

## ANALISIS PERBANDINGAN DISKRITISASI ZOH DAN TUSTIN PADA PROSES ESTIMASI PARAMETER MODEL ROL PENGGULUNG MESIN METALLIZING

Yaya Finayani<sup>1</sup>, Salechan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Pratama Mulia Surakarta  
Jl. Haryo Panular 18A Surakarta, 57149 Telp 0271 712637

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektronika, Politeknik Pratama Mulia Surakarta  
Jl. Haryo Panular 18A Surakarta, 57149 Telp 0271 712637  
email: yyfinayani@yahoo.com

### Abstrak

Sebuah pendekatan dalam pengendalian plant yang parameter-parameternya tidak diketahui dapat dilakukan dengan menggunakan teknik kendali adaptif. Parameter-parameter kendali tersebut beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan disekitarnya, seperti adanya gangguan, serta perubahan karakter internal dari sistem yang dikendalikan. Parameter diadaptasi oleh sistem dengan proses estimasi parameter, hasil estimasi dipakai untuk mengupdate parameter kendali hingga tercapai keluaran system sesuai dengan referensi atau modelnya. Proses estimasi parameter merupakan salah satu bagian dari teknik kendali yang merupakan salah satu system pengendalian modern, yang terbagi atas beberapa metode diantaranya model reference, self tuning dan gain scheduling. Penelitian ini melakukan proses estimasi parameter model rol penggulung pada mesin metallizing dengan algoritma RLS (recursive least square) berbasis forgetting factor dengan metode diskritisasi ZOH (zero older hold) dan Tustin, estimasi parameter model dari model matematik rol penggulung mesin metalizing perlu dilakukan dan digunakan sebagai bahan ajar khususnya matakuliah Sistem Kendali dan Instrumentasi Kendali karena proses estimasi parameter diaplikasikan langsung dari plant berbasis industry. Estimasi parameter model fungsi alih bagian rol penggulung mesin metalizing dengan metode RLS berbasis forgetting factor ( $\lambda$ ) dengan matriks kovarian  $P = 10^8$ . Konvergensi hasil estimasi parameter baik metode ZOH maupun TUSTIN tidak akan konvergen saat forgetting factor ( $\lambda$ ) = 1. Estimasi parameter model fungsi alih bagian rol penggulung mesin metalizing dengan metode diskritisasi ZOH konvergen dengan nilai  $\lambda = 0,96$  dengan MSE sebesar  $1,219 \times 10^{-4}$  pada periode cuplikan 0,5 detik, sedangkan dengan diskritisasi TUSTIN dengan  $\lambda=0,96$  diperoleh MSE sebesar  $4,666 \times 10^{-5}$ . Konvergensi hasil estimasi parameter fungsi alih bagian rol penggulung mesin Metallizing dengan  $\lambda = 0,96$  dengan metode diskritisasi TUSTIN diperoleh nilai MSE yang lebih kecil dibandingkan metode diskritisasi ZOH perbedaan nilai MSE sebesar 61,7 %. Hasil estimasi koefisien parameter model Rol Penggulung Mesin Metallizing untuk koefisien yang tidak berubah waktu, menghasilkan nilai penyimpangan rata-rata 0,47% untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibanding dengan diskritisasi ZOH, sedangkan koefisien yang berubah waktu sebesar 0,026%. Nilai  $\lambda$  diperkecil lagi  $\lambda < 0,96$  hal ini akan berakibat rentang terhadap gangguan (noise).

**Kata kunci:** rol penggulung, estimasi parameter, RLS, forgetting factor, ZOH, TUSTIN

### Pendahuluan

Sebuah pendekatan dalam pengendalian plant yang parameter-parameternya tidak diketahui dapat dilakukan dengan menggunakan teknik kendali adaptif. Sistem kendali adaptif merupakan sistem kendali yang mempunyai parameter-parameter kendali yang dapat beradaptasi yang dilengkapi dengan algoritma pembelajaran. Parameter-parameter kendali tersebut beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan disekitarnya, seperti adanya gangguan, serta perubahan karakter internal dari sistem yang dikendalikan. Penggunaan sistem kendali adaptif menunjukkan peningkatan kinerja sistem karena suatu sistem umumnya berada dalam situasi yang mengandung derau dan gangguan serta kondisi internal dan eksternalnya mengandung ketidakpastian.

Parameter diadaptasi oleh sistem dengan proses estimasi parameter, hasil estimasi dipakai untuk mengupdate parameter pengendali hingga tercapai keluaran system sesuai dengan referensi atau modelnya. Dari data hasil estimasi tersebut, parameter kontroler ditala sedemikian hingga karakteristik proses kendalian menjadi lebih baik. Bila parameter proses berubah akibat perubahan lingkungan operasi plant, maka estimasi parameter juga berubah secara on-line, sehingga parameter kontroler ditala kembali sedemikian hingga karakteristik yang diharapkan dapat dipertahankan.

Penelitian ini melakukan proses estimasi parameter model rol penggulung pada mesin metallizing dengan algoritma RLS (*recursive least square*) berbasis *forgetting factor* dengan metode diskritisasi ZOH (*zero older hold*) dan Tustin, estimasi parameter model dari model matematik rol penggulung mesin metalizing perlu dilakukan dan digunakan sebagai bahan ajar khususnya matakuliah Sistem Kendali dan Instrumentasi Kendali karena proses estimasi parameter diaplikasikan langsung dari *plant* berbasis industri.

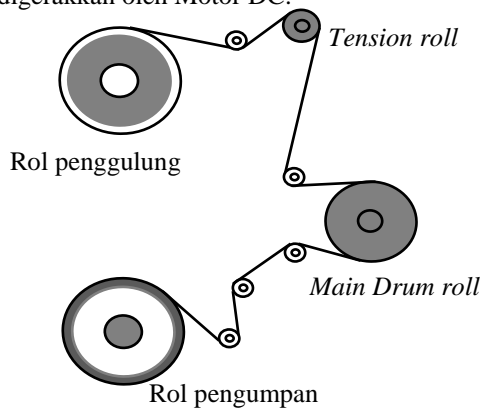
Untuk itu penelitian yang diusulkan ini akan mensimulasikan proses estimasi parameter model matematik dari sistem rol penggulung pada mesin metallizing sehingga diperoleh proses estimasi parameter model berbasis industri yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk teknik kendali adaptif nya.

**Bahan dan Metode Penelitian**

**Model matematik rol penggulung mesin metalizing**

Model fungsi alih bagian Rol Penggulung Mesin Metallizing yang digunakan *plant* dalam penelitian ini adalah model matematik dalam bentuk fungsi alih hasil penelitian (Finayani dkk, 2014).

Konstruksi rol pada mesin Metallizing diperlihatkan Gambar 1, berikut ini yang terdiri dari empat (4) jenis rol yaitu *unwinder roll* (rol Pengumpan), *Main Drum roll* (rol pengendali kecepatan, *Tension rollrewinder roll* (rol penggulung) dengan tiap-tiap rol digerakkan oleh Motor DC.



Gambar 3. Kontruksi Rol Mesin Metallizing

Hasil pemodelan matematik bagian Rol Penggulung Mesin Metallizing (Finayani dkk, 2014) diperoleh 4 (empat) buah model persamaan matematis bagian Rol Penggulung dalam bentuk fungsi alih (*transfer function*) yaitu:

$$1. G_{31} = \frac{T_3}{U_0} \text{ merupakan fungsi alih } \frac{\text{gayategangtensionroll} - \text{rolpenggulung}}{\text{torsimotorrolpengumpan}} \tag{1}$$

$$2. G_{32} = \frac{T_3}{U_1} \text{ , fungsi alih } \frac{\text{gayategangtensionroll} - \text{rolpenggulung}}{\text{torsimotormaindrum}} \tag{2}$$

$$3. G_{33} = \frac{T_3}{U_2} \text{ , fungsi alih dari } \frac{\text{gayategangtensionroll} - \text{rolpenggulung}}{\text{torsimotor tensionroll}} \tag{3}$$

$$4. G_{34} = \frac{T_3}{U_3} \text{ , fungsi alih antara } \frac{\text{gayategangtensionroll} - \text{rolpenggulung}}{\text{torsimotorrolpenggulung}} \tag{4}$$

Empat model matematis fungsi alih bagian Rol Penggulung Mesin Metallizing diperoleh 2 (dua) buah fungsi alih yang berubah waktu (*time varying*) yaitu  $G_{31}(s)$  dan  $G_{34}(s)$  dikarenakan terdapat variable  $R_0$  (radius rol pengumpan yang *time varying*) dan  $R_3$  (radius rol penggulung yang *time varying*) dengan keempat model matematis ber-orde 4, 2 persamaan fungsi alih yang tidak berubah waktu (*time invarying*)  $G_{32}(s)$  dan  $G_{33}(s)$ . Untuk penelitian ini difokuskan pada Rol Penggulung sehingga untuk selanjutnya dipilih fungsi alih  $G_{34}(s)$  yang digunakan sebagai *plant* dalam proses estimasi parameter yang merupakan salah satu unsur dasar dari Teknik Kendali Adaptif. Fungsi alih  $G_{34}(s)$  terdapat variable  $R_3$  pada bagian numerator fungsi alihnya yang *time varying*.

$$G_{34}(s) = \frac{\{c_{3kt}^{\frac{R_2}{kt}}\}s^3 + \left\{c_{3kt}^{\frac{R_3}{kt}} \left| \frac{b f_1 + v_2 + v_1}{J_1 L_2 + L_1} \right| \right\} s^2 + \left\{c_{3kt}^{\frac{R_3}{kt}} \left| \frac{v_2 b f_1 + v_1 v_2 + v_1 b f_1}{L_2 J_1 + L_1 L_2 + L_1 J_1} \right| \right\} s + \left\{c_{3kt}^{\frac{R_3}{kt}} \left| \frac{v_1 v_1 b f_1}{L_1 L_1 J_1} \right| \right\}}{\Delta} \text{ dengan dengan nilai } \Delta \text{ adalah}$$

$$s^4 + \left| \frac{b_{f1}}{J_1} + \frac{V_3}{L_3} + \frac{V_2}{L_2} + \frac{V_1}{L_1} \right| s^3 + \left| \frac{V_3 b_{f1}}{L_3 J_1} + \frac{V_2 b_{f1}}{L_2 J_1} + \frac{V_2 V_3}{L_2 L_3} + \frac{V_1 b_{f1}}{L_1 J_1} + \frac{V_1 V_3}{L_1 L_3} + \frac{V_1 V_2}{L_1 L_2} \right| s^2 + \left| \frac{V_2 V_3 b_{f1}}{L_2 L_3 J_1} + \frac{V_1 V_3 b_{f1}}{L_1 L_3 J_1} + \frac{V_1 V_2 b_{f1}}{L_1 L_2 J_1} + \frac{V_1 V_2 V_3}{L_1 L_2 L_3} \right| s + \left| \frac{V_1 V_2 V_3 b_{f1}}{L_1 L_2 L_3 J_1} \right|$$

Keterangan,

$U_0, U_1, U_2, U_3$  =masukan gaya putar rol pengumpan, main drum, tension roll, rol penggulung

T1 = gaya tegang keluaran antara bagian rol pengumpan (*unwind*) dan *main drum*.

$L_1$  = jaak antara rol pengumpan dan *main drum roll*.

$J_1$  = inersia *main drum roll*

$R_0, R_1, R_2, R_3$  =radius dari rol *pengumpan, rol main drum, tension roll, rol penggulung*

$n_1$  =ratio gear ,

$b_{f1}$  = koefisien friksi

T2 = gaya tegang keluaran web antara bagian *main drum roll* dengan tension roll,

$L_2$  =jarak antara rol *main drum* dengan bagian tension roll

T3 =gaya tegang keluaran antara bagian *tension roll* dengan rol penggulung (*rewind*)

$L_3$  = jarak antara rol bagian tension roll dengan rol penggulung.

$A$  = luas permukaan web,

$E$  = modulus elastisitas dari web

$\omega$  = kecepatan sudut,

$k_t$  = konstanta gaya putar,

### Perancangan simulasi estimasi parameter model rol penggulung

Simulasi estimasi parameter model fungsi alih antara gaya tegang tension rol dan rol penggulung terhadap masukan gaya putar pada bagian rol penggulung sistem transportasi web material dengan menggunakan metode RLS, dikarenakan fungsi alih mengandung parameter fisik *plant* yang berubah waktu radius rol penggulung ( $R_3$ ) maka digunakan faktor pembobot data yang dinamakan *forgetting factor* . Proses estimasi parameter diawali dengan menentukan model matematik bagian Rol Penggulung Mesin Metallizing (Finayani, 2014).

Perencanaan proses estimasi parameter model fungsi alih bagian rol penggulung sistem transportasi web material dengan metode RLS berbasis *forgetting factor* menggunakan perangkat lunak MATLAB versi R2009b dijabarkan sebagai berikut:

- Langkah 1: mengubah bentuk model fungsi alih bagian rol penggulung mesin Metallizingdari bentuk kontinu (bidang s) ke bentuk diskrit (bidang z). Perubahan fungsi alih ke bentuk diskrit dengan metode *zero order hold (ZOH)* dan metode TUSTIN dengan menggunakan periode cuplikan ( $T$ ) tertentu ;
- Langkah 2: mengambil data masukan-keluaran dari setiap model fungsi alih bagian rol pengumpan, sinyal masukan digunakan bilangan pseudorandom. Data berupa pasangan masukan-keluaran;
- Langkah 3: melakukan proses estimasi parameter dengan metode RLS berbasis *forgetting factor*;
- Langkah 4: mensimulasikan proses estimasi parameter untuk beberapa nilai *forgetting factor* untuk mendapatkan hasil estimasi parameter yang konvergen.

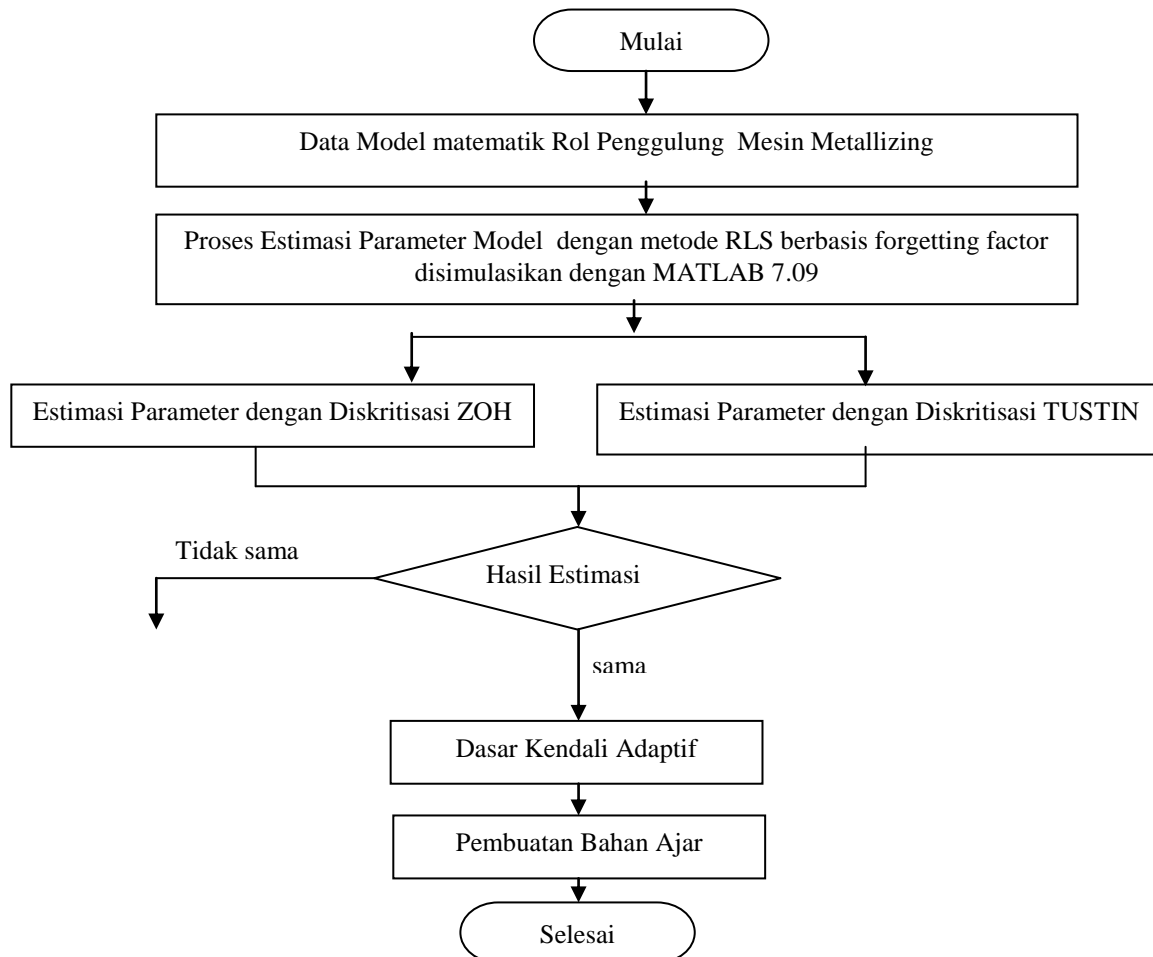
Sedangkan metode RLS berbasis *forgetting factor* untuk simulasi estimasi parameter model dijabarkan sebagai berikut,

- Langkah 1: menentukan jumlah putaran selama proses transportasi web material dan jumlah data (N) setiap satu putaran, parameter-parameter dari *plant* (Pagilla dkk, 2007)
- Langkah 2: melakukan pengalamatan terhadap variabel-variabel yang digunakan yaitu keluaran dan masukan *plant*, inialisasi awal elemen diagonal matrik kovarian (P), inialisasi awal vektor estimasi parameter ( $\theta$ );
- Langkah 3: mengambil nilai vektor regresi  $\Phi$  dari *plant* satu langkah sebelumnya, jika diasumsikan saat sekarang adalah k maka akan dihasilkan nilai vektor  $\Phi$  saat  $k - 1$  yaitu  $\Phi(t - 1)$ ;
- Langkah 4: menentukan nilai *forgetting factor* ( $\lambda$ ) untuk menghitung pembaharuan matrik kovarian P . Penggunaan faktor pembobot data (*forgetting factor*), dikarenakan pada model fungsi alih *plant* mengandung parameter fisik yang berubah terhadap waktu (*time varying*)
- Langkah 5: menghitung pembaharuan matrik kovarian P saat k yaitu  $P(k)$  berdasarkan  $\Phi(k - 1)$  dan  $P(k - 1)$  dengan menggunakan perumusan berbasis *forgetting factor* persamaan  $P_k = \frac{1}{\lambda} \left( P_{k-1} - \frac{P_{k-1} a a^T P_{k-1}}{\lambda + a^T P_{k-1} a} \right)$
- Langkah 6: mengambil nilai vektor parameter yang tidak diketahui  $\hat{\theta}$  diasumsikan sebagai nilai yang dihasilkan pada iterasi sebelumnya  $\theta(k - 1)$ ;
- Langkah 7: menghitung keluaran dari bentuk model hasil estimasi  $\Phi^T(k) \hat{\theta}(k - 1)$ ;
- Langkah 8: menghitung kesalahan saat  $k$  yaitu  $e(k) = y(k) - \Phi^T(k) \hat{\theta}(k - 1)$ ;

- Langkah 9: melakukan pembaharuan nilai vektor yang tidak diketahui  $\hat{\theta}$ , dengan menggunakan nilai vektor parameter sebelumnya  $\theta(k - 1)$ , nilai vektor regresi  $\Phi(k)$ , matrik kovarian  $P(k)$ , eror  $e(k)$ ;
- Langkah 10: mengulangi langkah (5) – (9) sejumlah N data;
- Langkah 11: mengulangi langkah (1) – (10) untuk sampai putaran terakhir serta menghitung nilai *mean square error* (MSE);
- Langkah 12: mengubah nilai *forgetting factor* (1) – (11). Simulasi yang dilakukan perubahan nilai  $\lambda$  di daerah  $\lambda \leq 1$  yaitu pada nilai  $\lambda = 1$ ,  $\lambda = 0,98$ ,  $\lambda = 0,96$ ,

**Metode Penelitian**

Metode penelitian dijelaskan melalui diagram alir berikut ini,



**Hasil dan Pembahasan**

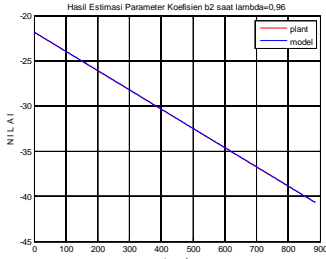
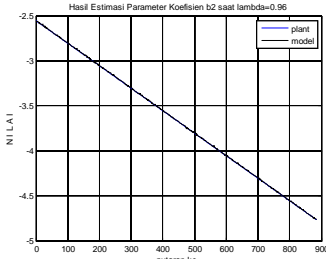
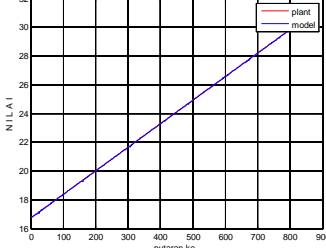
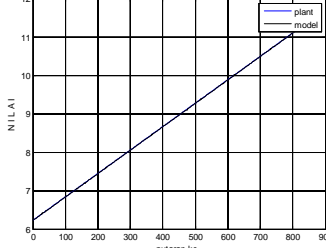
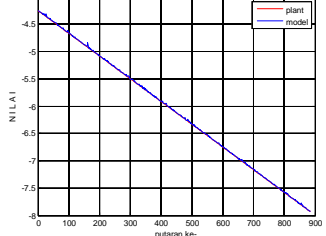
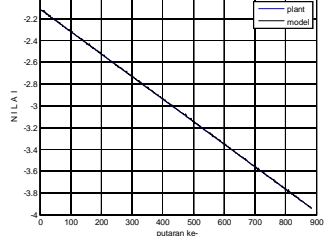
Proses Estimasi Parananter Model Rol Penggulung Mesin Metallizing telah disimulasikan dengan metode RLS berbasis *forgetting factor* ( $\lambda$ ) dengan diskritisasi ZOH dan TUSTIN, akan konvergen dengan koefisien plant saat nilai  $\lambda = 0,96$ . Adapun perbedaan dari kedua metode diskritisasi ZOH dan TUSTIN dijelaskan oleh Tabel 1 di bawah ini,

Tabel 1. Analisis Perbandingan Hasil Simulasi

DISKRITISASI ZOH	DISKRITISASI TUSTIN
<b>BENTUK FUNGSI ALIH HASIL ESTIMASI</b>	
$\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + a_4z^{-4}}$	$\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + a_4z^{-4}}$
Koefisien Fungsi Alih hasil estimasi parameter berjumlah 8 keofisien.	Koefisien Fungsi Alih hasil estimasi parameter berjumlah 9 keofisien.

<b>NILAI MEAN SQUARE ERROR (MSE)</b>	
<p>Nilai MSE proses estimasi parameter <b>diskritisasi ZOH</b> dengan nilai <math>1,219 \times 10^{-4}</math> menghasil nilai hasil parameter yang konvergen pada nilai <b>lamda <math>\lambda = 0.96</math></b></p>	<p>Nilai MSE proses estimasi parameter <b>diskritisasi TUSTIN</b> dengan nilai <math>4,666 \times 10^{-5}</math> menghasil nilai hasil parameter yang konvergen pada nilai <b>lamda <math>\lambda = 0.96</math></b>. Nilai</p>
<p><b>Nilai MSE diskritisasi ZOH lebih besar dibandingkan diskritisasi TUSTIN dengan nilai lamda yang sama <math>\lambda = 0.96</math>, perbedaan nilai MSE sebesar 61,7 %</b></p>	
<b>HASIL ESTIMASI KOEFISIEN FUNGSI ALIH TIDAK BERUBAH WAKTU</b>	
<b>KOEFISIEN <math>a_1</math></b>	<b>KOEFISIEN <math>a_1</math></b>
<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_1</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant - 3.202 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -3.2025 dan nilai maksimalnya -3.1968. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,16%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_1</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant - 3.196 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas dan di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -3.1982 dan nilai maksimalnya -3.1939. Dari data tersebut diperoleh nilai penyimpangan maksimal 0,07%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>a_1</math> diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0,09%</p>	
<b>KOEFISIEN <math>a_2</math></b>	<b>KOEFISIEN <math>a_2</math></b>
<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_2</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant 3.827 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar 3.8111 dan nilai maksimalnya 3.8294. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,42%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_2</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant 3.813 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas dan di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar 3.8065 dan nilai maksimalnya - 3.8192. Dari data tersebut diperoleh nilai penyimpangan maksimal 0,17%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>a_2</math> diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0,25%</p>	

<b>KOEFISIEN <math>a_3</math></b>	
<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_3</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant - 2.023 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -2.0260 dan nilai maksimalnya -2.0057. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,86%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_3</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant - 2.012 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas dan di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -2.0179 dan nilai maksimalnya -2.0053. Dari data tersebut diperoleh nilai penyimpangan maksimal 0,33%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>a_3</math> diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0,53%</p>	
<b>KOEFISIEN <math>a_4</math></b>	
<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_4</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant 0.3991 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar 0.3924 dan nilai maksimalnya 0.4001. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 1,68%.</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>a_4</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant 0.3960 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di atas dan di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar 0.3937 dan nilai maksimalnya 0.3981. Dari data tersebut diperoleh nilai penyimpangan maksimal 0,58 %</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>a_4</math> diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 1,1%</p>	
<p><b>Hasil koefisien estimasi parameter model Rol Penggulung Mesin Metallizing untuk koefisien yang tidak berubah waktu, menghasilkan nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibanding dengan diskritisasi ZOH dengan nilai penyimpangan rata-rata sebesar 0,47%.</b></p>	
<b>HASIL ESTIMASI KOEFISIEN FUNGSI ALIH BERUBAH WAKTU</b>	
<b>KOEFISIEN <math>b_1</math></b>	
<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_1</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant berubah waktu antara 9.4123 - 17.5418 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah dengan nilai minimum hasil estimasi sebesar 9.4123 dan nilai maksimalnya 17.5365. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0.03%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_1</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant berubah waktu antara (-11.5298) - (-6.1884) sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -11.5298 dan nilai maksimalnya -6.1881. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,0048%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>b_1</math> yang merupakan koefisien berubah waktu diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0.025%.</p>	

<p style="text-align: center;"><b>KOEFISIEN <math>b_2</math></b></p>	<p style="text-align: center;"><b>KOEFISIEN <math>b_2</math></b></p>
	
<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_2</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant berubah waktu antara (-40.6719) – (-21.8232) sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah dengan nilai minimum hasil estimasi sebesar -40.6505 dan nilai maksimalnya -21.8231 . Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0.053%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_2</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant berubah waktu antara (-4.7633) – (-2.5558) sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -4.7623 dan nilai maksimalnya -2.5555. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,021%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>b_2</math> yang merupakan koefisien berubah waktu diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0,032%</p>	
<p style="text-align: center;"><b>KOEFISIEN <math>b_3</math></b></p>	<p style="text-align: center;"><b>KOEFISIEN <math>b_3</math></b></p>
	
<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_3</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant berubah waktu antara 16.7488 - 31.2148 sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah dengann ilai minimum hasil estimasi sebesar 16.7488 dan nilai maksimalnya 31.1954. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0.062%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_3</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant berubah waktu antara 6.2310 - 11.6127sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar 6.2313 dan nilai maksimalnya 11.6095. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,028%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>b_3</math> yang merupakan koefisien berubah waktu diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0,034%</p>	
<p style="text-align: center;"><b>KOEFISIEN <math>b_4</math></b></p>	<p style="text-align: center;"><b>KOEFISIEN <math>b_4</math></b></p>
	
<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_4</math> untuk diskritisasi ZOH, nilai koefisien plant berubah waktu antara (-7.9279) – (-4.2539) sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah dengan nilai minimum hasil estimasi sebesar -7.9231 dan nilai maksimalnya -4.2538. Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0.061%</p>	<p>Koefisien hasil estimasi <math>b_3</math> untuk diskritisasi TUSTIN, nilai koefisien plant berubah waktu antara(-3.9383) – (-2.1132) sedangkan hasil estimasi dari 884 putaran terlihat dari grafik nilainya berubah-ubah di bawah nilai koefisien plant. Nilai minimum hasil estimasi sebesar -3.9364 dan nilai maksimalnya -2.1135 Dari data tersebut nilai penyimpangan maksimal 0,048%</p>
<p>Hasil estimasi untuk koefisien <math>b_4</math> yang merupakan koefisien berubah waktu diperoleh nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibandingkan dengan diskritisasi ZOH dengan selisih 0.013</p>	
<p>Hasil koefisien estimasi parameter model Rol Penggulung Mesin Metallizing untuk koefisien yang berubah waktu, menghasilkan nilai penyimpangan hasil estimasi untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibanding dengan diskritisasi ZOH dengan nilai penyimpangan rata-rata sebesar 0,026%</p>	

## Kesimpulan

Kesimpulan penelitian ini adalah:

1. Konvergensi hasil estimasi parameter baik metode ZOH maupun TUSTIN tidak akan konvergen saat *forgetting factor* ( $\lambda$ ) = 1
2. Estimasi parameter model fungsi alih bagian rol penggulung mesin metalizing dengan metode diskritisasi ZOH konvergen dengan nilai  $\lambda = 0,96$  dengan MSE sebesar  $1,219 \times 10^{-4}$  pada periode cuplikan 0,5 detik, sedangkan dengan diskritisasi TUSTIN dengan  $\lambda=0.96$  diperoleh MSE sebesar  $4,666 \times 10^{-5}$
3. Konvergensi hasil estimasi parameter fungsi alih bagian rol penggulung mesin Metallizing dengan  $\lambda = 0,96$  dengan metode diskritisasi TUSTIN diperoleh nilai MSE yang lebih kecil dibandingkan metode diskritisasi ZOH perbedaan nilai MSE sebesar 61,7 %. Nilai  $\lambda$  diperkecil lagi  $\lambda < 0,96$  hal ini akan berakibat rentang terhadap gangguan (*noise*).
4. Hasil estimasi koefisien parameter model Rol Penggulung Mesin Metallizing untuk koefisien yang tidak berubah waktu, menghasilkan nilai penyimpangan rata-rata 0,47% untuk diskritisasi TUSTIN lebih kecil dibanding dengan diskritisasi ZOH, sedangkan koefisien yang berubah waktu sebesar 0,026%.

## Daftar Pustaka

- Ashry, M., Abou-Zayed, U., Breikin, Tim., (2005), "Design and Implementation of a Time Varying Local Optimal Controller Based on RLS Algorithm for Multivariable System", *Control Systems Centre, The University of Manchester, PO BOX 88, M60 IQD UK.*
- Bastogne, T., Thomassin, M., Masse, T., (2007). "Selection and Identification of Physical Parameter from Passive Observation. Application to a Winding Process", *Control Engineering Practice* 15, 9(2007) 1051-1081.
- Bernardo d.M., Gaeta d.A., Montanaro.U., Olm.M.J., Santini.S., (2013). "Experimental Validation of The Discrete-Time MCS Adaptive Strategy", *Control Engineering Practice*: 21(2013) 847-859.
- Finayani. Y, Alhan M., Salechan., Suharyanto, Firmansyah. E., (2012). "Studi Pengendalian Motor Listrik di Industri sebagai Upaya Peningkatan Kualitas Materi dan Strategi Pembelajaran", Penelitian Hibah Pekerti Tahun 2012 – 2013, Teknik Elektro Politeknik Pratama Mulia Surakarta.
- Finayani, Y. Sudarno, Alhan M, (2014). "Pemodelan Matematik Rol Penggulung Pada Industri Metallizing", *Prosiding Teknik Elektro, Simposium RAPI XIII 2014*, ISSN 1412-9612, E33-EE40.
- Gopal, M., (2003), "*Control Systems Principles And Design, Second Edition*", McGraw-Hill Education (Asia).
- Koc H., Knittel D., Mathelin de M., Abba. G., (2002) "Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs", *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol 10, No 2, March 2002.
- Kuo, B.C, (1995), "*Automatic Control Systems*", Seventh Edition, ISBN 0-13-304759-8, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.
- Ogata, K., Leksono, E., (1995), "*Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan) Jilid 1*", Erlangga, Jakarta.
- Pagilla R. P, Siraskar. B.N, Dwivedula.V.R., (2007), "Decentralized Control of Web Processing Lines", *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol.15 No.1, January 2007.
- Petras I., (2009), "Fractional Order Feedback Control of A DC Motor", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 60, No.3, 2009, 117-128.
- Phillips, C., Harbor, R.D., Widodo, R.J., (1996), "*Sistem Kontrol Dasar-Dasar*",
- R. Prabhakar., Pagilla, Dwivedula.V.R., Siraskar. B. N., 2007, "A decentralized Model Reference Adaptive Controller for Large-Scale Systems", *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 12, No. 2 April 2007.