

# Pemodelan Sistem Motor *DC-Shunt* Menggunakan Pendekatan Model *Hammerstein* Dengan Estimasi Parameter Metoda *Least Square*

Ade Elbani

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik,  
Universitas Tanjungpura Pontianak  
e-mail : adeelbani@yahoo.com

**Abstract**– Keberadaan sistem yang ada merupakan keterpaduan unsur-unsur linier dan nonlinier. Sistem *Mechatronics* (*Mechanic* dan *elektronik*), dalam hal ini digunakan motor *dc-shunt*, terdapat berbagai macam ketidaklinieran, misalnya *friction* (*gesekan*) pada sistem mekanik dan *tourque saturation* (*kejenuhan*) pada sistem elektronik. Pemodelan dengan penurunan matematis sangat sulit dilakukan, kesemua ini dilakukan dengan banyak sekali pengabaian, perhitungan dilakukan selalu berkisar pada daerah yang linier, oleh sebab itu hasil dari model yang diturunkan berdasarkan penurunan matematis, masih kurang begitu efektif guna implemetasi langsung di lapangan. Pada penelitian ini akan dilakukan pemodelan sistem dengan menggunakan metoda identifikasi, metoda ini dilakukan atas dasar sinyal masukan (*input*) dan keluaran (*output*) dari sistem yang akan dimodelkan, dengan demikian model yang didapat akan sangat mendakati pada keadaan yang sebenarnya. Struktur model yan digunakan adalah Model *Hammerstein*, yang mana pada model ini akan terpisah blok linier dan blok non-linier. Model yang didapat dari hasil identifikasi, akan merepresentasikan sistem yang sebenarnya, yaitu termasuk unsur-unsur linier dan nonlinier, sehingga dengan model tersebut bisa digunakan untuk keperluan analisis maupun perancangan sistem kontrol secara *off-line* atau simulasi, dengan demikian jika ingin melakukan proses analisis, maka sistem tidak harus dimatikan (*trip*).

**Kata kunci**– Blok Linier, blok nonlinier, *saturation*, *Hammestein*, metoda identifikasi.

## 1. Pendahuluan

Sistem-sistem yang ada di alam ini merupakan kombinasi unsur-unsur linier dan nonlinier. Penurunan model secara matematis atau penurunan fisis seringkali berkisar pada daerah linier. Adakalanya perhitungan ketidaklinieran sistem dilakukan, namun ini hanya terbatas pada elemen tertentu saja, sedangkan sistem merupakan keterpaduan dari beberapa elemen yang masih banyak belum diketahui ketidaklinierannya. Metoda lain untuk melakukan pemodelan adalah metoda identifikasi. Metoda ini akan memodelkan sistem secara keseluruhan, baik elemen linier maupun nonlinier. Perinsip kerjanya adalah menentukan model suatu sistem, serta parameter-parameternya dengan pendekatan struktur model tertentu atas dasar sinyal masukan keluaran dari sistem yang akan diidentifikasi.

Pada sistem identifikasi terdapat banyak pendekatan model yang bisa digunakan. Penelitian ini akan

menggunakan pendekatan model nonlinier yaitu model *Hammerstein*. Model ini memiliki elemen linier dan nonlinier yang terpisah dalam bentuk blok model, kemudian gabungan kedua blok ini akan menjadi satu model nonlinier. Selanjutnya untuk mengestimasi parameter-parameter sistem akan digunakan metoda *least square*. Pada penelitian ini, akan dilakukan identifikasi sistem nonlinier *mechatronic*, yang mana sebagai obyeknya adalah motor listrik.

### 1.1 Metoda Penelitian

Penelitian ini akan memodelkan salah satu jenis motor listrik yang merupakan *actuator* (alat penggerak). Sumber energi berupa daya listrik, merupakan salah satu sinyal masukan bagi motor agar bisa berputar. Kemudian dengan diberikannya daya tersebut, maka motor akan berputar. Kecepatan motor merupakan indikasi sinyal keluaran atau hasil dari masukan daya listrik yang diberikan.

Kedua sinyal masukan yang berupa tegangan listrik dan sinyal keluaran yang berupa kecepatan putar ini, merupakan pasangan data input dan output untuk melakukan proses identifikasi, guna mendapatkan model sistem.

Pada penelitian ini ada beberapa prosedur yang akan dilakukan untuk identifikasi sistem, yaitu :

1. Pengambilan pasangan data (*input* dan *output*) sistem
2. Menentukan struktur model yang akan digunakan
3. Melakukan estimasi parameter, yaitu menggunakan algoritma *least square*
4. Melakukan validasi sistem
5. Didapat model sistem.

### 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, adalah :

- Melakukan identifikasi dan pemodelan sistem *mechatronic*, dengan Mendapatkan struktur model sistem *mechatronic*, dalam hal ini obyek akan digunakan adalah motor listrik.
- Mendapatkan parameter-parameter model yang bersesuaian, menggunakan algoritma *least square* untuk melakukan estimasi parameter.
- Pengembangan teknik identifikasi sistem nonlinier dengan pendekatan model *Hammerstein*.
- Melakukan proses validasi model hasil identifikasi.

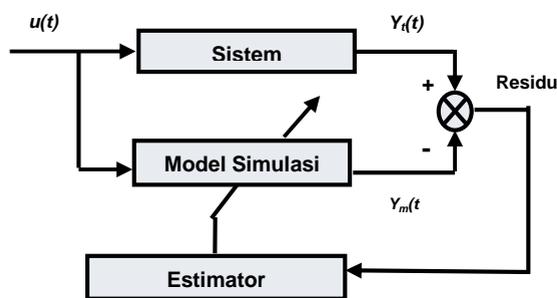
### 1.3 Kontribusi Penelitian

Model yang didapat dari hasil identifikasi, akan merepresentasikan sistem yang sebenarnya, yaitu termasuk unsur-unsur linier dan nonlinier, sehingga

dengan model tersebut bisa digunakan untuk keperluan analisis maupun perancangan sistem kontrol secara *off-line* atau simulasi, dengan demikian jika ingin melakukan proses analisis, maka sistem tidak harus dimatikan (*trip*). Disamping itu, dapat juga digunakan sebagai bahan asistensi kuliah, khususnya pada mata kuliah pemodelan dan simulasi, dan umumnya pada mata kuliah-mata kuliah yang ada pada konsentrasi Teknik Pengaturan maupun pada jurusan teknik elektro, yang mana akan menambah wawasan keilmuan bagi mahasiswa.

## 2. Sistem Identifikasi

Sistem identifikasi adalah merupakan metoda pemodelan yang berdasarkan pada data masukan dan keluaran sistem dinamis secara nyata, dimana dengan mengetahui data masukan dan keluarannya, akan diperoleh suatu model yang dapat merepresentasikan sistem tersebut. Namun demikian hasil yang dicapai tidaklah merupakan sesuatu yang dikatakan *benar* ataupun *salah* (secara kuantitatif), akan tetapi pernyataan yang lebih tepat adalah *baik* atau *tidak baik* (secara kualitatif). Untuk dapat mengatakan baik dan tidak baik, maka diperlukan kriteria tertentu yang merupakan landasannya. Proses indentifikasi parametric secara umum diperlihatkan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1. Proses Identifikasi Estimasi Parameter

### 2.1 Prosedur Identifikasi [Landau]

Penurunan model matematis dengan menggunakan identifikasi dilakukan dengan cara menganalisa data masukan dan keluaran sistem dengan beberapa prosedur. Langkah-langkah atau prosedur identifikasi yang dilakukan adalah sebagai berikut.

- Melakukan pengujian dan mengambil data masukan serta data keluaran dari sistem dengan eksperiment, dalam hal ini data yang diambil harus dapat memberikan informasi yang cukup tentang perilaku sistem.
- Memilih dan menentukan struktur model yang merupakan suatu set deskripsi kandidat sistem dimana model akan diperoleh; Kandidat model (himpunan model) diperoleh dengan menetapkan kumpulan model yang menjadi tempat untuk memilih model yang sesuai. Pada langkah ini sangat penting, dan merupakan langkah yang sulit, karena dibutuhkan pengetahuan apriori, intuisi rekayasa, serta wawasan dan sifat umum dari model.
- Menentukan model terbaik dari kandidat model yang telah ditentukan pada prosedur diatas; Pada langkah

ini dilakukan estimasi parameternya dengan algoritma identifikasi berdasarkan data masukan dan keluaran yang telah diperoleh.

- Melakukan validasi terhadap model terbaik yang digunakan, pada langkah ini dilakukan pengujian terhadap kualitas model dengan mengamati performansi model tersebut. Jika model yang dipilih telah memuaskan, maka proses identifikasi dihentikan, namun sebaliknya jika masih belum memuaskan maka diulangi lagi prosedur ketiga diatas.

Dalam penelitian ini akan dilakukan dengan teknik parametrik, guna memperoleh parameter dari model secara langsung.

### 2.2 Pemilihan Struktur Model [Rolf, Johanson]

Untuk memperoleh hasil identifikasi yang baik, sangat dipengaruhi oleh pemilihan struktur model. Oleh sebab itu pemilihan struktur model sangat didasari pada pengetahuan tentang sistem yang akan diidentifikasi dan pengertian tentang prosedur identifikasi. Jadi pemilihan ini tergantung pada pengalaman (*apriori*) terhadap sistem yang akan dimodelkan atau diidentifikasi.

### 2.3 Sistem Validasi

Untuk menentukan seberapa baiknya suatu sistem yang dihasilkan dari suatu proses identifikasi, maka dilakukan proses validasi terhadap data keluaran dari data masukan. Pada sistem identifikasi, ada beberapa metoda validasi yang bisa digunakan, misalnya *Final Prediction Error (PFE)*, *Loss Fuction*, *Akaike Information Criteria (AIC)*, *Resdual Test*, dan sebagainya.

## 3. Model Hammerstein [R. Haber]

Persamaan (1) adalah model Hammerstein yang menggunakan formulasi seri antara komponen linier dan komponen nonlinier. Pada bagian nonlinier, terdiri dari karakteristik parabolik, dengan persamaan.

$$v(k) = c_0 + c_1 u(k) + c_2 u^2(k) \quad (1)$$

Sedangkan bagian linier persamaannya adalah.

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} q^{-d} v(k) \quad (2)$$

dengan,

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad \text{dan} \\ A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (3)$$

Model tersebut dapat ditulis kembali dengan menggabungkan kedua persamaan linier dan nonlinier seperti pada blok diatas, yaitu.

$$y(k) = c_0 \frac{B(1)}{A(1)} q^{-d} + c_1 \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} q^{-d} u(k) + c_2 \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} q^{-d} u^2(k) \quad (4)$$

Karena model Hammerstein adalah bersifat parameter linier (*linier-in-parameter*), yakni polinomial ( $A(q^{-1})$ ) adalah sama, maka persamaan akan menjadi

$$A(q^{-1})y(k) = c_0 B(1)q^{-d} + c_1 B(q^{-1})q^{-d} u(k) + c_2 B(q^{-1})q^{-d} u^2(k) \quad (5)$$

Dengan mengetahui persamaan parameter elemen nonlinier<sup>[1]</sup>,  $c_0 = \frac{C_{ss}}{1 + \sum_{i=1}^{na} a_i}$  ;  $c_j = \frac{\sum_{i=1}^{nb} b_{ji}}{1 + \sum_{i=1}^{na} a_i}$  (6)

dimana  $j=1, 2, \dots, p$  serta mensubstitusi persamaan tersebut dengan persamaan 4, maka didapat persamaan diskrit model Hammerstein sebagai berikut

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_{na} y(k-na) + b_{11} u(k-d-1) + \dots + b_{1nb} u(k-d-nb) + b_{21} u^2(k-d-1) + \dots + b_{pnb} u^p(k-d-nb) + C_{ss} \quad (7)$$

kemudian *vector* keluaran dan masukan akan menjadi

$$\phi^T(k) = \begin{bmatrix} -y(k-1) \dots - y(k-na) & u(k-d-1) \dots u(k-d-nb) \\ u^2(k-d-1) \dots u^p(k-d-nb) & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

*vektor parameter* model Hammerstein

$$\Theta(k) = [a_1 \dots a_{na} \quad b_{11} \dots b_{1nb} \quad b_{p1} \dots b_{pnb} \quad C_{ss}] \quad (9)$$

$C_{ss}$  : Komponen parameter yang ikut diestimasi.  
 $d$  : Time delay

Dengan demikian maka regresi liniernya dapat ditulis

$$y(k) = \phi^T(k-1)\Theta(k) + e(k) \quad (10)$$

#### 4. Sistem Motor DC Shunt.

Motor listrik adalah merupakan alat penggerak yang bersumber dengan daya listrik. Untuk proses-proses industri, *mechatronic*, *crane*, dan sebagainya, penggunaan motor listrik merupakan instrumentasi yang sangat tepat. Terdapat banyak jenis motor listrik, ada motor sinkron, motor stepper, dan sebagainya, dimana kesemua ini memiliki dasar kerja yang berbeda, guna penyesuaian kebutuhan.

##### 4.1 Pemodelan Sistem

Pada penelitian ini akan menyatakan satu model motor DC Shunt, yaitu motor sebagai kotak hitam (*black box*). Model tersebut diasumsikan mempunyai keluaran dan masukan tunggal dan memiliki komponen atau karakteristik nonlinier, yang mana hal tersebut dapat disebabkan antara lain oleh :

1. Sifat nonlinier yang memang dimiliki oleh system tersebut.
2. Pengaruh umur (*reliability*) dari sistem
3. Beban yang melebihi kapasitas (*over load*)
4. Pengaruh distorsi sinyal masukan.

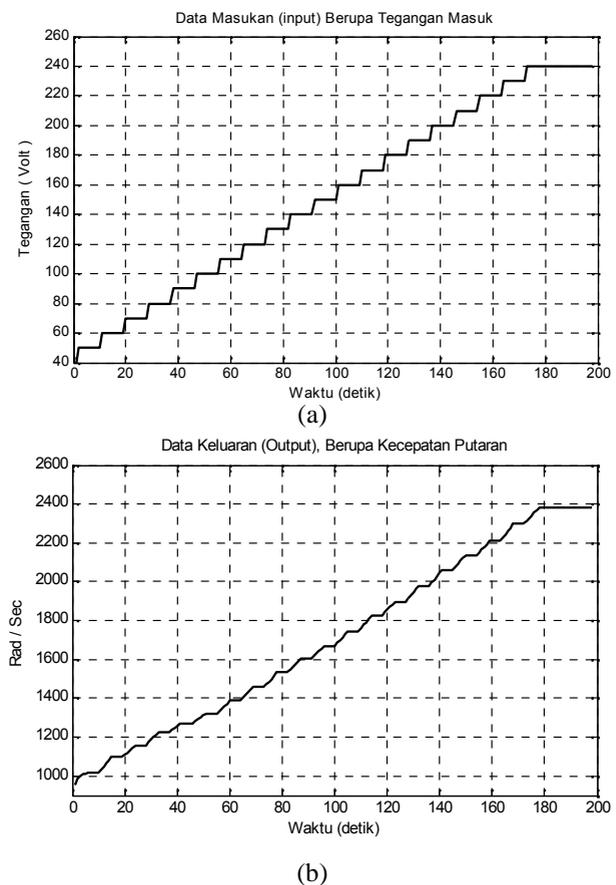
Untuk keperluan proses identifikasi, dalam pemilihan struktur model akan didekati terlebih dahulu dengan pemodelan secara matematis (penurunan hukum fisika) untuk elemen liniernya, kemudian untuk elemen nonliniernya akan dilakukan dengan memvariasi nilai  $p$  yang terdapat pada blok nonlinier berupa karakteristik parabolik. Keseluruhan sistem tersebut akan digunakan model Hammerstein, yaitu gabungan unsur linier dan nonlinier.

#### 4.2 Pengambilan Data

Pengambilan data masukan-keluaran (input/output) untuk keperluan identifikasi, dilakukan dengan system (plant) yang digunakan adalah motor DC Shunt, yang ada mana spesifikasinya adalah sebagai berikut.

Sebagai data input adalah tegangan masuk pada motor, sedangkan data keluaran adalah putaran motor, yang merupakan respon dari sinyal masukan (tegangan).

Data input dilakukan dengan memvariasi tegangan masuk, dengan kenaikan setiap 10 volt, dengan periode waktu yang konstan. Respon berupa kecepatan putar dari motor dalam dimensi radial/detik yang juga berubah terhadap masukan (input). Adapun data hasil pengukuran pasangan data input/output, diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 2. Pasangan Data Hasil Pengukuran Motor DC Shunt.  
(a) Data Input (b) Data Output

#### 5. Identifikasi Sistem Motor DC Shunt

Identifikasi motor DC Shunt, dengan pasangan data input dan output, dilakukan dengan memvariasi jumlah parameter, atau memvariasi orde sistem, serta juga memvariasi  $p$  (faktor nonlinier) dan faktor  $d$  (*delay*).

Dengan merubah atau mengkombinasi parameter-parameter tersebut, akan di dapat harga yang paling optimal, yang diindikasikan oleh analisa grafik (gambar), serta analisa statistik. Kesemua analisa tersebut akan diperlihatkan pada gambar maupun tabel di bawah ini.

Tabel 1 Parameter Orde Model

Par Mod	Par Mod-1	Par Mod-2	Par Mod-3	Par Mod-4	Par Mod-5	Par Mod-6
P	0	0	0	0	0	0
d	0	0	0	0	0	0
n <sub>a</sub>	1	2	2	3	3	3
n <sub>b</sub>	1	1	2	2	3	3

Hasil estimasi validasi dari beberapa parameter orde model sistem yang tertulis pada tabel diatas, diperlihatkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil validasi sistem motor dc shunt

Vali-dasi	Hasil Mod-1	Hasil Mod-2	Hasil Mod-3	Hasil Mod-4	Hasil Mode-5	Hasil Mode-6
ee	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ue	-2.6693	-0.2850	-0.2092	-0.2850	-0.2092	-0.2092
Loss Funtion	10.10 <sup>-5</sup>	19.10 <sup>-5</sup>	28.10 <sup>-5</sup>	18.10 <sup>-5</sup>	29.10 <sup>-5</sup>	29.10 <sup>-5</sup>
Variance	11.10 <sup>-5</sup>	21.10 <sup>-5</sup>	31.10 <sup>-5</sup>	22.10 <sup>-5</sup>	32.10 <sup>-5</sup>	33.10 <sup>-5</sup>

Dengan metoda yang sama, dengan merubah atau mengkombinasi parameter-parameter tersebut, akan di dapat harga yang paling optimal, yang diindikasi oleh analisa grafik (gambar), serta analisa statistik. Dari metoda di atas, akan dirubah *delay (d)* sistem, kemudian dengan m engkombinasi orde sistem seperti terlihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Parameter Orde Model

Par Model	Par Hasil Identifikasi				
P	0	0	0	0	0
d	1	1	1	1	1
n <sub>a</sub>	1	2	3	3	3
n <sub>b</sub>	1	1	1	2	3

Hasil estimasi validasi dari beberapa parameter orde model sistem yang tertulis pada tabel diatas, diperlihatkan pada tabel berikut.

Tabel 4. Hasil validasi sistem motor dc shunt

Vali-dasi	Hasil Model 7	Hasil Model 8	Hasil Model 9	Hasil Model 10	Hasil Model 11	Hasil Model 12
ee	0.0000	<b>0.0000</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ue	-1.3666	<b>-0.1453</b>	-0.0255	-0.1453	-0.0255	-0.0255
Loss Funtion	0.0000	<b>0.0000</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Variance	0.0000	<b>0.0000</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5.1 Validasi Statistik Sistem.

Dari keseluruhan percobaan, terlihat dari analisa statistik, bahwa yang paling optimal adalah **model-8**. Hal ini disebabkan semua indikasi analisa statistik menunjukkan bahwa nilai-nilai *ee*, *ue*, Loss Funtion dan Variance (nilai statistik) adalah yang terkeil. Adapun nilai parameter-parameter hasil indentifikasi yang telah di dapat dari proses indentifikasi pada sistem motor DC Shunt diperlihatkan pada tabel berikut.

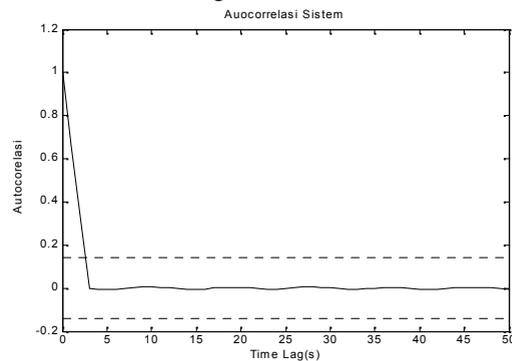
Tabel 5. Parameter model motor DC Shunt

Parameter	Nilai
<i>p</i> (nonlinieritas)	0
<i>d</i> (delay)	1
a <sub>1</sub>	-1.5668
a <sub>2</sub>	0.5674
b <sub>1</sub>	4.0538

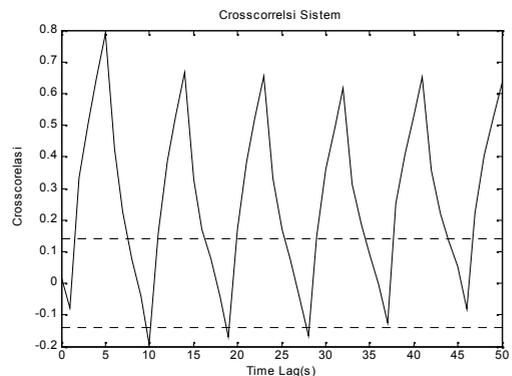
5.2 Analisa Grafik.

Secara grafik, simulasi sistem menunjukkan indikasi yang nyata, yaitu simulasi sinyal masukan dan sinyal keluaran (diperlihatkan pada grafik gabungan sinyal masukan dan keluaran), serta beberapa indikasi grafik lainnya. Hasil simulasi dalam bentuk grafik diperlihatkan pada gambar-gambar dibawah ini.

Untuk gambar 3, terlihat bahwa eksitasi sinyal masuk dalam koridor kotak, hal ini mengindikasi bahwa identifikasi sistem berjalan dengan baik, dan kandidat model masuk pada nominasi pemilihan, begitu juga grafik *Crosscorelasi* gambar 4.

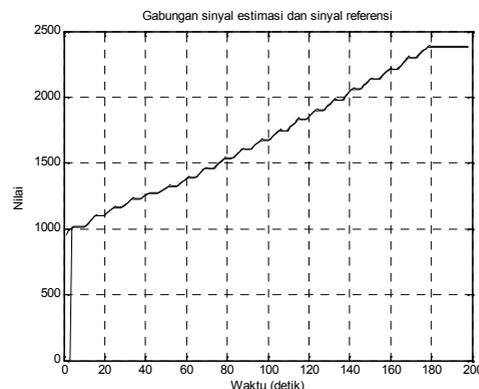


Gambar 3 Autocorrelelasi sistem

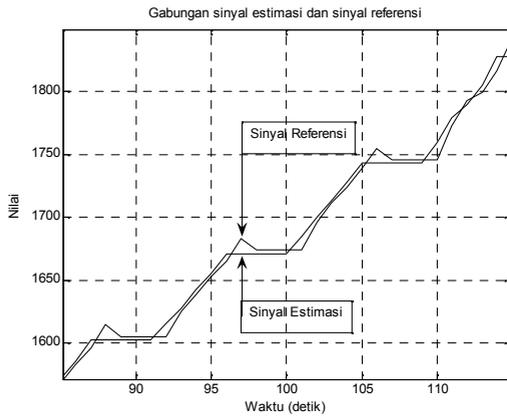


Gambar 4. Crosscorelasi sistem

Pada gambar 5 adalah grafik perbedaan sinyal keluaran estimasi dan referensi. Pada plotting grafik terdapat dua sinyal, yaitu sinyal estimasi dan referensi. Perbedaan sinyal estimasi dan referensi pada grafik gambar 5 tidak begitu jelas, agar lebih jelas untuk keperluan analisis grafik, maka gambar tersebut diperbesar seperti diperlihatkan pada gambar 6.



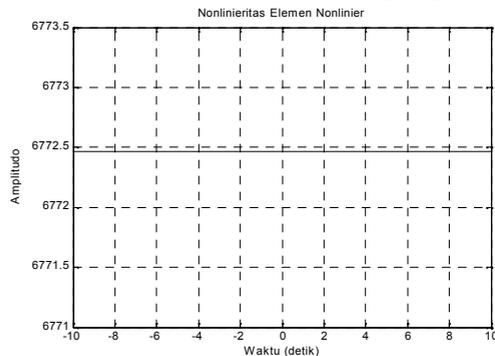
Gambar 5. Gabungan Sinyal Estimasi dan Referensi



Gambar 6. Gabungan Sinyal Estimasi dan Referensi.

Terlihat pada grafik, gambar 6 bahwa antara sinyal referensi dan estimasi terdapat perbedaan (*error*), namun terlihat skala perbedaan sangat kecil.

Pada gambar 7, yaitu grafik nonlinieritas sistem, yang diindikasikan oleh plotting garis pada grafik tersebut. Plotting garis yang terdapat pada gambar terlihat lurus, ini berarti sistem adalah linier, dimana untuk justifikasi parameter model terhadap faktor nonlinieritas dimasukkan harga nol ( $p=0$ ). Dimasukkan harga nol pada sistem berarti struktur model sistem adalah linier, yang mana setelah melakukan validasi sistem, ternyata sudah memenuhi kriteria (statistik maupun grafis).



Gambar 7 Grafik *non-linieritas* Sistem

**6. Kesimpulan**

Dari beberapa percobaan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Sistem yang diidentifikasi adalah motor DC Shunt, dan sistem adalah linier.
2. Parameter model optimal yang diperoleh adalah :

Parameter	
$p$ ( <i>nonlinieritas</i> )	0
$d$ ( <i>delay</i> )	1
$a_1$	-1.5668
$a_2$	0.5674
$b_1$	4.0538

3. Struktur dan Orde model optimal yang didapat adalah Model orde 2 (dua), type 1 (satu).

**Daftar Pustaka**

- [ 1 ] Joos, G, October 1990, *MRA PWM Technique*, IEEE Transc. on Power elektronik, Vol. 4.
- [ 2 ] Landau, ID, 1990, "*System indentification and Control design*", Printice Hall Inc, Englewood Cliffs.
- [ 3 ] Ljung, Lennart, 1987, "*System Identification: Theory for the User*", Printice Hall Inc, Englewood Cliffs.
- [ 4 ] R. Haber and L. Kevieczky, 1999, *Nonlinier System Identification Inpput-Output Modeling Approach*, volume 1: Nonlinier System Parameter Identification.
- [ 5 ] R. Haber and L. Kevieczky, 1999, "*Nonlinier System Identification Inpput-Output Modeling Approach*", volume 2: Nonlinier System Parameter Identification
- [ 6 ] Rolf, Johansson, 1993, *Sistem Modelling and Identification*, Printice Hall Inc, Englewood Cliffs.
- [ 7 ] R. Haber, H. Unbehauen, 1990, *Structure Identification of nonlinier Dynamic System – A Survey on Input/output Approaches*, Automatica, Vol. 26, No. 4, pp.651-677.
- [ 8 ] Suk Lee, J, august 1997, *Stator flux oriented sensorless IM Drive for Optimum Low Speed Performance*. IEEE Transc. on Ind. App. Vol 34.

**Biography**

**Ade Elbani**, lahir di Sanggau pada tanggal 22 Mei 1963. Menyelesaikan program Strata I (S1) di Universitas Gadjah Mada (UGM), Fakultas MIPA, Jurusan Fisika, Prodi Elektronika dan Instrumentasi (ELINS) pada tahun 1992 dan program Strata II (S2) di Institut Teknologi Bandung (ITB), Magister Teknik, Program Instrumentasi dan Kendali (PINK), Fakultas Teknologi Industri, selesai pada tahun 2003. Sejak tahun 1995 sampai sekarang mengajar di Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Tanjungpura Pontianak. Penelitian yang diminati saat ini adalah : Pemodelan Sistem dan Kendali.