

# Estimasi Parameter Motor 3 FASA Berbasis *Extended Kalman Filter* Pada Laboratorium Sistem Kendali Digital

Muhammad Muwafiqur Romdlon, Achmad Komarudin, Tarmukan

**Abstrak** — Motor 3 fasa merupakan motor induksi yang banyak digunakan pada proses produksi otomatisasi industri, dikarenakan konstruksi kuat dan ketahanan tinggi dimana kecepatan dan torsi dapat dikendalikan menggunakan inverter. Dengan menggunakan algoritma extended kalman filter, nilai kecepatan dan torsi dapat diperkirakan sehingga dapat meniadakan adanya hubungan sensor secara mekanis. Keakuratan estimasi parameter tergantung terhadap pemodelan motor induksi. Penelitian dilakukan dengan menggunakan software matlab-simulink. Dengan memberikan beberapa variasi kecepatan motor pada 600 rpm, 900 rpm, 1173 rpm dan 1476 rpm. Hasil estimasi algoritma extended kalman filter menunjukkan hasil yang baik, namun mempunyai nilai *rise time* yang cukup lama dengan rata-rata 18.9 s. Hal tersebut disebabkan proses komunikasi mikrokontroler ke matlab-simulink yang lambat.

**Kata Kunci** : Motor 3 fasa, *extended kalman filter*, torsi, kecepatan, matlab-simulink, mikrokontroler.

## I. PENDAHULUAN

Motor induksi terutama motor 3 fasa pada industri salah satunya digunakan sebagai penggerak conveyor. Motor 3 fasa mempunyai kelebihan mudah dalam perawatan, ketahanan tinggi, mudah dalam melakukan pengontrolan. Pada laboratorium sistem kendali digital Politeknik Negeri Malang, modul praktikum pengendalian motor 3 fasa menggunakan sensor encoder yang terhubung pada as rotor untuk menghitung kecepatan motor. Seiring perkembangan teknologi, pengambilan parameter guna melakukan pengendalian motor 3 fasa dapat dilakukan secara sensorless berbasis algoritma *Extended kalman filter*. Selain dapat menghitung kecepatan motor, algoritma *Extended kalman filter* dapat menghitung torsi dan flux magnet pada rotor.

Algoritma *Extended kalman filter* berfungsi sebagai penghitung nilai parameter motor 3 fasa berdasarkan masukan data dari sensor tegangan dan arus yang dikirim oleh mikrokontroler melalui USB. Masukan data dari sensor diproses oleh fungsi *Extended kalman filter* yang terdapat pada matlab-simulink kemudian menampilkan hasil

perhitungan sebagai estimasi parameter motor 3 fasa. Pada modul ini proses perhitungan dilakukan oleh matlab-simulink, sehingga dapat dianalisa proses kerja algoritma pada matlab-simulink. Dengan adanya modul ini, diharapkan dapat membantu dan mempermudah mahasiswa dalam proses analisa teknologi sensorless pada motor 3 fasa.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Motor AC 3 Fasa

Motor AC 3 Fasa bekerja dengan memanfaatkan perbedaan fasa pada masukan motor yang kemudian menimbulkan adanya gaya putar pada rotor. Motor AC 3 fasa mempunyai dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Dimana bagian tersebut dipisahkan oleh celah udara (air gap).

Dilihat dari bentuk lilitan pada rotornya, terdapat dua macam jenis motor AC 3 fasa, yaitu rotor belitan dan rotor sangkar tupai. Motor AC 3 fasa rotor sangkar tupai adalah tipe motor induksi yang mempunyai bentuk rotor yang tersusun dari beberapa batangan logam yang dimasukkan melewati slot-slot pada rotor motor, yang disetiap bagian disatukan oleh cincin.

Prinsip kerja motor listrik 3 fasa adalah apabila dialirkan sumber tegangan 3 fasa pada kumparan stator, sehingga menyebabkan adanya medan putar dan kecepatan. Kecepatan tersebut dapat dihitung menggunakan rumus :

$$N_s = 120f/P \quad (1)$$

Dimana :

$N_s$  = kecepatan

$f$  = frekuensi sumber tegangan

$P$  = jumlah kutub motor

Medan putar stator memotong batang konduktor yang ada pada rotor, sehingga pada batang konduktor dari rotor muncul GGL induksi. GGL akan menghasilkan arus ( $I$ ) serta gaya ( $F$ ) pada rotor. Agar GGL induksi timbul, diperlukan perbedaan antara kecepatan medan putar yang ada pada stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar yang ada pada rotor ( $n_r$ ).

Adanya perbedaan kecepatan antara stator dan rotor disebut slip ( $s$ ) yang dapat dinyatakan dengan rumus  $s = (n_s - n_r) / n_s$ . Apabila  $n_r = n_s$ , maka GGL induksi tidak akan timbul, dan arus tidak akan mengalir pada batang konduktor (rotor), dengan demikian tidak dihasilkan kopel.

Muhammad Muwafiqur Romdlon adalah mahasiswa D4 Teknik Elektronika Politeknik Negeri Malang  
Achamad Komarudin dan Tarmukan adalah dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang

2.2 Inverter atau VSD (*Variabel Speed Drive*)

Inverter bekerja dengan cara mengubah tegangan AC menjadi DC. Setelah mendapatkan tegangan DC, tegangan DC tersebut diubah kembali menjadi AC dengan frekuensi gelombang keluaran yang dapat dimanipulasi. Perbedaan frekuensi gelombang tersebut yang kemudian dapat digunakan untuk mengontrol kecepatan dan torsi motor. Inverter yang digunakan pada modul ini adalah inverter dengan merk Schneider ATV12H037M2 yang mempunyai daya 0.37kW.



**Gambar 1** Inverter Schneider ATV12H037M2

Pada inverter tersebut mempunyai fitur *analog input* (AI) untuk mengontrol frekuensi gelombang keluaran dan *analog output* (AO) yang mengeluarkan tegangan 0-10Hz yang merepresentasikan frekuensi gelombang 0-50Hz. Sehingga *analog output* (AO) dapat digunakan sebagai sensor tegangan. Dikarenakan tegangan keluaran dan frekuensi keluaran mempunyai perbandingan yang linier.

2.3 Model Motor Induksi

Dinamik model dari motor induksi pada modul ini dapat dideskripsikan melalui persamaan :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1 - a_2}{talr} i_{sa} + \frac{a_3}{talr} \Psi_{ra} + a_3 \Psi_{rb} \omega_r \\ \frac{a_1 - a_2}{talr} i_{sb} + \frac{a_3}{talr} \Psi_{rb} - a_3 \Psi_{ra} \omega_r \\ \frac{a_4}{talr} i_{sa} + \left( \frac{1 - T_s}{talr} \right) \Psi_{ra} - T_s \omega_r \Psi_{rb} \\ \frac{a_4}{talr} i_{sb} + \left( \frac{1 - T_s}{talr} \right) \Psi_{rb} + T_s \omega_r \Psi_{ra} \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 L_r T_s v_{sa} \\ a_0 L_r T_s v_{sb} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dimana vektor pertama adalah *state*  $x(k)$ , vektor kedua adalah masukan  $v(k)$  dan keluaran  $y(k)$  adalah  $C x(k)$  dengan  $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ . Konsekuensi dari penambahan *state*  $\omega_r$  model motor menjadi tidak linear, lebih lanjut dengan persamaan :

$$a_0 = \frac{1}{L_s L_r - L_m L_m} \quad (3)$$

$$a_1 = 1 - a_0 R_s L_r T_s \quad (4)$$

$$a_2 = a_0 L_m L_m T_s \quad (5)$$

$$a_3 = a_0 L_m T_s \quad (6)$$

$$a_4 = L_m T_s \quad (7)$$

$$a_5 = a_0 L_r T_s \quad (8)$$

$$talr = \frac{L_r}{R_r} \quad (9)$$

$$T = p \frac{L_m}{L_r} (i_{sb} \Psi_{ra} - i_{sa} \Psi_{rb}) \quad (10)$$

Dimana :

- $R_s$  = resistansi stator
- $L_s$  = induktansi stator
- $L_m$  = induktansi utama
- $L_r$  = induktansi rotor
- $R_r$  = induktansi rotor
- $talr$  = waktu konstan rotor
- $T$  = torsi motor

2.4 *Algoritma Extended Kalman Filter*

*Algoritma Extended kalman filter* adalah algoritma yang digunakan untuk mengestimasi variabel non-linier tak terukur. Pada penelitian ini algoritma digunakan untuk menghitung estimasi parameter kecepatan rotor, torsi motor dan rotor flux. Dengan persamaan pemodelan EKF seperti dibawah ini :

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (11)$$

Dengan persamaan pengukuran atau *measurement*

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (12)$$

Pada persamaan diatas  $f(.)$  adalah persamaan non-linier yang didapat dari algoritma *Extended kalman filter* yang menghubungkan *state* pada waktu sebelumnya, *process noise* dan *input* dengan *state* waktu sekarang. Sedangkan pada persamaan *measurement*,  $h(.)$  adalah persamaan non-linier yang menghubungkan *state* sekarang dan *measurement noise* dengan hasil pengukuran. Perhitungan dalam mencari *state*  $x_k$  dengan menggunakan :

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \quad (13)$$

$$z_k^- = h(\hat{x}_k^-, v_k) \quad (14)$$

Pada persamaan eksplisit estiamsi *state* (11), persamaan (13) dan (14) harus dilakukan linierisasi. Linierisasi menggunakan deret taylor pada sekitar titik kerja  $w_k = 0$  dan  $v_k = 0$ . Hal tersebut dikarenakan *noise* yang terjadi pada proses dan pengukuran tidak dapat diukur. Estimasi dilakukan dengan menganggap nilai *noise-noise* tersebut bernilai nol. Dengan demikian persamaan diubah menjadi :

$$x_k \approx f(\delta f_{[i]}) + f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) + Ww_k \quad (15)$$

$$z_k \approx h(\hat{x}_k^-, 0) + H(\hat{x}_k^-, 0) + Vv_k \quad (16)$$

$$F_{[i,j]} = \frac{\delta f_{[i]}}{\delta x_{[j]}}(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0)$$

$$W_{[i,j]} = \frac{\delta f_{[i]}}{\delta w_{[j]}}(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0)$$

$$H_{[i,j]} = \frac{\delta H_{[i]}}{\delta w_{[j]}}(\hat{x}_{k-1}, 0)$$

$$V_{[i,j]} = \frac{\delta H_{[i]}}{\delta v_{[j]}}(\hat{x}_{k-1}, 0)$$

Dengan pemodelan diatas dapat didefinisikan *measurement residual* (17), dan dengan memperhatikan persamaan *a-priori state error* didapatkan persamaan *error proses* (18) dan (19).

$$\hat{e}_{z_k}^- = z_k - \hat{z}_k^- \quad (17)$$

$$\hat{e}_{z_k}^- \approx A(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}^-) + \mathcal{E}_k \quad (18)$$

$$e_{z_k}^- \approx H \hat{e}_{z_k}^- + \eta_k \quad (19)$$

Terdapat variabel baru  $\mathcal{E}_k$  dan  $\eta_k$ . Variabel tersebut adalah variabel acak yang memiliki *mean* nol dan matriks kovarians masing-masing  $WQW^T$  dan  $VRV^T$  yang memiliki karakteristik :

$$p(\hat{\epsilon}_{x_k}^-) \sim N(0, E[\text{ehat}_{x_k}^- \hat{\epsilon}_{x_k}^{-T}])$$

$$p(\epsilon_k) \sim N(0, E[WQ_k W^T])$$

$$p(\eta_k) \sim N(0, E[VR_k V^T])$$

Selanjutnya dapat dicari estimasi dari  $\hat{\epsilon}_{x_k}^-$ . Hasil estimasi menghasilkan  $\hat{\epsilon}_k$  dan digunakan untuk mendapatkan *a-posteriori state estimate*.

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}^- + \hat{\epsilon}_k \tag{20}$$

Dengan mempertimbangkan karakteristik dari  $\hat{\epsilon}_{x_k}^-$ ,  $\epsilon_k$  dan  $\eta_k$ , men-set nilai estimasi  $\text{ehat}_k$  menjadi nol, dan mempertimbangkan data  $\hat{\epsilon}_{z_k}^-$ . Didapatkan kalman filter hipotesis untuk dapat memperoleh  $\hat{\epsilon}_k$  :

$$\hat{\epsilon}_k = K_k \hat{\epsilon}_{z_k}^- \tag{21}$$

Dengan mensubstitusikan (21) dan (22), dengan mempertimbangkan persamaan *measurement residual* diperoleh persamaan :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{z}_k^-) \tag{22}$$

Persamaan diatas merupakan persamaan *state estimate update* yang diterapkan pada sistem non-linier. Persamaan-persamaan yang digunakan algoritma *Extended kalman filter* dapat dirumuskan :

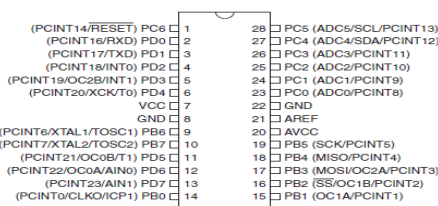
1. Update Prediction
  - $\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1})$
  - $P_k^- = FK_k F^T + WQW^T$
2. Measurement Update Correction
  - $K_k = P_k^- H^T [HP_k^- H^T + VRV^T]^{-1}$
  - $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$
  - $P_k = (I - K_k H) P_k^-$

### 2.5 Mikrokontroler ATmega328p

Atmega328p merupakan mikrokontroler buatan atmel yang memiliki 28 pin. Pada modul ini menggunakan atmega328p karena sesuai kebutuhan pin dan fitur yang diperlukan yaitu 2 pin ADC untuk sensor dan pin UART. Fitur-fitur yang terdapat pada Atmega 328p, yaitu :

1. 32Kb memori program flash
2. 1Kb memori EEPROM
3. 2Kb memori SRAM internal
4. *Write/Erase* sebanyak : 10.000 flash dan 100.000 EEPROM
5. Maksimal 32 pin I/O dan 6 kanal ADC 10/8 bit tipe PDIP
6. *External interrupt*
7. 6 kanal PWM
8. Satu 16-bit timer dan dua 8-bit timer
9. Komunikasi serial SPI dan UART

Bentuk ATmega328p yang digunakan pada modul ini adalah PDIP dikarenakan lebih mudah dalam pemasangan dan penyolderan.



Gambar 2 Pin ATmega328p

## III. METODOLOGI

### 3.1. Spesifikasi Alat :

#### Spesifikasi Mekanik

- a. Spesifikasi keseluruhan
  - 1) Bahan : Plat Besi
  - 2) Tinggi : 50 cm
  - 3) Lebar : 60 cm

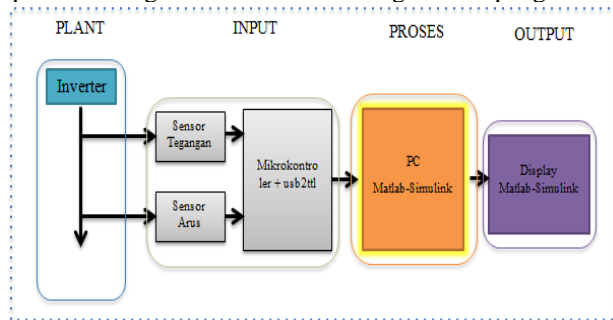
#### Spesifikasi Elektrik

- a. Motor 3 Fasa
  - Tegangan : 220/380 VAC
  - Arus : 0.6/0.34 A
  - Frekuensi : 50 Hz
  - Kecepatan : 1460 rpm
- b. Mikrokontroler : ATmega328p
- c. VSD atau Inverter : Schneider ATV12H037M2 0.37 kW
- d. Sensor Tegangan
- e. Sensor Arus
- f. Modul usb2ttl
- g. Regulator Tegangan

### 3.2. Prinsip Kerja Alat

Prinsip kerja dari modul praktikum estimasi parameter motor 3 fasa menggunakan matlab-simulink berbasis extended kalman filter pada laboratorium sistem kendali digital adalah dengan menggunakan nilai tegangan dan arus pada keluaran inverter menuju motor sebagai variabel yang berubah seiring dengan perubahan kecepatan pada motor. Dengan menggunakan data dari sensor yang dikonversi agar dapat diproses oleh mikrokontroler.

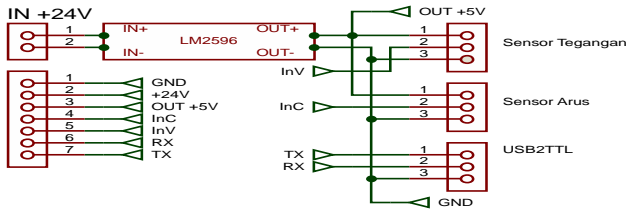
Data yang terkumpul pada mikrokontroler dikirim menuju matlab-simulink menggunakan modul usb2ttl. Modul usb2ttl mengirimkan data secara serial melalui USB komputer. Data yang didapat diteruskan menuju matlab-simulink. Pada matlab-simulink data dihitung menggunakan algoritma extended kalman filter. Sehingga menghasilkan parameter kecepatan dan torsi. Data estimasi parameter ditampilkan dalam bentuk grafik pada matlab-simulink. Data akan diperbarui dengan periode tertentu sehingga data berubah apabila kecepatan motor berubah. Untuk dapat menguji keakuratan algoritma extended kalman filter digunakan sensor tachometer untuk menghitung kecepatan asli motor sehingga dapat dibandingkan hasil estimasi dengan hasil pengukuran.



Gambar 3 Diagram Blok Sistem

### 3.3 Perancangan dan Pembuatan Elektrik

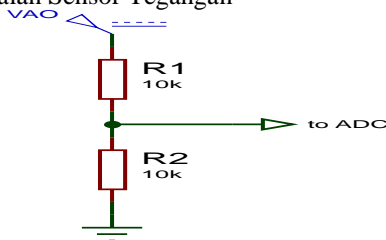
#### 3.3.1 Rangkaian Regulator



Gambar 4 Rangkaian Regulator

Tegangan yang diperlukan oleh minimum sistem dan sensor adalah 5 volt. Sedangkan power supply yang dipakai mempunyai tegangan 24 V, sehingga harus diturunkan sesuai kebutuhan. Untuk menurunkan tegangan tersebut, menggunakan modul stepdown lm2596 dikarenakan modul tersebut mempunyai rating arus yang cukup besar yaitu 3 A (datasheet LM2596). Gambar 3.2 merupakan skema rangkaian regulator, keluaran rangkaian regulator berupa tegangan 5 V langsung diberikan kepada power sensor dan mikrokontroler.

#### 3.3.2 Rangkaian Sensor Tegangan



Gambar 5 Rangkaian Pembagi Tegangan

Rangkaian pembagi tegangan terdiri dari dua resistor yang terhubung secara seri. Dengan persamaan :

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_s \tag{23}$$

Sehingga nilai  $V_{out}$  adalah  $0.333 * V_s$ . Misalkan nilai  $V_s$  adalah 5 V, maka nilai  $V_{out}$  adalah 1.665V.

#### 3.3.3 Rangkaian Sensor Arus

Sensor arus pada modul ini menggunakan *encoder wheel*, dimana hasil perhitungan rpm dari *encoder wheel* diubah menjadi nilai arus pemodelan motor 3 fasa pada simulink. Perhitungan nilai encoder menggunakan fitur *interrupt* pada ATmega328p. *interrupt* menghitung banyaknya frekuensi masukan atau saat ketika ada simpangan antara sensor dan lubang pada lempengan.

Dengan logika apabila sensor tidak menerima cahaya maka keluaran sensor 5v/high, sedangkan apabila sensor menerima cahaya maka keluaran sensor 0.3v/low. Nilai tersebut yang kemudian dihitung oleh fitur *interrupt* ATmega328p dengan mode *rising* atau mendeteksi saat ada perpindahan dari logika 0 ke 5v.

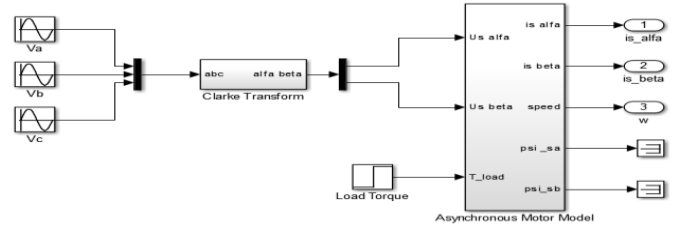
### 3.4 Perancangan Software

#### 3.4.1 Implementasi Model Motor 3 Fasa Pada Simulink

Masukan dari mesin induksi adalah tegangan 3 fasa, frekuensi gelombang dan torsi beban. Dengan keluaran arus

tiga fasa, torsi dan kecepatan rotor. Model motor induksi memerlukan variabel 3 fasa yang harus ditransformasikan menjadi frame putar 2 fasa.

Model motor induksi yang digunakan pada penelitian ini terlihat pada gambar 3.11 terdiri dari 2 blok utama : clarke transform dan asynchronous model motor. Clarke transform digunakan untuk mengubah dari variabel 3 fasa menjadi 2 fasa.

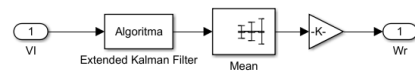


Gambar 6 Model Simulink Motor 3 Fasa

Persamaan motor induksi diimplementasikan menggunakan blok “Subsystem” yang didalam blok tersebut berisi blok-blok sehingga menjadi persamaan motor induksi. Model motor induksi diatas digunakan untuk melakukan pengambilan data  $V_a$ - $V_b$ ,  $I_a$ - $I_b$ , kecepatan. Data tersebut kemudian digunakan sebagai acuan untuk penulisan *state-space model* dan extended kalman filter pada blok *s-function* yang berbentuk *m-file*.

#### 3.4.2 Implementasi Extended Kalman Filter Pada Simulink

Pada simulink implementasi algoritma extended kalman filter menggunakan blok “S-function” yang ditulis dengan format m-file. Pada m-file tersebut terdiri dari *state-space* motor 3 fasa dan algoritma extended kalman filter. Dengan input berupa  $V_a$ - $V_b$ ,  $I_a$ - $I_b$  dan output  $W_r$ .



Gambar 7 Blok Sistem EKF

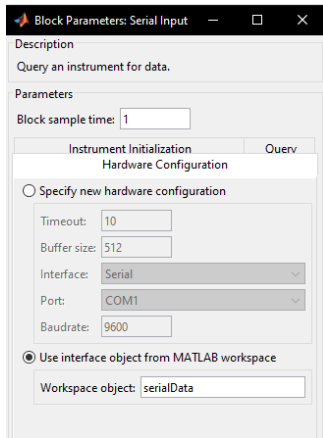
## IV. HASIL DAN ANALISA

### 4.1 Pengujian Komunikasi ATmega328p ke Matlab-Simulink

Pengujian komunikasi atmega328p ke matlab-simulink bertujuan untuk melihat kesesuaian data yang dikirim dari atmega328p dengan yang diproses oleh matlab-simulink

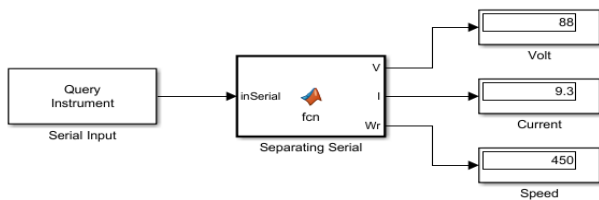
Penulisan konfigurasi parameter blok sistem “Query Instrument” yang ditulis terlebih dahulu pada *command* adalah sebagai berikut :

```
serialData=serial('COM7','BaudRate',9600,'DataBits',8,'terminator','CR','timeout',1);
fopen(serialData);
```



**Gambar 8** Konfigurasi Komunikasi Serial

Parameter yang sudah tertulis pada *workspace* dimasukkan pada kolom *Workspace object* seperti pada gambar 4.1.



**Gambar 9** Pembacaan Data Serial Pada Blok Sistem Simulink

Pada matlab-simulink pembacaan data menggunakan blok sistem *query instrument* untuk mengambil data pada serial komputer kemudian data tersebut dipisahkan menggunakan blok sistem *matlab function*. Data keluaran dari blok sistem *matlab function* berupa tegangan, arus, dan kecepatan, yang digunakan dalam proses estimasi blok sistem extended kalman filter.

4.2 Pengujian Sensor Tegangan

Sensor tegangan membaca tegangan pada analog output inverter menggunakan fitur *ADC atmega328p*, kemudian mengubahnya menjadi nilai amplitudo. Seperti pada tabel 4.2

**Tabel 1** Tabel Hasil Pengujian Sensor *Rotary Encoder*

Frekuensi (Hz)	Pengukuran (V)	Pembacaan (V)	Error (%)
5	45.5	44.5	2
10	60.7	58	4.5
15	75.3	77	2.2
20	88	85	3.4
25	100	97	3
30	114.1	112	1.8
35	127.2	126.1	0.8
40	139.6	138	1.1
45	151.7	149	1.7
50	163.8	166	1.3

Pada tabel 1 nilai tegangan yang terbaca linier seiring dengan penambahan frekuensi gelombang keluaran inverter. Nilai maksimal pengukuran amplitudo gelombang keluaran inverter terlihat pada tabel tersebut adalah 163.8 v dengan nilai error maksimal pembacaan 4.5 %. Dapat dianalisa pada tabel 4.2 bahwa inverter tersebut mengontrol kecepatan motor induksi dengan pengendalian volt/hz, dimana terdapat perbandingan tegangan dan frekuensi yang konstan.

3.3 Pengujian Sensor Arus

Pengujian driver motor dengan cara mengatur lebar pulsa (*duty cycle*) melalui program pada mikrokontroller dan melihat tegangan keluaran pada motor. Frekuensi yang digunakan adalah 675 Hz. Perubahan nilai tegangan motor terhadap nilai *Duty Cycle* dapat dilihat pada tabel 2.

**Tabel 2** Tabel Hasil Pengujian Driver Motor DC

Frekuensi (Hz)	Sensor (RPM)	Tachometer (RPM)	Error (%)
10	270	278	2.8
15	420	428	1.9
20	600	598	0.3
25	750	750	0
30	870	900	3.4
35	1020	1014	0.5
40	1200	1173	2.25
45	1320	1343	0.9
50	1440	1472	2.2

Pada tabel 2 nilai yang terukur pada sensor adalah nilai rpm yang kemudian diubah menjadi nilai arus pemodelan pada matlab-simulink. Pada gambar 4.3 terlihat nilai pembacaan sensor kurang linier, sehingga harus dihitung menggunakan persamaan polynomial untuk mengkonversi nilai rpm menjadi arus pemodelan. Nilai rpm dari sensor arus saat dilakukan pengukuran beresilasi namun nilai rata-rata pengukuran bertambah juga saat frekuensi motor dinaikkan.

4.3 Pengujian Kecepatan Motor

Pengujian kecepatan motor ini untuk mengetahui kecepatan motor pada frekuensi tertentu menggunakan tachometer. Inverter diatur dengan frekuensi gelombang keluaran 0-50Hz dengan kelipatan 5, kemudian diukur dan diamati nilai kecepatan (rpm).

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui linieritas kecepatan motor terhadap frekuensi yang dimasukkan. Dengan kecepatan motor yang linier, maka merancang sistem estimasi parameter. Dapat analisa bahwa perubahan kecepatan motor cukup stabil dan linier.

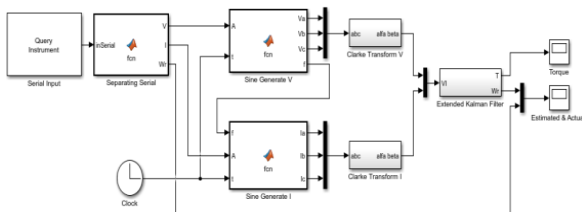
**Tabel 3** Data Pengujian Kecepatan Motor

Frekuensi	RPM
0	0
5	147

10	284
15	428
20	598
25	750
30	900
35	1014
40	1173
45	1343
50	1472

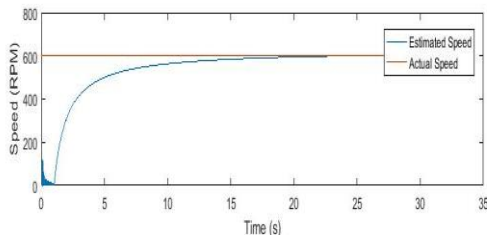
**4.4 Pengujian EKF Pada Matlab-Simulink**

Pengujian algoritma extended kalman filter pada matlab-simulink dilakukan untuk mengetahui bagaimana respon blok sistem algoritma terhadap masukan tegangan dan arus. Dikarenakan ada nilai parameter yang kurang sesuai dengan motor induksi aslinya pada pemodelan motor induksi pada *state-space*, sehingga diperlukan penambahan *gain* pada keluaran blok sistem algoritma extended kalman filter dengan metode *try & error* sehingga didapatkan nilai estimasi kecepatan yang sesuai. Dengan penambahan gain sebesar 14.75 pada kecepatan dan 0.175 pada torsi.



**Gambar 11** Skema Sistem Pada Matlab-Simulink

Pada gambar 11 merupakan skema sistem, hasil dari skema tersebut adalah torsi dan kecepatan. Torsi dan kecepatan ditampilkan dalam bentuk grafik pada blok sistem *scope*.



**Gambar 12** Kecepatan Aktual dan Estimasi Pada Referensi 600 RPM

Pada gambar 12 dapat dianalisa blok sistem algoritma membutuhkan waktu *rise time* (*tr*) atau waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai referensi dari awal *starting* dari suatu tanggapan respon sistem adalah :

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \tag{24}$$

dengan,

$(x_1, y_1) = (1.5, 0)$  = waktu dan rpm saat awal respon sistem

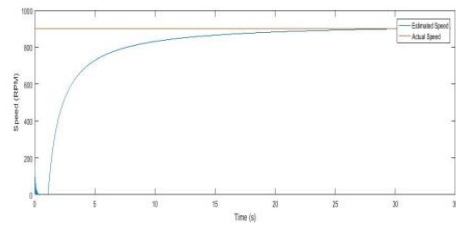
$(x_2, y_2) = (17,600)$  = waktu dan rpm saat mencapai peak

$y = 90\% x \text{ referensi} = 540$

Sehingga,

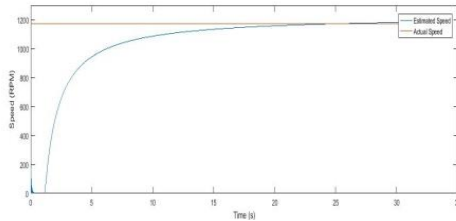
$$\frac{540-0}{600-0} = \frac{x-1.5}{17-1.5}$$

$$x = tr = 15.45 \text{ s}$$



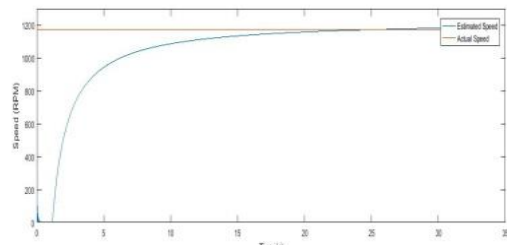
**Gambar 13** Kecepatan Aktual dan Estimasi Pada Referensi 900 RPM

Pada gambar 13 dapat dianalisa blok sistem algoritma membutuhkan waktu *rise time* (*tr*) atau waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai referensi dari awal *starting* dari suatu tanggapan respon sistem adalah :  $x = tr = 22.65 \text{ s}$



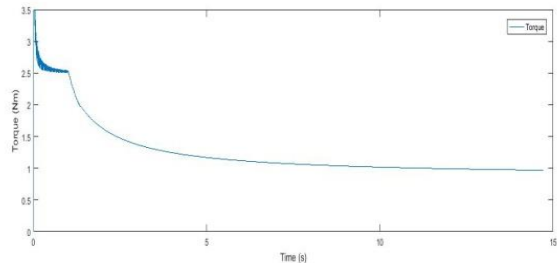
**Gambar 14** Kecepatan Aktual dan Estimasi Pada Referensi 1173 RPM

Pada gambar 14 dapat dianalisa blok sistem algoritma membutuhkan waktu *rise time* (*tr*) atau waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai referensi dari awal *starting* dari suatu tanggapan respon sistem adalah  $x = tr = 19.95 \text{ s}$

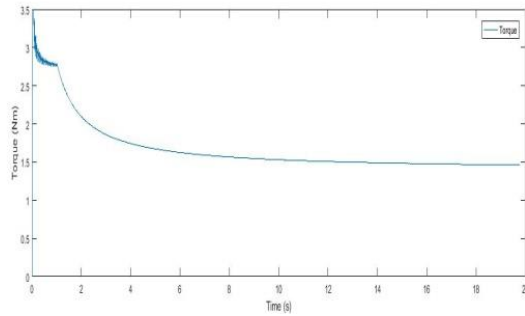


**Gambar 15** Kecepatan Aktual dan Estimasi Pada Referensi 1472 RPM

Pada gambar 15 dapat dianalisa blok sistem algoritma membutuhkan waktu *rise time* (*tr*) atau waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai referensi dari awal *starting* dari suatu tanggapan respon sistem  $x = tr = 18.15 \text{ s}$



**Gambar 16** Torsi Pada Kecepatan 1472 RPM



**Gambar 17** Torsi Pada Kecepatan 600 RPM

Gambar 16 dan gambar 17 merupakan pengujian nilai torsi pada dua variasi kecepatan yang berbeda.

Dari beberapa pengujian diatas dapat dianalisa bahwa penggunaan algoritma extended kalman filter sebagai estimator cukup baik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 14 sampai 17 Keakuratan algoritma extended kalman filter sangat bergantung pada pemodelan plant atau objek penelitian. Namun dikarenakan perancangan blok sistem pada matlab-simulink yang terlalu kompleks membuat waktu *rise time* cukup lama.

**Tabel 4** Waktu *Rise Time* Sistem

Kecepatan (RPM)	Waktu (s)
600	15.45
900	22.65
1173	19.95
1472	18.15

Nilai *rise time* yang ditampilkan pada tabel 4 tersebut menyebabkan sistem tidak responsif apabila digunakan sebagai feedback kecepatan motor, dengan rata-rata waktu *rise time* (*tr*) sebesar 18.9 s.

Nilai torsi seperti yang ditampilkan pada gambar 4.8 dan gambar 4.9 bergantung atau mengikuti pada nilai kecepatan motor. Pada kecepatan motor lebih tinggi nilai torsi akan lebih rendah, sementara pada kecepatan motor lebih rendah nilai torsi akan lebih tinggi.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian dan menganalisisnya, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Algoritma extended kalman filter dapat digunakan sebagai estimator parameter sistem *non-linier* suatu objek dengan syarat adanya model *state-space* dari objek yang diteliti.
2. Pemodelan objek mempunyai pengaruh yang besar terhadap keluaran sistem, apabila pemodelan objek tidak sesuai dengan aslinya (*hardware*) maka respon sistem akan tidak sesuai juga dengan aslinya (*hardware*)
3. Penggunaan matlab-simulink sebagai pemroses utama pada penelitian ini mempunyai respon yang lama, sehingga keluaran sistem menjadi kurang responsif.

4. Keluaran inverter yang berupa gelombang *sinus-squarewave* menyebabkan sulitnya dalam mengukur arus yang menuju pada motor, sehingga peneliti menggunakan sensor *rotary encoder wheel* sebagai pengganti sensor arus. Dimana nilai pembacaan sensor tersebut dikonversi menjadi arus pemodelan motor sesuai dengan nilai kecepatan motor.

5.2 Saran

Penggunaan metode estimasi extended kalman filter kompleks. Dalam pelaksanaannya diperlukan perhitungan yang banyak, sehingga akan berat apabila diterapkan pada mikrokontroler. Diperlukan pemodelan objek yang lebih ringan namun sesuai dengan objek aslinya (*hardware*) agar perhitungan tidak terlalu berat, sehingga dapat diterapkan pada mikrokontroler.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A Derdiyok. 2005. Speed-Sensorless Control of Induction Motor Using a Continuous Control Approach of Sliding-Mode and Flux Observer. *Industrial Electronics, IEEE Transactions Journal*. 52:1170-1176.
- [2] FR Salmasi, TA Najafabadi. 2011. An Adaptive Observer With Online Rotor and Stator Resistance Estimation for Induction Motors With One Phase Current Sensor. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*. 26: 959-966.
- [3] IM Alsofyani, NRN Idris, M Jannati, SA Anbaran, YA Alamri. 2014. Using NSGA II multiobjective genetic algorithm for EKF-based estimation of speed and electrical torque in AC induction machines. *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), IEEE 8th International*. 396-401.
- [4] M Barut, R Demir, E Zerdali, R Inan. 2011. Speed-sensorless direct torque control system using Bi-input extended Kalman filter for induction motors. *Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), International Aegean Conference on*. 343-346.
- [5] Ibrahim M. Alsofyani, Nik Rumzi Nik Idris, Y.A. Alamri, Low Wen Yao, Sajjad A. Anbaran. 2014. Evaluasi dari Estimasi Kecepatan dan Torsi Berbasis EKF pada Direct Torque Control di Mesin Induksi. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. Vol. 6, No. 1.
- [6] Fandy Hartono. 2016. Pengaturan Kecepatan Dan Posisi Motor AC 3 Phasa Menggunakan DT AVR Low Cost Micro System. *Jurnal Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- [7] M. Alsofyani, NRN Idris, T. Sutikno, Y. A. Alamri. 2012. Optimisasi Extended Kalman Filter untuk Teknologi Sensorless Speed Direct Torque Control di Motor Induksi. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*.
- [8] Remzi Inan, Murat Barut. 2012. Bi Input-Extended Kalman Filter-Based Speed-Sensorless Control of an Induction Machine Capable of Working in the Field-Weakening Region. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*.
- [9] Yongjin (James) Kwon, Yongmin Park. 2011. Improvement of Vision Guided Robotic Accuracy Using Kalman Filter. *Journal computer and industrial engineering homepage : www.elsevier.com/locate/caie*.
- [10] Tarmukan. 2003. Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Model Predictive Control Dengan MHSE Sebagai Estimasi Variabel Keadaan. *Tesis Program Studi Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.