cepat digunakan untuk memosisikan pahat pada posisi siap potong atau setelah pemotongan. Gerakan interpolasi digunakan untuk memotong benda kerja sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Ilustrasi gerakan pada mode pemrograman absolut dan mode pemrograman inkremental ditunjukkan pada Gambar 4.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Arsitektur Sistem

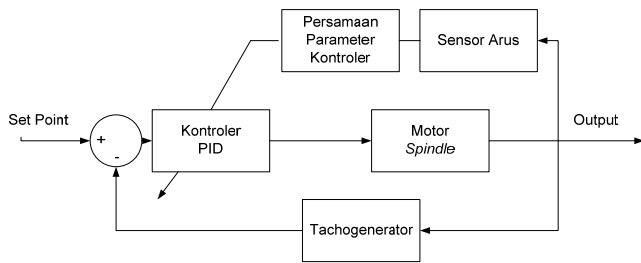
Sistem yang dirancang merupakan *retrofit* mesin bubut CNC. Kontroler CNC yang digunakan yaitu LNC T300. Penambahan komponen yang digunakan yaitu pada koneksi antara motor *spindle* dan LNC T300 serta *driver*. Kemudian, pembenahan juga dilakukan dengan mengganti motor aksis yang awalnya menggunakan motor DC menjadi motor servo.

Motor *spindle* yang digunakan tidak memiliki enkoder sehingga memerlukan pengaturan sendiri. Rangkaian *driver* sebelumnya menggunakan komputer sebagai kontroler sehingga tidak cocok untuk diaplikasikan pada *retrofit* mesin bubut. Untuk itu, dirancang rangkaian yang berfungsi sebagai kontroler motor *spindle* dan sebagai fungsi komunikasi dengan *driver* yang digunakan sebelumnya. Rangkaian yang dirancang berupa sistem minimum ATmega32 yang dihubungkan dengan *amplifier*. Untuk pembacaan torsi motor yang diwakili oleh arus jangkar (I_a), digunakan sensor arus ACS712.

Motor DC aksis digantikan dengan motor servo yang telah memiliki *driver* terintegrasi dan sesuai untuk diaplikasikan pada mesin CNC. Motor servo yang digunakan yaitu Panasonic Minas A4 Series.

B. Diagram Blok Sistem

Pada penelitian ini, kecepatan putar *spindle* dijaga tetap konstan sesuai dengan *set point* dengan menggunakan kontroler PI *Gain Scheduling*. Parameter kontroler PI berubah sesuai dengan masukan sensor arus yang merepresentasikan torsi motor. Semakin besar torsi beban yang dikenakan oleh pahat, semakin lambat kecepatan motor *spindle*, dan akan menyebabkan kontroler PI bekerja sesuai dengan parameter saat itu. Diagram blok sistem yang akan diatur ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar. 5. Diagram blok sistem

C. Mesin Bubut

Mesin bubut yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- kode : JD 25 AF
 - seri : 9 5 2 4 8
- sedangkan spesifikasi motor spindle yang digunakan sebagai berikut:

- kode : Motor DC AMETEK
- seri : 115079 – 161508
- daya : 0,48 HP
- tegangan maksimal : 38 Volt
- kecepatan maksimal : 800 rpm

dan spesifikasi motor servo aksis yang digunakan sebagai berikut:

- tipe : Panasonic Minas A4 Series
- kode : MSMD5AZS1S
- arus input : 30 Ampere (AC)
- tegangan input : 92 Volt
- daya : 0,2 kW
- frekwensi output : 200 Hz
- kecepatan rotasi : 3000 rpm

D. Perangkat Kontrol

Rangkaian kontrol yang digunakan pada Tugas Akhir ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu rangkaian mikrokontroler (sistem minimum ATmega32 dan rangkaian penguat tegangan) dan driver motor. Rangkaian sistem minimum ATmega32 digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM yang dihubungkan dengan driver motor dan sebagai pembaca data sensor

Rangkaian penguat tegangan yang digunakan yaitu operational amplifier. Penguatan tegangan yang dihasilkan yaitu dua kali tegangan input sehingga menghasilkan pulsa dengan amplitudo 10V.

E. Sensor Arus

Sensor arus digunakan untuk mengetahui torsi motor. Sensor arus yang digunakan yaitu ACS712. Sensor arus ACS712ELCTR-20A-T memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- tegangan suplai : 5 Volt
- resolusi : 100mV/A
- arus maksimal : 20 Ampere
- keluaran saat arus nol : 2,5 Volt

F. Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem dilakukan dengan cara identifikasi statis dengan memberikan set point berupa sinyal step. Identifikasi dilakukan pada set point kecepatan putar spindle 600 rpm dengan diameter awal 2,5 cm dan time sampling 0,01 detik. Model matematika yang didapatkan merupakan hubungan antara kecepatan putar spindle aktual dengan set point kecepatan putar spindle yang diinginkan. Identifikasi dilakukan pada beberapa kondisi yaitu pada kondisi tanpa beban (tidak terjadi pemotongan) dan kondisi berbeban (saat pemotongan) dengan variasi berupa kedalaman pahat.

Pengambilan data pada kondisi tanpa beban dilakukan sebanyak lima kali. Dari kelima data tersebut didapatkan model matematika dengan nilai Root-Mean Squared Error (RMSE) terkecil. Hasil transfer function yang didapatkan beserta RMSE-nya ditunjukkan pada Tabel 1.

Pengambilan data kecepatan putar spindle saat pemotongan diambil pada kondisi kedalaman pahat berbeda. Proses pengambilan data tersebut tidak menghasilkan data sesuai dengan yang diharapkan dikarenakan terjadi kegagalan struktur mekanik pada spindle yang diakibatkan oleh selipnya belt yang menghubungkan motor dan spindle. Hal ini mengakibatkan mesin macet saat pemotongan dilanjutkan pada kedalaman pahat lebih. Hal tersebut juga mengakibatkan perubahan respon sistem akibat pemotongan tidak terlalu signifikan.

Proses pengambilan data dilakukan dengan 11 variasi kedalaman pahat, yaitu dari kedalaman pahat 0,5 mm sampai 1,5 mm. Dengan menggunakan pendekatan orde satu didapatkan transfer function seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Transfer function kecepatan spindle tanpa beban dipilih dengan nilai RMSE terkecil sehingga didapatkan transfer function kecepatan spindle tanpa beban seperti ditunjukkan pada (5).

$$G(s) = \frac{0,6975}{0,117s + 1} \tag{5}$$

Selain itu diukur pula arus jangkar untuk setiap variasi kedalaman pahat. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 3.

G. Perancangan Kontroler PI Gain Scheduling

Perancangan kontroler PI Gain Scheduling dimulai dari perancangan kontroler PI untuk tiap kondisi. Perancangan kontroler PI dilakukan secara analitik. Pencarian parameter kontroler K_p dan τ_i disesuaikan dengan model plant. Spesifikasi respon sistem yang diinginkan adalah settling time 0,1 detik dan overshoot maksimal 0,4%.

Pada kondisi tanpa pemotongan, parameter K_p dan τ_i dapat dicari sebagai berikut:

$$M_p^* = 0,4 = e^{-\left(\frac{\xi^*}{\sqrt{1-\xi^{*2}}}\right)\pi} \Leftrightarrow \ln(0,4) = -\frac{\pi\xi^*}{\sqrt{1-\xi^{*2}}} \Leftrightarrow \xi = 0,06$$

$$t_s^*(\pm 5\%) = \frac{3}{\sigma^*} = \frac{3}{\xi^* \omega_n^*} = 0,1 \Leftrightarrow \omega_n^* = \frac{3}{(0,1)(0,06)} = 516,27$$

Tabel 1.
Transfer Function Kecepatan Putar Spindle Tanpa Beban

Transfer Function	RMSE (%)
$G(s) = \frac{0,66833}{0,125s+1}$	0,1378
$G(s) = \frac{0,68}{0,0974s+1}$	0,1378
$G(s) = \frac{0,68033}{0,1084s+1}$	0,1436
$G(s) = \frac{0,90833}{0,0854s+1}$	0,1516
$G(s) = \frac{0,6975}{0,177s+1}$	0,1072
$G(s) = \frac{0,6725}{0,1278s+1}$	0,1335
$G(s) = \frac{0,6958}{0,0648s+1}$	0,1233
$G(s) = \frac{0,6967}{0,0676s+1}$	0,1857
$G(s) = \frac{0,69}{0,0731s+1}$	0,1333
$G(s) = \frac{0,695}{0,12464s+1}$	0,1431
$G(s) = \frac{0,6683}{0,0867s+1}$	0,128

Tabel 2.
Transfer Function Kecepatan Putar Spindle dengan Variasi Kedalaman Pahat

Kedalaman Pahat	Transfer Function
0,5 mm	$G(s) = \frac{0,6333}{0,117s+1}$
0,6 mm	$G(s) = \frac{0,5833}{0,117s+1}$
0,7 mm	$G(s) = \frac{0,575}{0,117s+1}$
0,8 mm	$G(s) = \frac{0,567}{0,117s+1}$
0,9 mm	$G(s) = \frac{0,55833}{0,117s+1}$
1 mm	$G(s) = \frac{0,55}{0,117s+1}$
1,1 mm	$G(s) = \frac{0,54167}{0,117s+1}$
1,2 mm	$G(s) = \frac{0,5333}{0,117s+1}$
1,3 mm	$G(s) = \frac{0,525}{0,117s+1}$
1,4 mm	$G(s) = \frac{0,5167}{0,117s+1}$
1,5 mm	$G(s) = \frac{0,50833}{0,117s+1}$

$$K_p = \frac{1}{K} (2\xi^* \omega_n^* \tau - 1) = \frac{1}{0,6975} (2 \times 0,06 \times 516,27 \times 0,117 - 1)$$

$$= 8,6$$

$$\tau_i = \frac{KK_p}{\tau \omega_n} = \frac{0,6975 \times 8,6}{0,117 \times 516,27} = 0,1$$

Tabel 3.
Hasil pengukuran arus jangkar untuk tiap variasi kedalaman pahat

Kedalaman Pahat (mm)t	Arus Jangkar (mA)
0	750
0,5	650
0,6	630
0,7	590
0,8	580
0,9	570
1	560
1,1	340
1,2	320
1,3	310
1,4	300
1,5	290

Tabel 4.
parameter kontroler PI untuk tiap variasi kedalaman pahat

Kedalaman Pahat (mm)	Arus Jangkar (mA)	K_p	τ_i
0	750	8,66	0,1
0,5	650	9,5	0,1
0,6	630	10,32	0,1
0,7	590	10,47	0,1
0,8	580	10,618	0,1
0,9	570	10,78	0,1
1	560	10,94	0,1
1,1	340	11,11	0,1
1,2	320	11,29	0,1
1,3	310	11,46	0,1
1,4	300	11,65	0,1
1,5	290	11,84	0,1

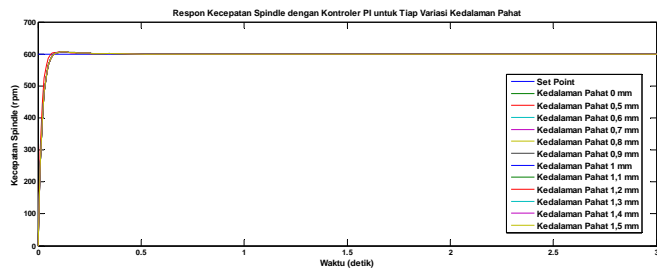
Dengan cara yang sama didapatkan parameter kontroler PI untuk tiap variasi kedalaman pahat yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Dari Tabel 4 dapat dibuat sebuah fungsi parameter kontroler sebagai acuan dalam penalaan parameter kontroler PI *Gain Scheduling*. Fungsi parameter K_p ditunjukkan pada (6) sedangkan parameter τ_i selalu konstan pada 0,1.

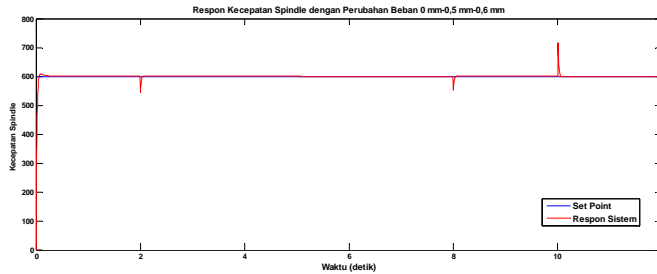
$$K_p = 0,000000000003I_a^5 - 0,000000006I_a^4 + 0,000005I_a^3 - 0,0019I_a^2 + 0,3117I_a - 4,062 \quad (6)$$

IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

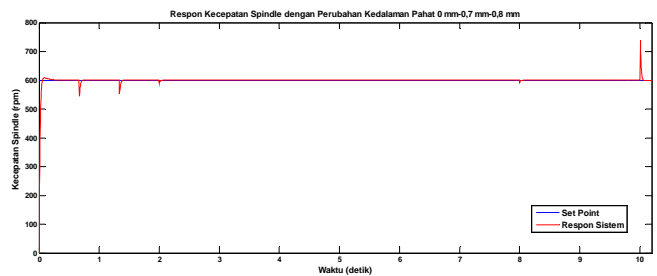
pengujian kontroler dilakukan 2 tahap yaitu dengan uji *loop* tertutup untuk setiap variasi kedalaman pahat dan uji pembebanan dengan melakukan pemotongan dengan kedalaman pahat berubah-ubah. Hasil simulasi uji *loop* tertutup untuk setiap variasi kedalaman pahat ditunjukkan pada Gambar 6. Simulasi pemotongan dengan kedalaman pahat berubah-ubah dilakukan sebanyak 5 kali. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm - 0,5 mm - 0,6 mm ditunjukkan pada Gambar 7. Dari respon sistem pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa spesifikasi respon sistem masih pada batas yang diinginkan, yaitu *settling time* 0,1 detik dan *overshoot* maksimal sebesar 0,4%. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm - 0,7 mm - 0,8 mm ditunjukkan pada Gambar 8.



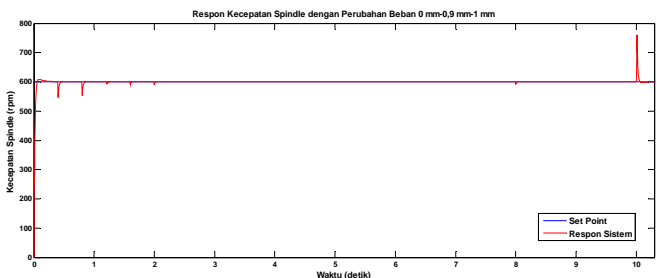
Gambar 6. Hasil simulasi kontroler untuk tiap variasi beban



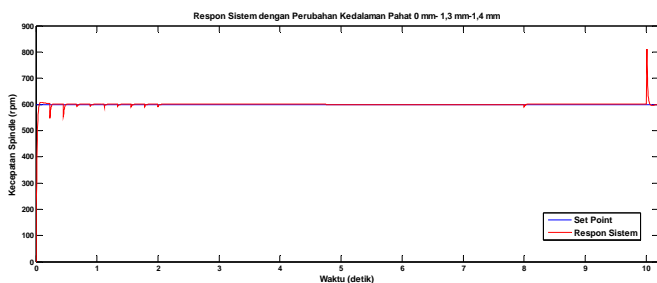
Gambar 7. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm-0,5 mm-1,5 mm



Gambar 8. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm-0,7 mm-0,8 mm



Gambar 9. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm-1,1 mm-1,2 mm



Gambar 10. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm-1,5 mm-0 mm

Dari respon sistem pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa spesifikasi respon sistem masih pada batas yang diinginkan, yaitu *settling time* 0,1 detik dan *overshoot* maksimal sebesar 0,4%. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm - 0,9 mm - 1,0 mm ditunjukkan pada Gambar 9.

Dari respon sistem pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa spesifikasi respon sistem masih pada batas yang diinginkan, yaitu *settling time* 0,1 detik dan *overshoot* maksimal sebesar 0,4%. Respon sistem dengan perubahan kedalaman pahat 0 mm – 1,2 mm - 1,4 mm ditunjukkan pada Gambar 10.

Dari respon sistem pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa spesifikasi respon sistem masih pada batas yang diinginkan, yaitu *settling time* 0,1 detik dan *overshoot* maksimal sebesar 0,4%.

V. KESIMPULAN

Dari semua hasil simulasi yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kontroler PI *Gain Scheduling* mampu menjaga kecepatan *spindle* tetap stabil pada *set point* dengan *settling time* sebesar 0,1 detik dan *overshoot* maksimal sebesar 0,4%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sumbodo, W. Pujiono, S. "Teknik Produksi Mesin Industri Jilid 2". Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan Departemen Pendidikan Nasional. 2008.
- [2] Khairudin. Pengaturan Kecepatan *Spindle* pada Mesin Bubut dengan Pengerak Motor DC Menggunakan Sistem Pengaturan *Robust Metode Quantitative Feedback Theory (QFT)*.Tesis, Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS. 2004.
- [3] Hwan Suh, S. Kyoong Kang, S. Hyuk Chung, D. Stroud, I. "Theory and Design of CNC Systems". Springer. 2008.