

SISTEM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC MENGUNAKAN ESTIMATOR EXTENDED KALMAN FILTER

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:
Willy Fajrul Islam
NIM. 0410633072

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
MALANG
2010**

LEMBAR PERSETUJUAN

SISTEM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC MENGUNAKAN ESTIMATOR EXTENDED KALMAN FILTER

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:
Willy Fajrul Islam
NIM. 0410633072

Telah diperiksa dan disetujui oleh:
Dosen Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir. Purwanto MT.
NIP. 195 40424 198601 1001

Goegoes D. N., ST., MT.
NIP. 197 11013 200401 1001



LEMBAR PENGESAHAN
SISTEM PENGATURAN KECEPATAN MOTOR DC
MENGGUNAKAN ESTIMATOR EXTENDED KALMAN
FILTER

Disusun Oleh:
Willy Fajrul Islam
NIM. 0410633072

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal
5 Oktober 2010

Majelis Penguji Skripsi:

Fitriana Suhartati ST., MT.
NIP. 19741017 1998022 001

Ir. Bambang Siswoyo MT.
NIP. 19621211 1988021 001

M. Azis Muslim ST., MT., PhD.
NIP. 19741203 2000121 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Rudy Yuwono ST., MSc.
NIP. 19710615 199802 1 003

Sistem Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Estimator Extended Kalman Filter. Skripsi Willy Fajrul Islam, 2010. Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang. Dosen Pembimbing: Purwanto, Ir. MT. dan Goegoes D. N. ST. MT.

ABSTRAK

Salah satu alasan penggunaan motor DC dalam dunia industri adalah karena motor DC memiliki kecepatan kerja yang lebih mudah untuk diatur dalam satu rentang kecepatan yang besar, selain itu terdapat banyak metode untuk mengatur kecepatan motor DC. Pengaturan putaran kecepatan motor DC ini pada umumnya menggunakan perangkat tambahan sebagai umpan baliknya, seperti *tachogenerator*. Penambahan perangkat ini tentunya menambah biaya dalam pengoperasian motor dan juga memiliki kelemahan seperti keakuratan sensor dalam menghitung kecepatan ataupun adanya distorsi dalam proses perhitungan kecepatan.

Kalman Filter adalah suatu set persamaan matematis yang berulang (*recursive*) untuk mengestimasi state dalam suatu proses dengan cara meminimalisasi error rata-rata. Extended Kalman Filter (EKF) adalah suatu cara untuk mengaplikasikan sistem yang nonlinier pada Kalman Filter. Berbeda dengan Kalman Filter, EKF bukan merupakan optimal filter, karena perhitungannya berdasarkan pada pendekatan yang dilakukan filter ini kepada model sistem non-linier yang digunakan.

Dalam skripsi ini berhasil dikembangkan suatu sistem pengaturan dengan menggunakan EKF sebagai estimator kecepatan dari motor DC dengan perubahan beban yang diketahui besar torsiya dan sebagai sistem pengaturan motor DC tersebut dalam sebuah simulasi di MATLAB.

Kata kunci: Motor DC, Extended Kalman Filter (EKF).

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah , Tuhan seru sekalian alam yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayahNya pada kita semua. Salam pada junjungan kita Rasullullah Muhammad SAW yang telah membimbing kita dari kegelapan menuju cahaya Illahi.

Melalui kata pengantar ini, penulis ingin menyampaikan terimakasih atas tersusunnya skripsi ini yang mana merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi kepada pihak-pihak yang telah membantu:

1. Orang tua, yang telah membimbing dalam semua yang penulis lakukan semasa hidupnya.
2. Bapak Rudy Yuwono ST., MT. sebagai Ketua Jurusan serta Bapak M. Aziz Muslim ST., MT., Ph. D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ir. Purwanto MT. sebagai dosen pembimbing I.
4. Bapak Goegoes Dwi Nusantoro ST., MT. sebagai dosen pembimbing II.
5. Bapak-ibu dosen Jurusan Teknik Elektro FT-UB Malang yang telah sabar untuk membimbing penulis selama masa kuliah.
6. Bapak-Ibu karyawan Jurusan Teknik Elektro FT-UB serta Bapak-Ibu karyawan Fakultas Teknik UB atas bantuan administrasinya selama kuliah.
7. Teman-teman seangkatan Elektro 2004 non-reguler dan reguler yang sekian tahun bersama dalam menempuh studi di kampus.
8. Teman-teman organisasi dimanapun penulis berkiprah selama masa kuliah di kampus biru putih Malang.
9. Teman-temanku yang tidak dapat disebutkan namanya satu-persatu, terima kasih untuk bantuannya selama ini.

Demikian Kata Pengantar ini penulis sampaikan, semoga skripsi ini dapat bermanfaat di kemudian hari untuk penulis sendiri maupun orang lain dalam dunia pendidikan.

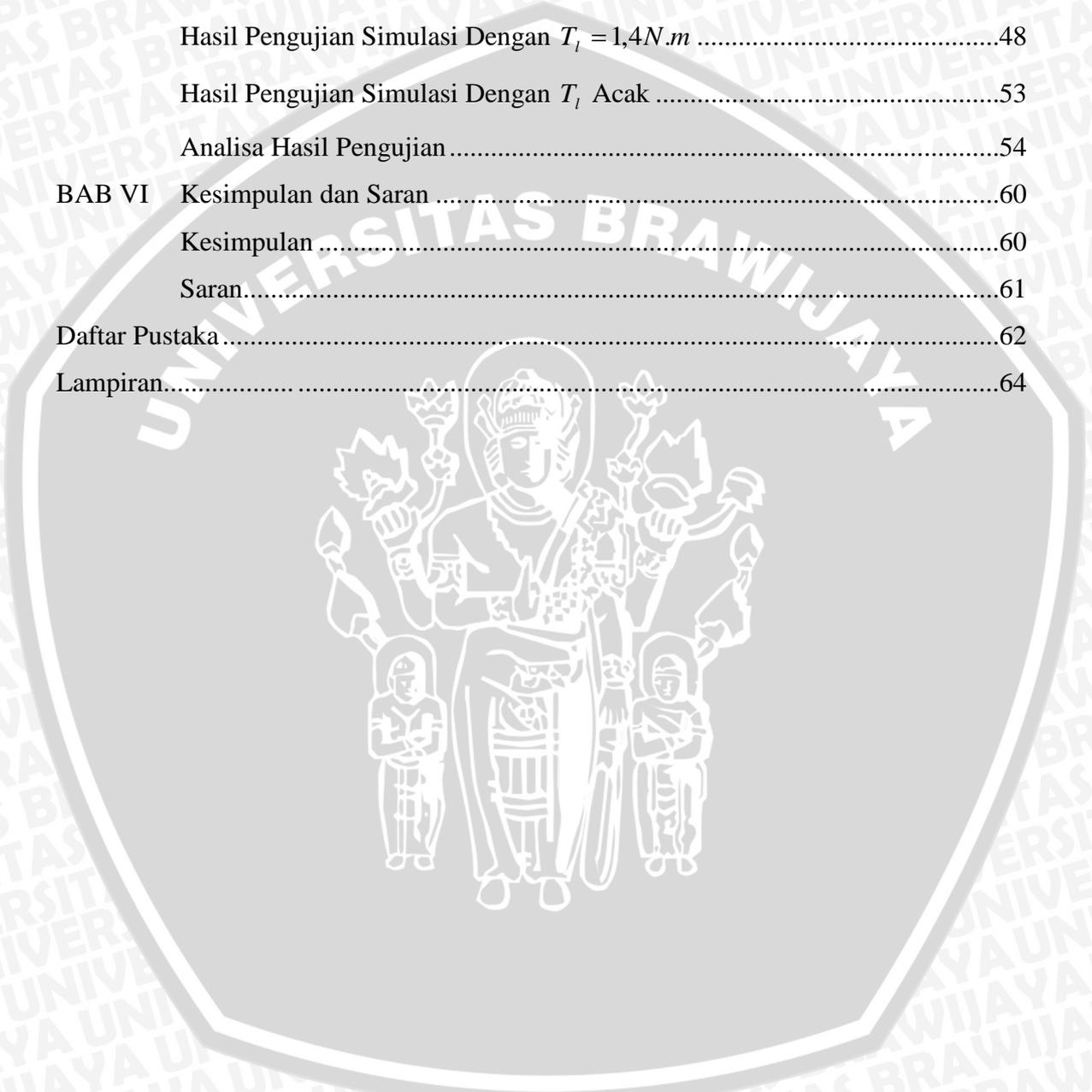
Agustus, 2010

Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar.....	i
Abstrak.....	ii
Daftar Isi.....	iii
Daftar Gambar.....	v
Daftar Tabel.....	vii
Daftar Istilah.....	viii
BAB I Pendahuluan.....	1
Latar Belakang.....	1
Rumusan Masalah.....	2
Batasan Masalah.....	2
Tujuan.....	2
Sistematika Penulisan.....	2
BAB II Tinjauan Pustaka.....	4
Motor DC Penguat Terpisah.....	4
Kalman Filter.....	7
Extended Kalman Filter.....	9
Konsep State Space.....	12
Konsep State Space Dalam Waktu Diskrit.....	14
Matlab.....	16
BAB III Metode Kajian.....	18
BAB IV Perancangan.....	20
Pemodelan Motor DC Penguat Terpisah.....	20
Persamaan State Space Motor DC Penguat Terpisah.....	21
Parameter Motor DC Penguat Terpisah.....	21
Perancangan Sistem.....	22
BAB V Pengujian dan Analisa.....	27
Umum.....	27
Pengujian Motor DC Penguat Terpisah.....	27
Hasil Pengujian Simulasi.....	29
Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0N.m$	29

Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0,3N.m$	34
Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0,5N.m$	38
Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0,7N.m$	41
Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 1N.m$	45
Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 1,4N.m$	48
Hasil Pengujian Simulasi Dengan T_l Acak	53
Analisa Hasil Pengujian	54
BAB VI Kesimpulan dan Saran	60
Kesimpulan	60
Saran.....	61
Daftar Pustaka.....	62
Lampiran.....	64



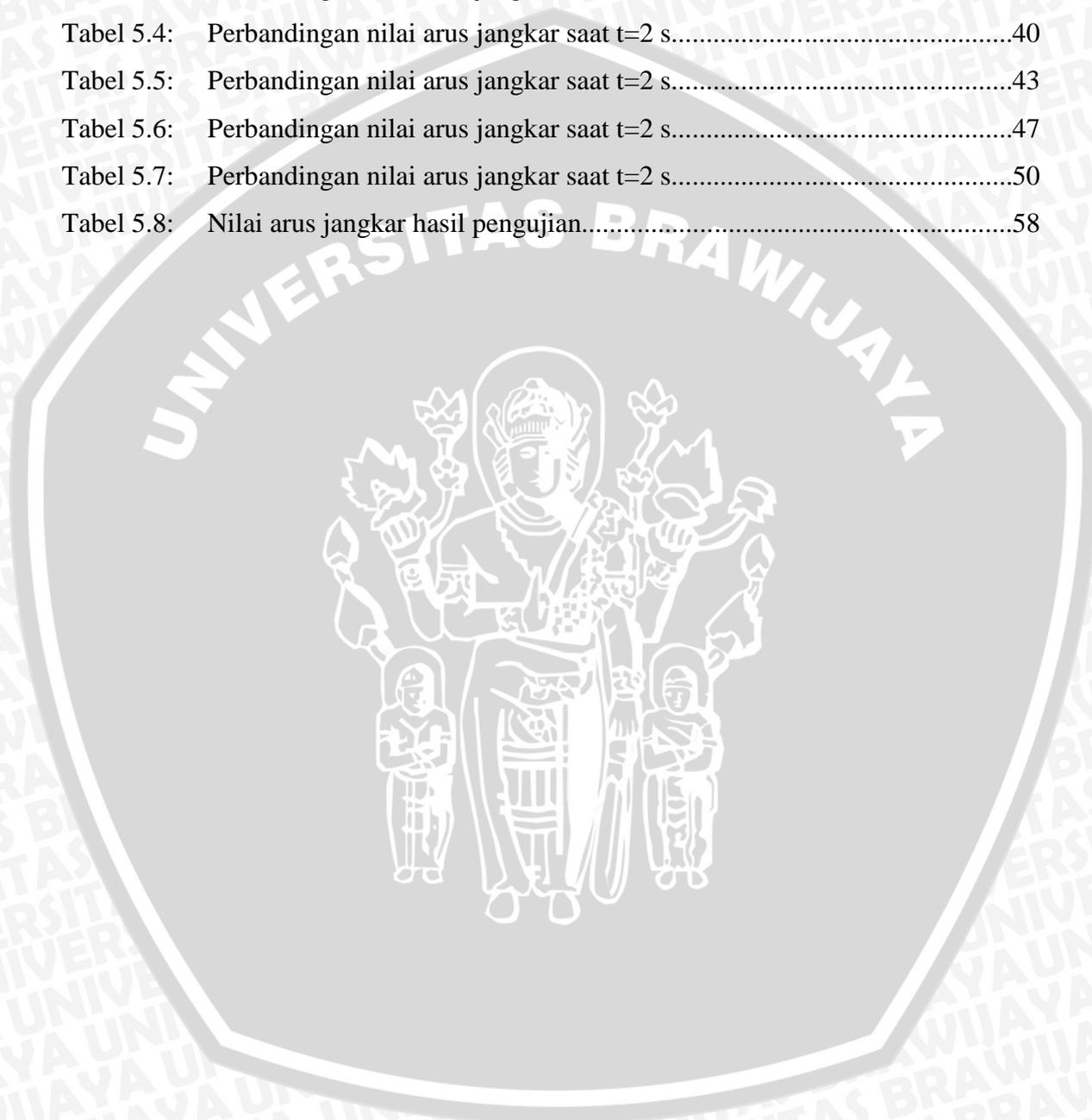
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 : Rangkaian ekivalen motor DC penguatan terpisah.....	4
Gambar 2.2 : Siklus Kalman Filter.....	9
Gambar 2.3 : Siklus EKF.....	12
Gambar 2.4 : Representasi sistem dalam bentuk persamaan state.....	14
Gambar 4.1 : Diagram blok motor DC penguat terpisah.....	20
Gambar 4.2 : Perancangan sistem.....	23
Gambar 5.1 : Rangkaian pengujian motor DC.....	27
Gambar 5.2 : Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0N.m$	29
Gambar 5.3 : Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0N.m$	30
Gambar 5.4 : Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0N.m$	30
Gambar 5.5: Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0,3N.m$	33
Gambar 5.6 : Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0,3N.m$	34
Gambar 5.7 : Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0,3N.m$	34
Gambar 5.8: Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0,5N.m$	37
Gambar 5.9 : Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0,5N.m$	38
Gambar 5.10: Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0,5N.m$	38

Gambar 5.11: Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0,7N.m$	41
Gambar 5.12: Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0,7N.m$	41
Gambar 5.13: Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0,7N.m$	42
Gambar 5.14: Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 1N.m$	44
Gambar 5.15: Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 1N.m$	45
Gambar 5.16: Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 1N.m$	45
Gambar 5.17: Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 1,4N.m$	48
Gambar 5.18: Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 1,4N.m$	48
Gambar 5.19: Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 1,4N.m$	49
Gambar 5.20: Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = acak$	52
Gambar 5.21: Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = acak$	52
Gambar 5.22: Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = acak$	53
Gambar 5.23: Grafik antara torsi beban dan arus jangkar	58

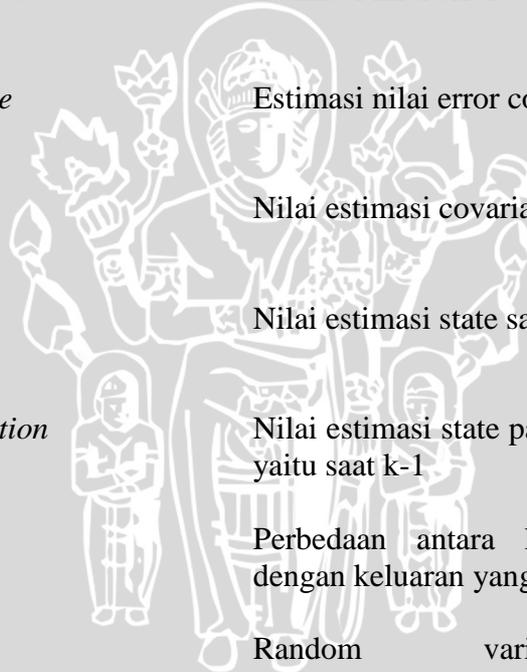
DAFTAR TABEL

Tabel 5.1:	Hasil pengukuran laboratorium.....	29
Tabel 5.2:	Perbandingan nilai arus jangkar saat $t=2$ s.....	31
Tabel 5.3:	Perbandingan nilai arus jangkar saat $t=2$ s.....	36
Tabel 5.4:	Perbandingan nilai arus jangkar saat $t=2$ s.....	40
Tabel 5.5:	Perbandingan nilai arus jangkar saat $t=2$ s.....	43
Tabel 5.6:	Perbandingan nilai arus jangkar saat $t=2$ s.....	47
Tabel 5.7:	Perbandingan nilai arus jangkar saat $t=2$ s.....	50
Tabel 5.8:	Nilai arus jangkar hasil pengujian.....	58



DAFTAR ISTILAH

Nama Istilah	Pengertian
Gain kalman 8, 12, 16	Suatu penguatan yang dihasilkan dari nilai priori dan posteriori pada setiap tahapan waktu yang nilainya berubah mengikuti waktu
<i>Jacobian</i> 10, 11, 24, 25	Turunan parsial pada setiap tahapan waktu untuk melakukan pendekatan linier pada persamaan yang non-linier
<i>Noise covariance</i> 8, 10	Bentuk matriks dari white noise pada sistem
<i>Posteriori error covariance</i> 8, 11	Estimasi nilai error covariance saat k
<i>Priori error covariance</i> 8, 10	Estimasi nilai error covariance saat k-1
<i>Priori covariance</i> 10, 12	Nilai estimasi covariance saat k
<i>Priori state estimation</i> 8	Nilai estimasi state saat k
<i>Posteriori state estimation</i> 8, 10, 26	Nilai estimasi state pada saat sebelum k yaitu saat k-1
<i>Residual</i> 11	Perbedaan antara keluaran estimasi dengan keluaran yang sesungguhnya
<i>White noise</i> 7, 10, 25, 33, 37, 41, 45, 48, 52	Random variable yang mempresentasikan noise dalam suatu plant



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Motor DC adalah salah satu jenis motor yang banyak digunakan dalam dunia industri. Salah satu alasan dalam menggunakan motor DC dalam dunia industri adalah karena kecepatan kerja motor DC lebih mudah diatur daripada motor AC. Motor DC memiliki beberapa jenis yang dapat diklasifikasikan dengan jenis penguatan motor tersebut seperti motor DC dengan penguatan terpisah dan penguatan sendiri. Motor DC yang sering dijumpai adalah motor DC penguatan terpisah, motor DC penguatan shunt dan motor DC seri.

Seperti telah dijabarkan sebelumnya pada paragraf di atas, penggunaan motor DC ini adalah berdasarkan pada pertimbangan pengaturan kecepatannya yang lebih mudah untuk diatur. Pada umumnya pengaturan kecepatan motor DC ini menggunakan tegangan jangkar (semakin tinggi tegangan semakin cepat putaran) dan arus jangkar (semakin kecil arus maka semakin tinggi kecepatan dengan menggunakan umpan balik dari perangkat pengukur kecepatan, seperti *tachogenerator* dan *incremental optical encoder*. Namun penggunaan perangkat ini tentunya menambah biaya yang dibutuhkan untuk pengaturan kecepatan motor, selain itu adanya keterbatasan pada perangkat ini. Pada *tachogenerator*, sinyal output dapat terdistorsi oleh beberapa sebab seperti adanya kontak antara sikat dengan komutator.

Salah satu cara untuk mengurangi kerugian dari sensor tambahan adalah dengan menggunakan observer atau filter dalam mengestimasi umpan balik sebagai masukan untuk mengatur kecepatan. Kalman Filter adalah salah satu metode untuk mengetahui kecepatan motor DC yang berdasarkan pada parameter motor tersebut. Dalam skripsi ini akan dikembangkan suatu sistem kontrol kecepatan motor DC dengan menggunakan estimasi variabel arus jangkar dalam suatu motor DC dengan metode *Extended Kalman Filter*.

I.2 Rumusan masalah

Mengacu pada latar belakang, maka rumusan masalah ditekankan kepada:

1. Bagaimana merencanakan suatu sistem kontrol kecepatan motor DC dengan menggunakan parameter arus jangkar yang ada pada motor DC sebagai masukan pada estimator.
2. Bagaimana merancang Extended Kalman Filter untuk mengestimasi kecepatan motor DC penguat terpisah.
3. Bagaimana mengaplikasikan Extended Kalman Filter sebagai estimator untuk mengatur kecepatan motor DC dalam sebuah simulasi di Matlab.

I.3 Batasan Masalah

Dari rumusan masalah yang dibahas dalam skripsi ini maka dibuat suatu batasan-batasan :

1. Motor DC yang digunakan adalah motor DC penguat terpisah.
2. Spesifikasi dari motor yang digunakan dalam simulasi adalah motor DC yang ada di Laboratorium Elka Daya Teknik Elektro Fakultas Teknik UB (Leybold Didactic 71391).
3. Parameter dari motor DC yang digunakan adalah sesuai dengan kondisi motor pada saat pengambilan data dan berdasarkan pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya.
4. Simulasi sistem ini digunakan dalam program Matlab 7.0.4 dan menggunakan komputer dengan spesifikasi tertentu.

I.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari skripsi ini adalah menerapkan Extended Kalman Filter dalam mengatur kecepatan motor DC penguatan terpisah dalam keadaan konstan.



I.5 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan yang digunakan adalah sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan.

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika penulisan.

BAB II : Tinjauan Pustaka.

Bab ini membahas teori-teori yang digunakan untuk penyelesaian skripsi ini.

BAB III : Metode Kajian.

Bab ini membahas tahapan-tahapan dalam penelitian.

BAB IV : Perancangan

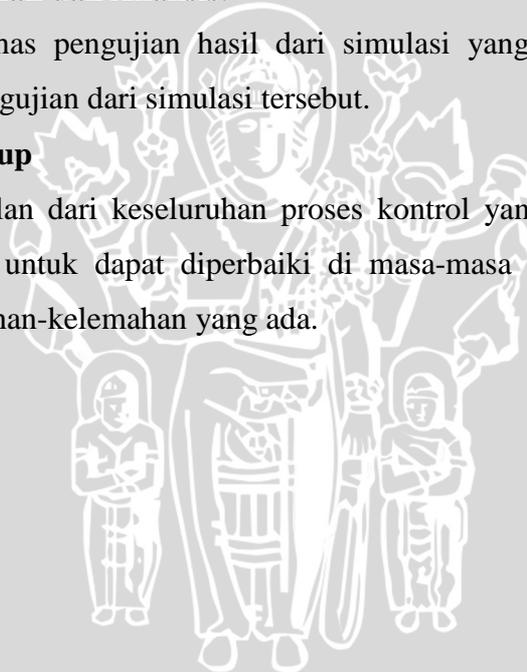
Bab ini membahas perencanaan dan pembuatan perangkat untuk skripsi ini.

BAB V : Pengujian dan Analisis.

Bab ini membahas pengujian hasil dari simulasi yang telah dibuat dan analisis hasil pengujian dari simulasi tersebut.

BAB VI : Penutup

Berupa kesimpulan dari keseluruhan proses kontrol yang telah dijalankan dan saran-saran untuk dapat diperbaiki di masa-masa yang akan datang terhadap kelemahan-kelemahan yang ada.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Motor DC Penguat Terpisah

Motor DC adalah suatu komponen yang merubah energi listrik menjadi energi mekanik. Apabila arus dialirkan pada kumparan jangkar dari mesin arus searah dan kumparan medannya diberi penguatan maka akan timbul gaya Lorentz pada setiap sisi kumparan jangkar tersebut. Besaran gaya Lorentz yang ditimbulkan motor DC adalah sebesar:

$$F = B.i.l$$

Dimana:

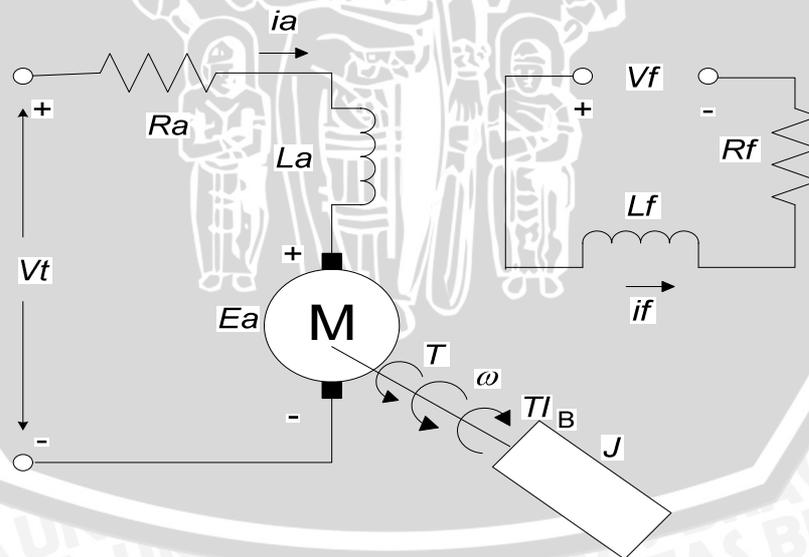
F = Gaya lorentz (dyne)

B = Kerapatan medan magnet (Gauss)

I = Arus (Ampere)

l = Panjang konduktor (cm)

Motor DC yang digunakan dalam skripsi ini adalah motor DC Penguatan Terpisah dengan rangkaian ekivalen sebagai berikut:



Gambar 2.1. Rangkaian ekivalen motor DC penguatan terpisah

Sumber: AE. Fitzgerald, Mesin-Mesin Listrik, 1990.

Persamaan Kirchhoff untuk motor DC penguatan terpisah pada bagian jangkar adalah sebagai berikut:

$$V_t = E_a + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$E_a = K_m \omega_m |\sin \omega_m| \quad (2.1)$$

Dari persamaan (2.1) apabila semua suku dibagi dengan R_a didapat suatu persamaan differensial untuk i_a :

$$\frac{L_a}{R_a} di_a = \tau_a di_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} - i_a$$

(AE. Fitzgerald, 1990)

dengan $\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$, yang disebut dengan tetapan waktu listrik

(electrical time constant) dari rangkaian jangkar.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_t - E_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} i_a \quad (2.2)$$

dimana:

K_m = Konstanta Mesin (N.m/A)

V_t = Tegangan sumber (volt)

E_a = Tegangan jangkar (volt)

R_a = Tahanan jangkar (ohm)

L_a = Induktansi jangkar (henry)

i_a = Arus jangkar (ampere)

ω_m = Kecepatan motor (rad/s)

Sedangkan analisa untuk persamaan tegangan rangkaian medan pada motor DC penguatan terpisah adalah:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2.3)$$

Dengan menyusun kembali persamaan (2.3) didapat persamaan differensial untuk arus medan:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{R_f}{L_f} \left(\frac{V_f}{R_f} - i_f \right)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{V_f}{L_f} - \frac{R_f}{L_f} i_f \quad (2.4)$$

dimana:

V_f = Tegangan medan (volt)

R_f = Tahanan pada medan (ohm)

L_f = Induktansi pada medan (henry)

i_f = Arus medan (ampere)

Pada pengoperasian motor DC penguat terpisah, tegangan medan (V_f) dihubungkan ke sumber DC terlebih dahulu sebelum tegangan sumber (V_t) sehingga analisa motor DC penguat terpisah dalam skripsi ini adalah arus dan sumber pada rangkaian medan adalah konstan.

Persamaan dinamik pada motor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T = K_m i_a i_f \quad (2.5)$$

$$E_a = K_m \omega_m |\sin \omega_m| \quad (2.6)$$

$$K_m = K_f i_f$$

(AE. Fitzgerald, 1990)

Dari persamaan (2.6) dapat disusun kembali persamaan (2.1):

$$V_t = K_m \omega_m |\sin \omega_m| + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.7)$$

Dan persamaan torsi untuk motor dengan menggunakan beban adalah sebagai berikut:

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_l$$

$$K_f i_f i_a = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_l \quad (2.8)$$

dimana:

T = Torsi motor (N.m)

T_l = Torsi beban (N.m)

K_f = Konstanta elektrik motor

J = Momen inersia dari motor dan beban (kg.m²)

B = Koefisien gesekan viskos (N.m.s)

Sehingga dapat disusun persamaan differensial untuk motor DC penguat terpisah dari (2.7) dan (2.8):

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{K_m \omega_m |\sin \omega_m| + i_a R_a + V_t}{L_a}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_f i_f i_a - B\omega_m - T_l}{J} \quad (2.9)$$

(M.A. Muslim, 2002)

II.2 Kalman Filter

Pada tahun 1960 R.E. Kalman mempublikasikan paper yang dikenal dengan Kalman Filter. Kalman Filter adalah suatu set persamaan matematis yang berulang (*recursive*) untuk mengestimasi state dalam suatu proses dengan cara meminimalisasi error rata-rata. Filter ini unggul dalam beberapa aspek, seperti dalam mengestimasi keadaan saat lalu (x^{0-}), sekarang (x^0), dan yang akan datang (x^{0+}). Filter ini bahkan dapat melakukan estimasi tanpa mengetahui dengan pasti model dari sistem yang sesungguhnya.

(Mohinder S., 2001)

Kalman Filter mengestimasi state pada suatu plant yang dimodelkan dalam suatu persamaan matematis:

$$x_k = Ax_{k-1} + w_{k-1} \quad (2.10)$$

Dengan suatu persamaan pengukurannya (*measurement*):

$$z_k = Hz_{k-1} + v_k \quad (2.11)$$

Dimana w_k dan v_k mempresentasikan *white noise* dalam plant dan persamaan measurement. Dimana w_k dan v_k diasumsikan independen, white dan memiliki nilai:

$$p(w) \sim N(0, Q)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (2.12)$$

Dimana Q dan R adalah *noise covariance* yang berbentuk matrik dan diasumsikan konstan.

Untuk mengestimasi error didefinisikan suatu *priori error estimation* (e_k^-) dan *posteriori error estimation* (e_k) dalam persamaan:

$$\begin{aligned} e_k^- &= x_k - \hat{x}_k^- \\ e_k &= x_k - \hat{x}_k \end{aligned} \quad (2.13)$$

Sehingga didapat estimasi *priori error covariance*:

$$P_k^- = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (2.14)$$

Dan estimasi *posteriori error covariance*:

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (2.15)$$

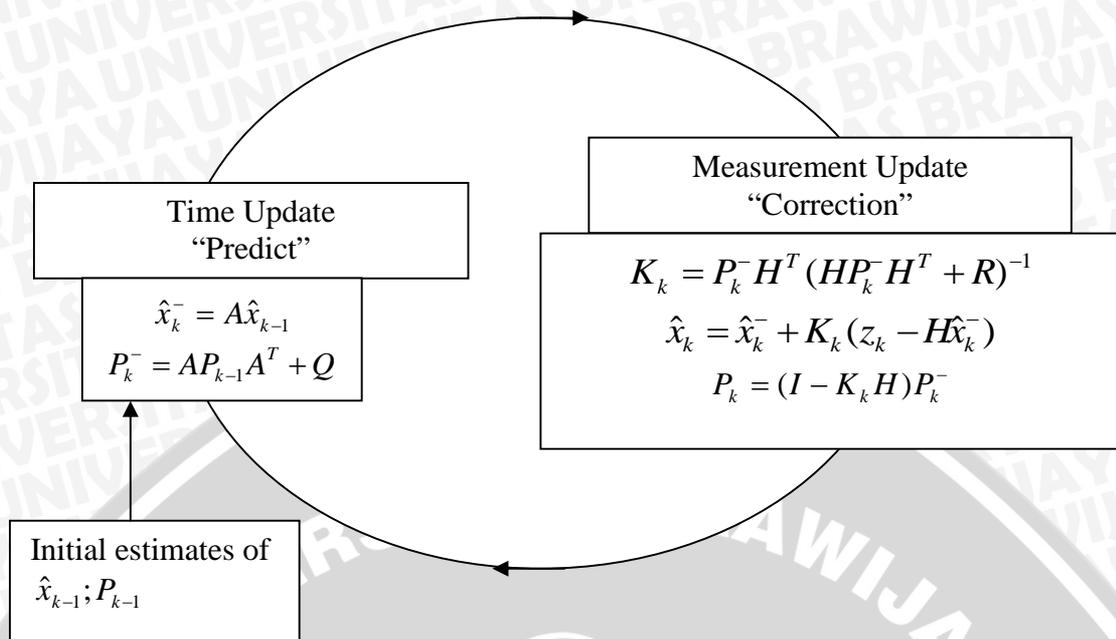
Dalam menentukan persamaan untuk menyelesaikan Kalman Filter, dimulai dengan merumuskan suatu persamaan yang menghitung *posteriori state estimation* (\hat{x}_k) sebagai kombinasi linier dari *priori state estimation* (\hat{x}_k^-) dan perbedaan antara perhitungan sebenarnya (z_k) dengan estimasi perhitungan ($H\hat{x}_k^-$) dikalikan dengan Gain Kalman.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (2.16)$$

Untuk menentukan besarnya Gain Kalman (K_k) adalah:

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (2.17)$$

Dari persamaan diatas dapat disusun suatu loop untuk menggambarkan bagaimana Kalman Filter mengestimasi state:



Gambar 2.2. Siklus Kalman Filter

Sumber: Welch & Bishop, An Introduction to the Kalman Filter, 2006.

II.3 Extended Kalman Filter

Extended Kalman Filter (EKF) adalah suatu cara untuk mengaplikasikan sistem yang nonlinier pada Kalman Filter. Berbeda dengan Kalman Filter, EKF bukan merupakan optimal filter, karena perhitungannya berdasarkan pada pendekatan yang dilakukan filter ini kepada model sistem non-linier yang digunakan.

(Welch & Bishop, 2006)

Jika diberikan suatu persamaan nonlinier dari model:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, w_{k-1}) \tag{2.18}$$

$$w_k \sim N(0, Q_k)$$

dengan persamaan pengukurannya adalah :

$$z_k = h(x_{k-1}, v_{k-1}) \tag{2.19}$$

$$v_k \sim N(0, R_k)$$

w_k dan v_k adalah *random variabel* yang mempresentasikan error pada plant dan measurement. Matrik Q dan R adalah *noise covariance* dari sistem dan merupakan definit positif.

Dalam kenyataan yang sesungguhnya tidak dapat dapat diketahui nilai dari matriks Q dan R. Namun, untuk perhitungan awal state dan pengukuran dapat diasumsikan bahwa matriks Q dan R bernilai 0. Sehingga persamaan (2.18) dan (2.19) menjadi:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_k &= f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}, 0) \\ \tilde{z}_k &= h(\hat{x}_{k-1}, 0)\end{aligned}\tag{2.20}$$

Dimana \hat{x}_k *posteriori state estimation* dari state sebelumnya ($k-1$).

Dalam mengimplementasikan sistem nonlinier pada Kalman Filter, persamaan (2.18) dan (2.19) disusun ulang dengan proses pendekatan linier pada persamaan model:

$$\begin{aligned}x_k &\approx \tilde{x}_k + A(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + Ww_{k-1} \\ z_k &\approx \tilde{z}_k + H(x_k - \tilde{x}_k) + Vv_k\end{aligned}\tag{2.21}$$

Dimana:

- x_k dan z_k adalah state dan vektor pengukuran yang sebenarnya.
- \tilde{x}_k dan \tilde{z}_k adalah prediksi state dan vektor pengukuran dari persamaan (2.20).
- \hat{x}_k adalah *posteriori state* saat k .
- w_k dan v_k adalah *random variabels* yang mempresentasikan *white noise* dalam persamaan (2.12).
- A adalah matriks *Jacobian* dari turunan parsial f terhadap x .

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

- W adalah matriks *Jacobian* dari turunan parsial f terhadap w .

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

- H adalah matriks *Jacobian* dari turunan parsial h terhadap x .

$$H_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}}(\hat{x}_k, 0)$$

- V adalah matriks *Jacobian* dari turunan parsial h terhadap v .

$$V_{[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial v_{[j]}}(\hat{x}_k, 0)$$

Persamaan untuk prediksi error:

$$\tilde{e}_{xk} = x_k - \tilde{x}_k \tag{2.22}$$

Dan untuk *residual* pengukuran (perbedaan antara keluaran estimasi dengan keluaran yang sesungguhnya):

$$\tilde{e}_{zk} = z_k - \tilde{z}_k \tag{2.23}$$

Dengan menggunakan persamaan (2.22) dan (2.23) dituliskan persamaan baru dari *error process* sebagai:

$$\begin{aligned} \tilde{e}_{xk} &\approx A(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + \varepsilon_k \\ \tilde{e}_{zk} &\approx H\tilde{e}_{xk} + \eta_k \end{aligned} \tag{2.24}$$

Dimana ε_k dan η_k merupakan representasi *random variabel* berupa matriks WQW^T dan VRV^T .

$$\begin{aligned} p(\tilde{e}_{xk}) &\sim N(0, E[\tilde{e}_{xk} \tilde{e}_{xk}^T]) \\ p(\varepsilon_k) &\sim N(0, WQ_k W^T) \\ p(\eta_k) &\sim N(0, VR_k V^T) \end{aligned}$$

Persamaan (2.24) adalah persamaan linier dan telah mendekati persamaan differensial linier dari model serta persamaan pengukuran yang dapat diaplikasikan dalam discrete Kalman Filter. Nilai dari *posteriori error covariance* adalah hasil dari pengukuran dikurangi dengan hasil *posteriori estimate* sesuai persamaan (2.23). Sehingga dapat kita gunakan persamaan (2.22) sebagai perhitungan untuk menghitung *posteriori error covariance* pada sistem non-linier.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \tilde{x}_k + \hat{e}_k \\ \hat{e}_k &= K_k \tilde{e}_{zk} \\ \hat{x}_k &= \tilde{x}_k + K_k \tilde{e}_{zk} \end{aligned} \tag{2.25}$$

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k(z_k - \tilde{z}_k) \tag{2.26}$$

Persamaan untuk mengestimasi *priori covariance* adalah:

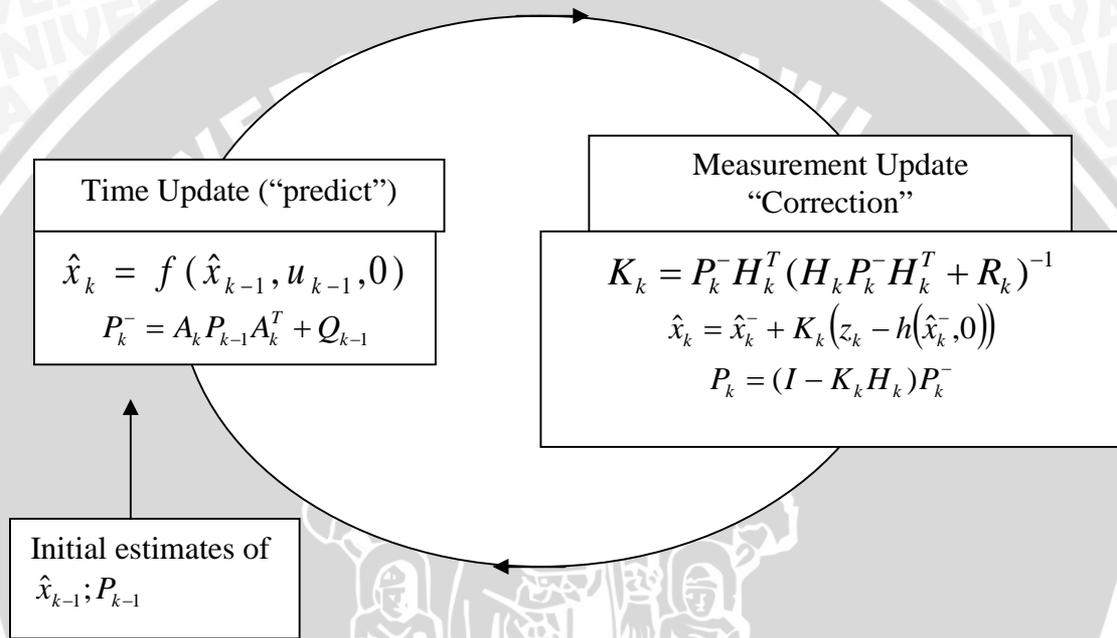
$$P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T \tag{2.27}$$

Dengan persamaan gain kalman:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + V_k R_k V_k^T)^{-1} \tag{2.28}$$

Sehingga didapat persamaan *posteriori covariance*:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \tag{2.29}$$



Gambar 2.3. Siklus EKF

Sumber: Welch & Bishop, An Introduction to the Kalman Filter, 2006.

II.4 Konsep State Space

Proses pemodelan sistem akan selalu dilakukan dalam mendesain sistem kontrol. Model sistem dapat berupa diagram blok, diagram sinyal maupun dalam bentuk persamaan matematis. Model matematis sebuah sistem didefinisikan sebagai kumpulan informasi dalam bentuk persamaan matematis yang mewakili sistem yang dimaksud. Kebanyakan sistem yang dibahas merupakan sistem yang dimodelkan



dalam bentuk persamaan differensial linier yang berubah terhadap waktu (*Linier Time Invariant*). Melalui persamaan tersebut dapat diperoleh hubungan input-output melalui fungsi alihnya yang diselesaikan dengan metode Laplace.

Dari sekian metode untuk melakukan pemodelan terhadap sistem, ada suatu metode yang dikenal sebagai metode ruang keadaan (state space). Model ini merupakan persamaan differensial yang ditulis dalam bentuk spesifik. Model ruang keadaan merupakan sekumpulan persamaan differensial orde satu yang saling berhubungan dan ditulis dalam notasi matriks vektor.

Bentuk umum ruang keadaan (state space) sebuah sistem adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{2.30}$$

(Philips C, 1997)

dimana:

$x(t)$ = vektor state (n -vektor)

$u(t)$ = vektor kontrol (n -vektor)

$y(t)$ = vektor output (n -vektor)

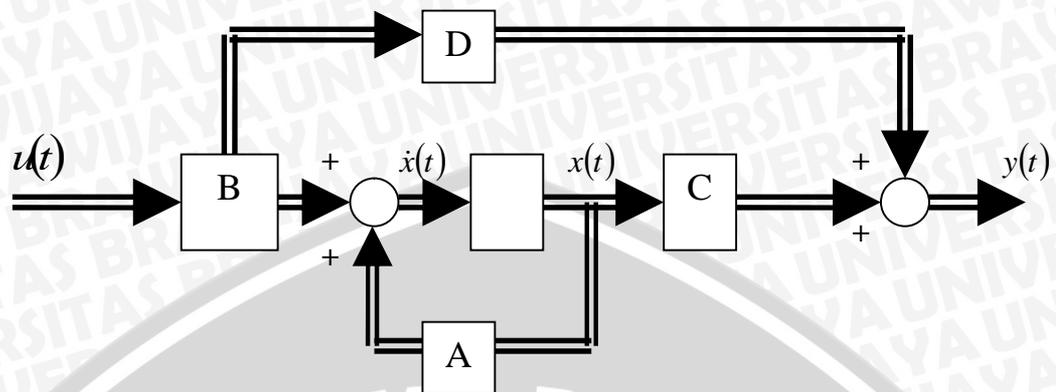
A = matriks orde $n \times n$

B = matriks orde $n \times m$

C = matriks orde $p \times n$

D = matriks orde $p \times n$

Dalam persamaan ini, persamaan diferensial dari sistem yang semula berorde n diubah menjadi n buah persamaan differensial berorde satu secara simultan, ditulis dalam notasi vektor matriks.



Gambar 2.4. Representasi sistem dalam bentuk persamaan state

Sumber: Katsuhiko Ogata, Teknik Kontrol Automatik, 1997.

Metode ruang keadaan banyak digunakan dalam menganalisa sistem, karena mempunyai banyak keunggulan seperti:

- Notasinya mudah, kompak dan dapat dibentuk menjadi persamaan matriks vektor
- Dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dan sifat sistem dengan tepat.

II.5 Konsep State Space Dalam Waktu Diskrit

Jika kita ingin menghitung persamaan state space $x(t)$ dengan menggunakan komputer digital, maka kita harus mengubah persamaan state space kontinyu tersebut menjadi persamaan state space dalam waktu diskrit.

Dalam membuat persamaan state space diskrit kita menganggap bahwa vektor masukan $u(t)$ hanya berubah pada selang waktu pencacahan yang tetap (operasi pencacahan yang dimaksud disini adalah khayal). Kita menurunkan keadaan waktu diskrit yang menghasilkan harga eksak pada $t = kT, k = 0,1,2,3,\dots$

(Ogata K, 1997)

Diberikan persamaan waktu kontinyu:

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{2.31}$$

Dengan menggunakan notasi k dan $(k+1)T$, bukan lagi k dan $k+1$, maka bentuk persamaan waktu diskrit dari persamaan (2.31) akan menjadi seperti:

$$x((k+1)T) = G(T)x(kT) + H(T)u(kT) \tag{2.32}$$

Perlu diingat bahwa matriks G dan H bergantung pada periode cacah T . Setelah periode cacah (T) ditentukan maka matriks G dan H akan menjadi konstan.

Untuk menentukan nilai $G(T)$ dan $H(T)$ dengan menggunakan persamaan (2.31):

$$x(t) = e^{At}x(0) + e^{At} \int_0^t e^{-A\tau} Bu(\tau) d\tau$$

Kita anggap bahwa semua komponen $u(t)$ adalah konstan di seluruh selang antara dua saat pencacahan yang berurutan, atau $u(t)=u(kT)$ untuk periode cacah ke k , karena:

$$x((k+1)T) = e^{A(k+1)T}x(0) + e^{A(k+1)T} \int_0^{(k+1)T} e^{-A\tau} Bu(\tau) d\tau \tag{2.33}$$

dan

$$x(kT) = e^{AkT}x(0) + e^{AkT} \int_0^{kT} e^{-A\tau} Bu(\tau) d\tau \tag{2.34}$$

Dengan mengalikan persamaan (2.34) dengan e^{AT} dan mengurangkannya dari persamaan (2.33), diperoleh:

$$\begin{aligned} x((k+1)T) &= e^{AT}x(kT) + e^{A(k+1)T} \int_{kT}^{(k+1)T} e^{-A\tau} Bu(\tau) d\tau \\ &= e^{AT}x(kT) + e^{AT} \int_0^T e^{-A\lambda} Bu(kT) d\lambda \\ &= e^{AT}x(kT) + \int_0^T e^{A\lambda} Bu(kT) d\lambda \end{aligned} \tag{2.35}$$

Dimana $\lambda = T - t$, jika kita definisikan:

$$G(T) = e^{AT}$$



$$H(T) = \left(\int_0^T e^{At} dt \right) B$$

Kemudian persamaan (2.35) akan menjadi:

$$x((k+1)T) = G(T)x(kT) + H(T)u(kT) \quad (2.36)$$

(Ogata K, 1997)

II.6 Bahasa Komputasi Teknik MATLAB

MATLAB adalah bahasa pemrograman dengan kinerja tinggi untuk komputasi teknikal. Di dalam MATLAB terintegrasi kemampuan komputansi, visualisasi dan pemrograman dalam suatu lingkungan yang mudah untuk digunakan karena permasalahan dan pemecahannya dinyatakan dalam notasi matematika yang umum. Kegunaan MATLAB secara umum adalah:

- Matematika dan komputasi
- Pengembangan algoritma
- Pengolahan data
- Pemodelan, simulasi dan pembuatan prototype
- Analisis data, eksplorasi dan visualisasi
- Pembuatan aplikasi, termasuk pembuatan grafis antarmuka

Nama MATLAB merupakan singkatan dari *matrix laboratory*. Pada awalnya MATLAB ditulis untuk menyediakan kemudahan mengakses matriks. *Software* ini dikembangkan oleh proyek LINPACK dan EISPACK, yang bersama-sama menyediakan *software* untuk komputasi matriks. Dalam perkembangannya, MATLAB tidak hanya sekedar untuk mengakses matriks dengan banyaknya *toolbox* yang disediakan.

Toolbox yang ada di dalam MATLAB adalah perpustakaan fungsi MATLAB (*m-file*) yang membantu MATLAB untuk memecahkan suatu kelompok permasalahan. *Toolbox* ditulis dalam bahasa MATLAB sehingga dapat dilihat algoritma sumber dan ditambahkan *toolbox* baru bila diperlukan. Bidang-bidang yang dimungkinkan memanfaatkan

toolbox MATLAB meliputi: *control system, neural networks, fuzzy logic, simulation* dan lain sebagainya.

Matlab terdiri dari lima sistem utama yaitu Development Environment, The Matlab Mathematical Function Library, The Matlab Language, Graphics dan The Matlab External Interfaces.



BAB III

METODE KAJIAN

Skripsi ini adalah perancangan sistem dalam bentuk simulasi melalui perhitungan parameter yang sesungguhnya pada plant yang akan digunakan. Dalam penyusunan skripsi ini digunakan metode sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari buku-buku dan literatur yang berkaitan dengan teori motor DC penguat terpisah dengan analisa yang non-linier, konsep Kalman Filter dan Extended Kalman Filter, dan aplikasi Matlab.

2. Pengambilan data yang diperlukan

Dilakukan untuk menentukan besarnya variabel yang digunakan sebagai dasar estimasi. Pengambilan data ini dilakukan dengan melihat *manual instruction book* dari motor yang akan digunakan dan juga dengan melakukan pengukuran secara langsung.

Data yang diperlukan dalam skripsi ini adalah:

Tahanan jangkar, induktansi jangkar, konstanta mesin, besar tegangan sumber dan medan, serta beberapa parameter lain yang digunakan untuk menganalisa motor DC.

3. Analisa data

Analisis data dilakukan setelah data pada langkah (2) telah terkumpul data yang dibutuhkan. Analisis data juga diperlukan karena masing-masing motor DC memiliki karakter dan besaran komponen yang berbeda-beda di setiap motor. Selain itu, parameter motor DC yang digunakan dalam skripsi ini tidak mencakup total semua parameter.

Sehingga, analisis data diperlukan untuk mengetahui parameter digunakan dan untuk meringkas parameter yang dapat disederhanakan.

4. Pembuatan simulasi sistem

Setelah terdapat data yang diperlukan beserta analisisnya, maka sistem dapat dibuat dalam suatu model untuk disimulasikan.

5. Pengujian sistem

Pengujian secara real adalah pengujian langsung terhadap motor, dimana pada setiap kondisi beban dan kecepatan yang diinginkan dicatat hasilnya sebgagai perbandingan untuk hasil simulasi yang telah dibuat.

Pengujian simulasi sistem adalah pengujian terhadap simulasi yang telah dibuat.

Pengujian simulasi sistem dan pengujian secara real disini untuk mengetahui perbandingan antara hasil simulasi dengan sistem secara *real* sehingga dapat diketahui hasil dari simulasi ini.

6. Pembuatan kesimpulan dan saran

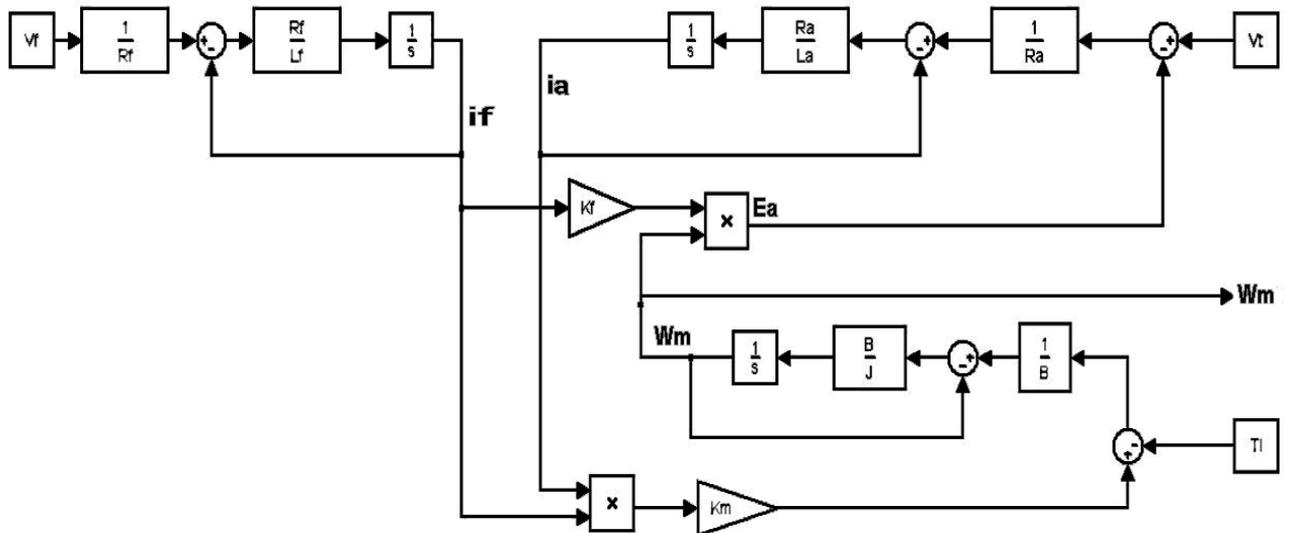
Kesimpulan dan saran disusun untuk menjelaskan bagaimana hasil dari sistem yang telah dibuat dan juga sebagai evaluasi terhadap sistem pengaturan ini serta sebagai tambahan bila penelitian terhadap sistem ini dikembangkan.



BAB IV PERANCANGAN

IV.1 Pemodelan Motor DC Penguat Terpisah

Dari Bab II tentang motor DC penguat terpisah maka kita dapat menyusun blok diagram sebagai berikut:



Gambar 4.1. Diagram blok motor DC penguat terpisah dalam *Simulink*

Sumber: Molekyutti George, Speed Control of SEDM, 2008.

Dari diagram blok diatas, diketahui:

V_f = Tegangan sumber (volt)

E_a = Tegangan jangkar (volt)

R_a = Tahanan jangkar (ohm)

K_m = Konstanta Mesin (N.m/A)

L_a = Induktansi jangkar (henry)

i_a = Arus jangkar (ampere)

V_f = Tegangan medan (volt)

R_f = Tahanan pada medan (ohm)

L_f = Induktansi pada medan (henry)

i_f = Arus medan (ampere)

ω_m = Kecepatan motor (rad/s)

J = Momen inersia dari motor dan beban (kg.m²)

B = Koefisien gesekan viskos (N.m.s)

Analisa motor DC yang dilakukan adalah bahwa rangkaian medan terlebih dahulu disambungkan pada sumber DC sebelum tegangan sumber maka tegangan medan dan arus yang ada pada bagian medan motor DC diasumsikan konstan.

IV.1.1 Persamaan State Space Motor DC Penguat Terpisah

Persamaan state space untuk motor DC penguat terpisah dapat disusun dari persamaan (2.9):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Dv \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_m |\sin x_2|}{L_a} \\ \frac{K_f i_f}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$[y] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + [0]v \tag{4.2}$$

Persamaan state space di atas adalah persamaan state space dalam waktu kontinyu. Dalam skripsi ini, analisa yang dilakukan adalah dalam waktu diskrit. Dimana, persamaan state space dalam waktu diskrit untuk model motor DC di atas akan dibahas dalam sub-bab selanjutnya.

IV.1.2 Parameter Motor DC Penguat Terpisah

Pengambilan parameter motor dilakukan dengan melakukan melihat pada *nameplate* motor dan pengukuran langsung pada motor serta pengambilan data terhadap penelitian sebelumnya.

Parameter yang dapat didapat *nameplate* motor adalah sebagai berikut:

P = 300 watt

e_a = 220 volt

$$V_t = 220 \text{ volt}$$

$$V_f = 220 \text{ volt}$$

$$i_a = 2,2 \text{ ampere}$$

$$i_f = 0,45 \text{ ampere}$$

$$n = 2000 \text{ rpm}$$

Motor yang digunakan adalah motor jenis shunt Leybold Didactic type 71391.

Berdasarkan pada penelitian yang dilakukan sebelumnya terhadap mototr DC yang digunakan:

$$R_a = 11,846 \text{ ohm}$$

$$L_a = 0,939 \text{ henry}$$

$$R_f = 392,322 \text{ ohm}$$

$$L_f = 12,253 \text{ henry}$$

$$K_m = 1,870$$

$$K_f = 1,667$$

(Nyoman S, 2005)

Parameter yang dapat didapat dari hasil pengukuran langsung adalah sebagai berikut:

$$J = 0,1 \text{ kg.m}^2$$

$$B = 0,001 \text{ N.m.s}$$

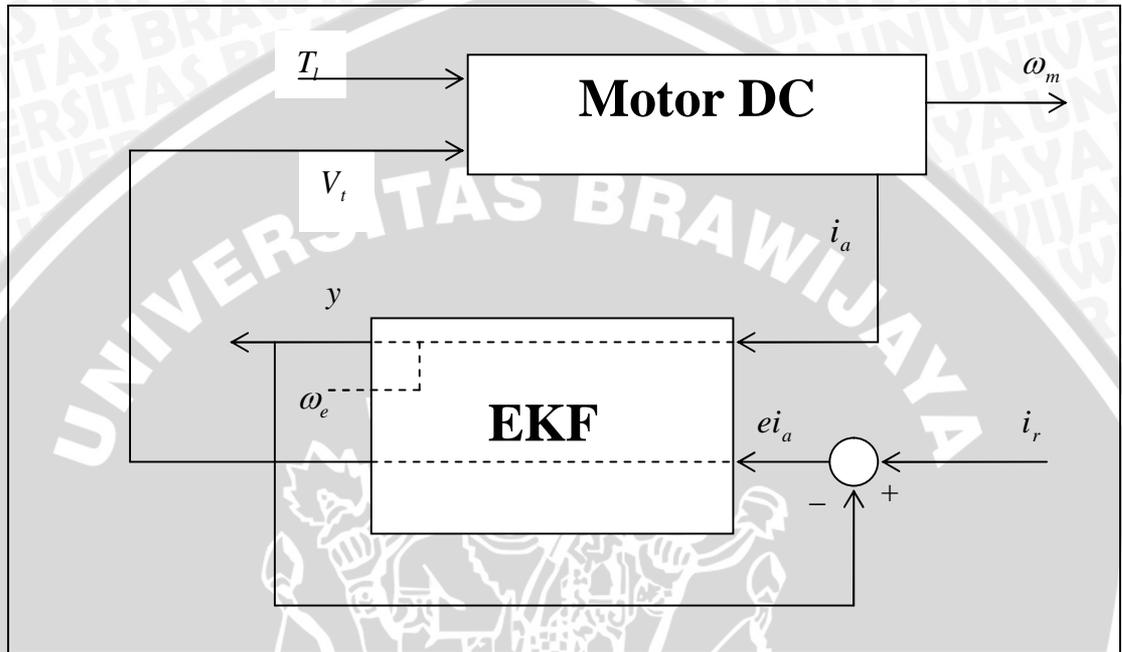
IV.2 Perancangan Sistem

Dari diagram blok motor DC penguat terpisah pada gambar 3 dapat disusun sistem kontrol menggunakan EKF dengan mengaplikasikan parameter arus jangkar sebagai masukan EKF untuk menentukan estimasi kecepatan dari motor yang digunakan sebagai umpan baik.

Analisa motor DC yang digunakan adalah dengan mengasumsikan arus medan konstan, dan parameter yang digunakan sebagai state adalah arus jangkar.

Variabel yang dikontrol adalah kecepatan motor (ω_m) dengan mengatur tegangan sumber (V_t) untuk mendapatkan nilai arus jangkar (i_a).

Dengan menambahkan blok untuk EKF maka gambar 3 akan menjadi seperti di bawah ini:



Gambar 4.2. Perancangan sistem

Sumber: Perancangan

Variabel y adalah arus jangkar measurement EKF dari motor (ampere), i_r adalah arus referensi. Sedangkan ei_a adalah error antara arus referensi dengan arus jangkar measurement EKF. Variabel i_r adalah variabel yang didapat dari perhitungan terhadap kecepatan referensi (ω_r).

Persamaan matematis untuk diagram blok perancangan di atas:

$$i_r(t) = \frac{B\omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} + T_l}{K_f i_f} \quad (4.3)$$

Besarnya arus jangkar referensi bergantung pada nilai T_l yang berubah terhadap waktu dan diketahui perubahannya.

Nilai T_l adalah torsi beban yang diberikan kepada motor ($N.m$).

Besarnya V_t adalah:

$$V_t = E_a + R_a i_r + L_a \frac{di_r}{dt}$$

$$V_t(t) = K_m \omega_e |\sin \omega_e| + (e_{i_a} + y) R_a + L_a \frac{d(e_{i_a} + y)}{dt} \quad (4.4)$$

Penyusunan persamaan untuk sistem secara keseluruhan:

$$u_1 = V_t$$

$$u_2 = T_l$$

$$y_1 = x_1 = i_a$$

$$x_1 = i_a = \frac{V_t - E_a - L_a \frac{di_a}{dt}}{R_a}$$

$$x_2 = \omega_m = \frac{K_f i_f}{B} i_a - \frac{J}{B} \frac{d\omega_m}{dt} - \frac{T_l}{B}$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_t}{L_a} - \frac{E_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} i_a$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{V_t}{L_a} - \frac{K_m |\sin \omega|}{L_a} \omega_m - \frac{R_a}{L_a} i_a$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B}{J} \omega_m + \frac{K_f i_f}{J} i_a - \frac{1}{J} T_l$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{R_a}{L_a} x_1 - \frac{K_m |\sin x_2|}{L_a} x_2 + \frac{1}{L_a} u_1$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K_f i_f}{J} x_1 - \frac{B}{J} x_2 - \frac{1}{J} u_2 \quad (4.5)$$

Penerapan sistem yang non-linier pada Extended Kalman Filter (EKF) adalah dengan menerapkan proses pe-linieran sistem dengan cara menjadikan model sistem menjadi fungsi dalam matriks *Jacobian*.

(Welch & Bishop, 2006)

Dari sub bab sebelumnya telah dimodelkan sistem dalam persamaan matematis yang merupakan *time update* dari siklus EKF.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\frac{R_a}{L_a}x_1 - \frac{K_m|\sin x_2|}{L_a}x_2 + \frac{u_1}{L_a} \\ \dot{x}_2 &= \frac{K_f i_f}{J}x_1 - \frac{B}{J}x_2 - \frac{1}{J}u_2\end{aligned}\quad (4.6)$$

Persamaan state space di atas adalah persamaan dalam fungsi *continuous* (t), untuk mengimplementasikan persamaan tersebut dalam fungsi waktu diskrit (k).

Dari persamaan (4.6) diberikan persamaan state space yang disusun ulang dengan menambahkan *white noise*:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= h(x(t)) + v(t)\end{aligned}\quad (4.7)$$

Dimana $w(t)$ dan $v(t)$ adalah besarnya *white noise*.

Matriks Jacobian untuk persamaan ini didefinisikan sebagai $A(t)$ dan $C(t)$:

$$\begin{aligned}A(t) &= \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_m|\cos x_2|}{L_a} \\ \frac{K_f i_f}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \\ C(t) &= \frac{\partial h}{\partial x} = [1 \quad 0]\end{aligned}$$

Dalam persamaan diskrit dengan waktu sampling T dituliskan persamaan (4.7) sebagai persamaan:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= \Phi_k x_k + G_k u_k + w_k \\ y_k &= C_k x_k + v_k\end{aligned}\quad (4.8)$$

Dimana:

Φ_k adalah *state transition matrix* $\Phi_k = I + C_k T$

$G_k = BT$

$C_k = C(t)$

w_k dan v_k adalah *white noise* dalam waktu diskrit yang besarnya besarnya sesuai dengan matiks Q dan R dimana nilainya selalu berubah pada setiap waktu sampling..

Persamaan (4.8) bila dituliskan ulang dengan memasukkan Φ_k , G_k ,

C_k dan nilai Q dan R adalah:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + A_k x_k T + G_k u_k + Q_k \\ y_k &= C_k x_k + R_k \end{aligned} \quad (4.9)$$

Dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_m \cos x_2}{L_a} \\ \frac{K_f i_f}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} x_k T + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} u_k T + Q_k \\ y_k &= [1 \quad 0] x_k + R_k \end{aligned} \quad (4.10)$$

Sehingga persamaan keadaan dapat diaplikasikan dalam Discrete EKF dengan “time update equation”:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= \hat{x}_{k-1} + A_{k-1} \hat{x}_{k-1} T + G_k u_{k-1} \\ P_k^- &= A_k P_{k-1} A_k^T + Q_{k-1} \end{aligned} \quad (4.11)$$

\hat{x}_k^- adalah ” *prerori state estimation*” dan P_k^- adalah ”*prerori covariance*” dari EKF.

Sedangkan persamaan “measurement update equation” dari siklus EKF adalah:

$$\begin{aligned} K_k &= P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0)) \\ P_k &= (I - K_k C) P_k^- \end{aligned} \quad (4.12)$$

K_k adalah Gain Kalman, \hat{x}_k merupakan “*posteriori state estimation*” dan P_k adalah “*posteriori covariance*” dari EKF.

BAB V

PENGUJIAN DAN ANALISA

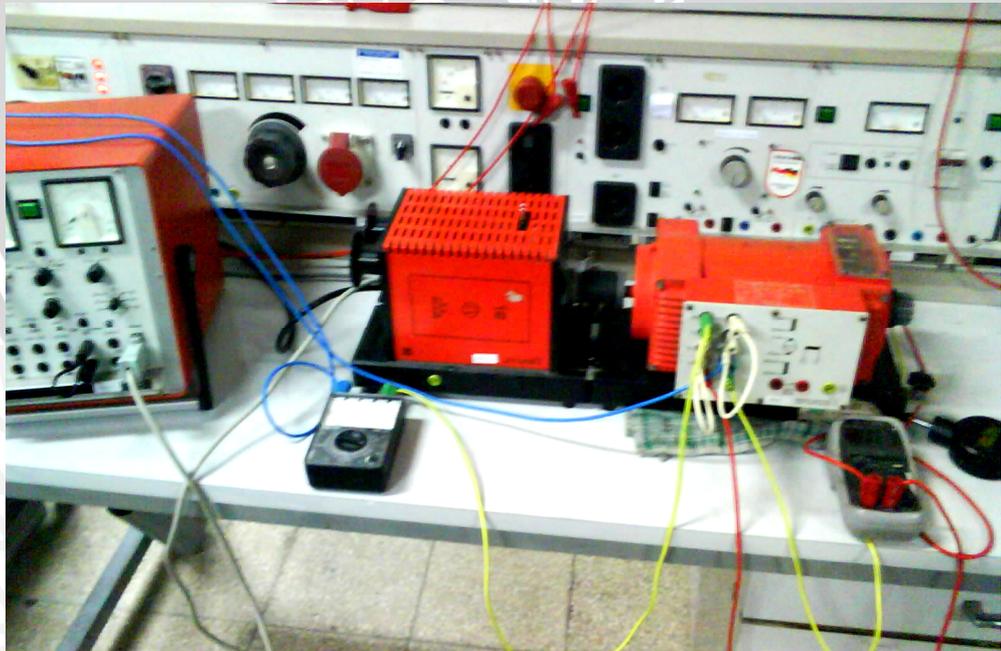
V.1 Umum

Dalam bab ini akan dibahas mengenai sistem yang telah dirancang pada bab sebelumnya, serta pengujian pada alat yang sesungguhnya dan analisa terhadap simulasi sistem yang telah dibuat.

V.2. Pengujian Motor DC Penguat Terpisah Secara Langsung

Pengujian ini dilakukan di Lab. Elka Daya Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Peralatan yang digunakan adalah:

1. Motor DC shunt Leybold Didactic GMBH 0,3 KW type 71391
2. Magnetic Power Breaker MAG 71384
3. Control Unit 0.3 K 72588
4. Sumber DC
5. AVO meter
6. Tachometer



Gambar 5.1. Rangkaian pengujian motor DC

Sumber: Pengujian

Pengoperasian Motor DC penguat terpisah adalah dengan menghubungkan terlebih dahulu rangkaian medan, sehingga dianggap arus medan akan menjadi konstan. Dalam pengujian ini, diatur arus medan (i_f) sebesar 0,45 A. Pengujian yang dilakukan tidak memperhatikan waktu, yang dimaksudkan disini adalah tidak mencatat perubahan arus dan kecepatan dalam satuan waktu. Sehingga dapat disimpulkan pengujian yang dilakukan adalah pengujian ketika motor telah mencapai kondisi *steady-state*.

Magnetic Power Breaker digunakan sebagai pengatur torsi beban. Sedangkan *tachometer* adalah untuk mengetahui kecepatan motor DC (rpm).

Langkah yang pertama dilakukan dalam pengujian ini adalah menyambungkan sumber medan, kemudian mensetting arus medan (i_f) sebesar 0,45 A dengan mengatur sumber yang dihubungkan pada bagian medan dari motor. Kemudian mengatur besarnya torsi menggunakan *Magnetic Power Breaker* yang dihubungkan dengan *Control Unit*. Setelah besarnya torsi yang diharapkan tercapai maka sumber tegangan motor diatur hingga didapatkan putaran yang diinginkan melalui *tachometer* dan besarnya nilai arus jangkar dicatat.

Secara sistematis dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Hubungkan rangkaian medan, atur tegangan sumber pada bagian medan sehingga didapat arus medan sebesar 0,45 A.
2. Atur besarnya torsi beban melalui *Control Unit* yang terhubung dengan *Magnetic Power Breaker* sesuai dengan torsi beban yang diinginkan.
3. Atur tegangan sumber pada bagian jangkar motor sampai kecepatan motor DC yang diinginkan tercapai.
4. Hitung arus pada bagian jangkar melauai ampere meter.

Hasil pengujian langsung terhadap motor DC ini adalah sebagai berikut:

Tabel 5.1. Hasil pengukuran laboratorium

Sumber: Pengujian

No.	ω (rad/s)	n (rpm)	i_a (A)	T_l (N.m)	V_t (V)
1	200	1909	0,21	0	195
2	198	1900	0,69	0,3	202
3	200	1910	0,94	0,5	208
4	199	1905	1,23	0,7	210
5	201	1911	1,52	1	216
6	198	1901	2,16	1,4	228

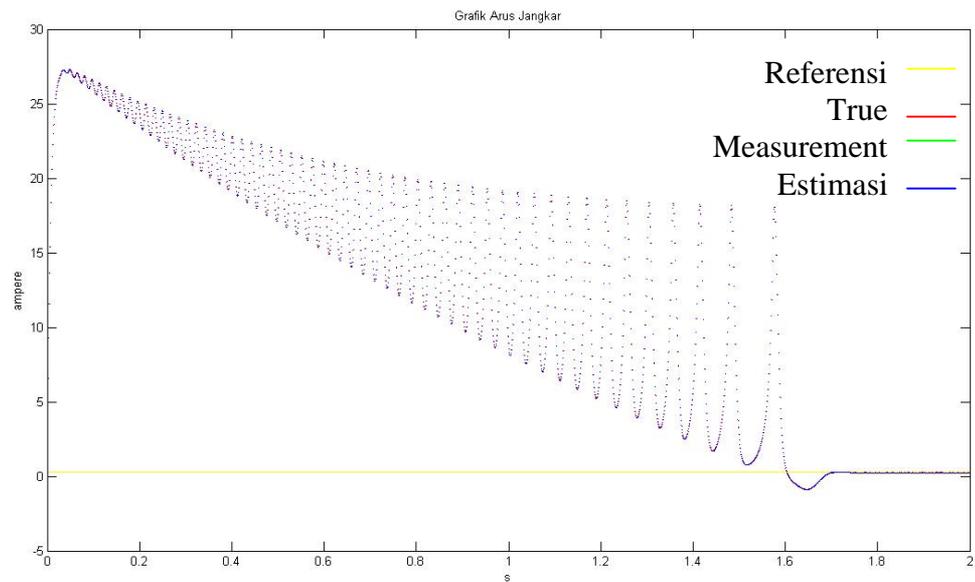
V.3. Hasil Pengujian Simulasi

Dari perancangan sistem pada bab IV, disusun sebuah simulasi untuk sistem. Simulasi yang dilakukan berdasarkan pada data yang telah ada pada bab sebelumnya. Kemampuan simulasi juga bergantung pada kemampuan komputer yang digunakan dalam simulasi ini.

Simulasi sistem dilakukan dalam 3 langkah yang berbeda, yang dimaksud disini adalah dalam hal pemberian beban, yang menyebabkan berubahnya torsi beban. Pada simulasi pertama, tidak ada beban pada motor sehingga nilai torsi motor menjadi 0. Pada simulasi kedua, diberikan beban awal dan konstan, sehingga nilai torsi beban menjadi konstan. Pada simulasi ketiga, beban yang diberikan pada motor adalah berubah setiap waktu, yang dipresentasikan dalam random.

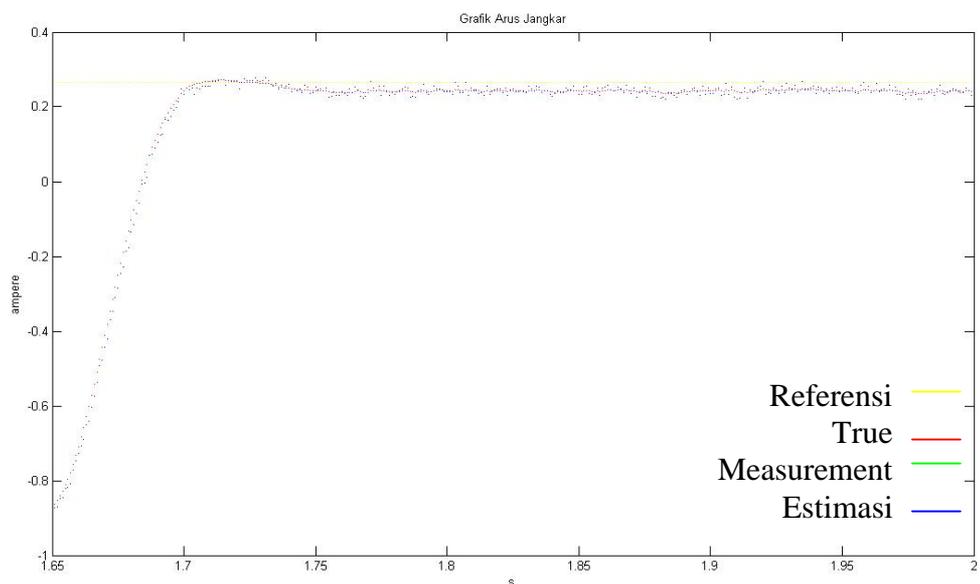
V.3.1. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0N.m$

Dengan memberikan nilai $u_2 = 0$, dan arus referensi $(i_r) = 0,267$ A, yang mempresentasikan kecepatan referensi $(\omega_r) = 200$ rad/s. Maka keluaran sistem bila digambarkan dalam grafik:



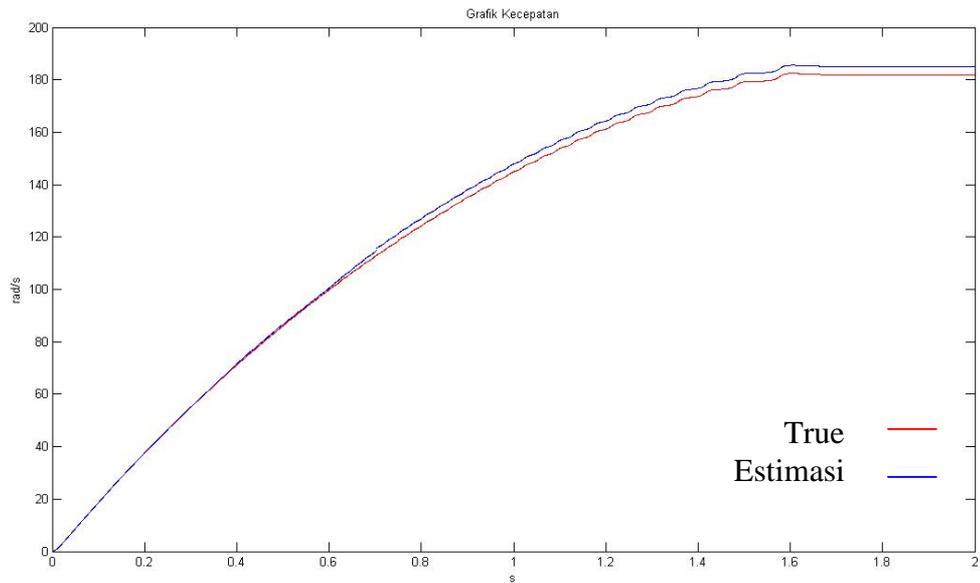
Gambar 5.2. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.3. Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.4. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0N.m$

Sumber: Pengujian

Pada $T_l = 0N.m$ berdasarkan pada pengujian secara langsung terhadap motor, didapat $i_a = 0,21$ A. Sedangkan hasil simulasi, didapat nilai arus jangkar referensi (i_r) = 0,267 A, pada kondisi state (t=2) arus jangkar pengukuran (arus jangkar yang didapat dari measurement EKF/ y) = 0,243 A, dan arus jangkar estimasi (estimasi state arus jangkar/ \hat{x}_1) = 0,244 A. Sedangkan nilai arus jangkar yang sebenarnya dalam simulasi (x_1) = 0,253 A.

Sedangkan pada gambar 5.4 adalah perbandingan antara kecepatan yang sebenarnya dalam simulasi (x_2) dengan kecepatan estimasi (\hat{x}_2).

Tabel 5.2. Perbandingan nilai arus jangkar saat t=2 s

i_r (A)	x_1 (A)	y (A)	\hat{x}_1 (A)	$x_1 - \hat{x}_1$ (A)	$y - \hat{x}_1$ (A)
0,267	0,241	0,243	0,244	0,003	0,001

Pada saat $t=2$ s, didapat hasil simulasi:

$$x = \begin{bmatrix} 0.241 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.010 & 0.000 \\ 0.000 & -10.0906 \end{bmatrix}$$

$$y = [0.243]$$

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 0.104 \\ 185.175 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} -2.892 & 0.000 \\ 0.000 & -9.503 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 *$$

$$R = [-0.010]$$

$$\begin{bmatrix} -4.103 & 0.008 \\ 0.008 & -0.010 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -126.155 & -19.597 \\ 7.501 & -0.010 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0.244 \\ 185.175 \end{bmatrix}$$

Dapat dituliskan persamaan (4.10) dalam angka:

$$x = \begin{bmatrix} 0.241 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [0.243]$$

Sedangkan persamaan (4.11) yang merupakan “time update equation” dari EKF adalah:

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 0.104 \\ 185.175 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 *$$

$$\begin{bmatrix} -4.103 & 0.008 \\ 0.008 & -0.010 \end{bmatrix}$$

Dan persamaan (4.12) sebagai “measurement update equation” dari EKF:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k^-$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix} = \frac{1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -4.103 & 0.008 \\ 0.008 & -0.010 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} * 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -4.103 & 0.008 \\ 0.008 & -0.010 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [-0.010]}$$

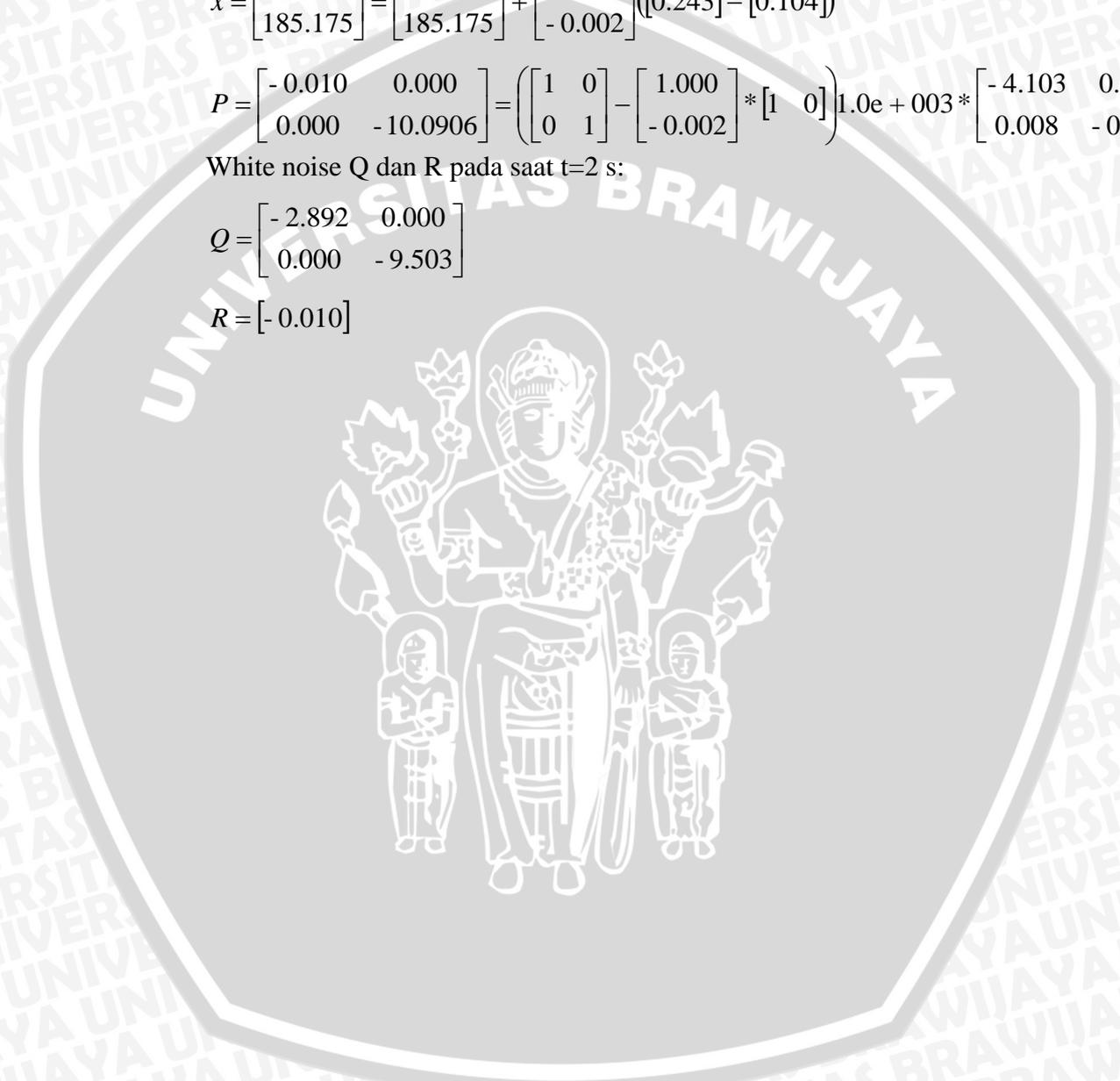
$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0.244 \\ 185.175 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.104 \\ 185.175 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix} ((0.243) - (0.104))$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.010 & 0.000 \\ 0.000 & -10.0906 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right) 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -4.103 & 0.00 \\ 0.008 & -0.01 \end{bmatrix}$$

White noise Q dan R pada saat t=2 s:

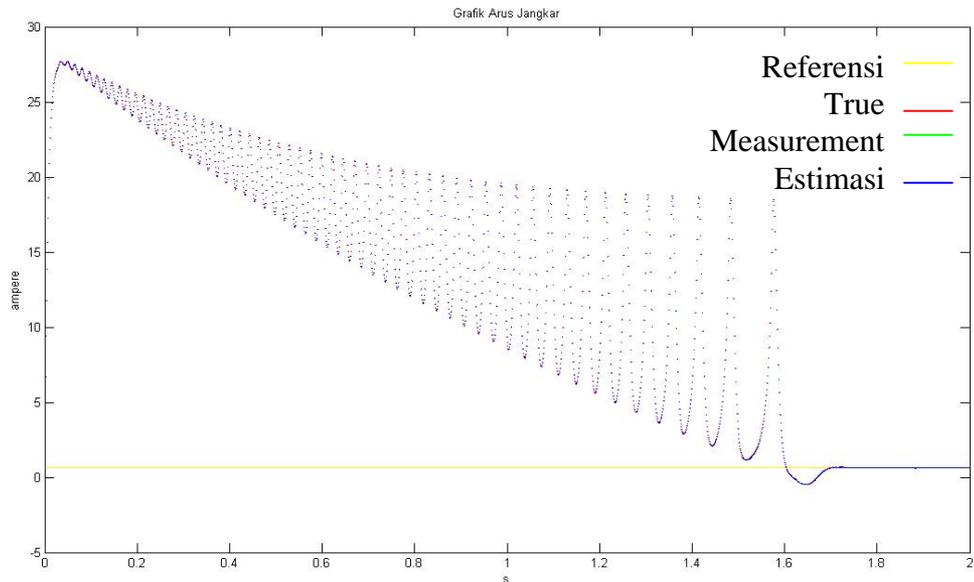
$$Q = \begin{bmatrix} -2.892 & 0.000 \\ 0.000 & -9.503 \end{bmatrix}$$

$$R = [-0.010]$$



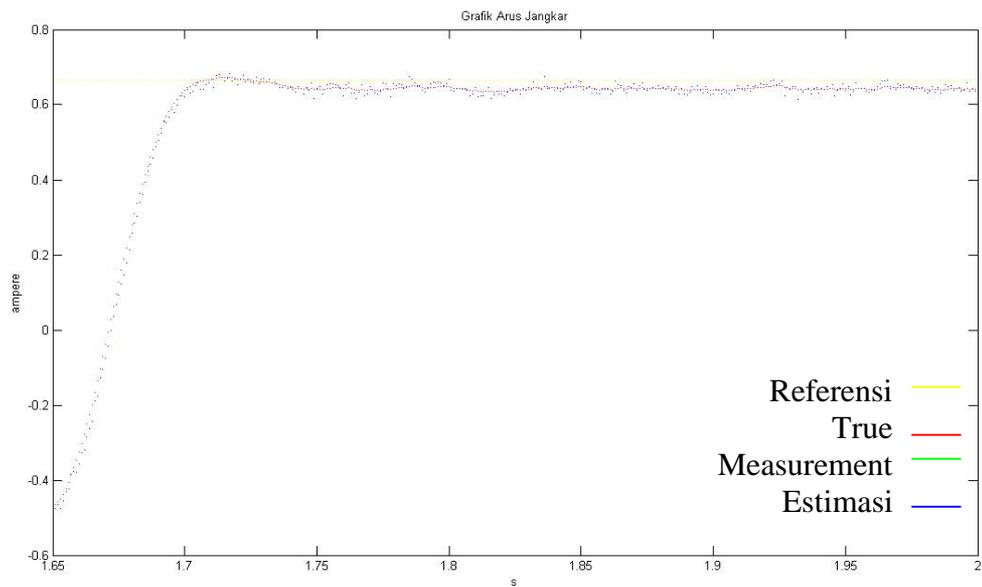
V.3.2. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0,3N.m$

Dengan memberikan nilai $u_2 = 0,3$, dan arus referensi (i_r) = 0,667A, yang mempresentasikan kecepatan referensi (ω_r) = 200 rad/s. Maka keluaran sistem bila digambarkan dalam grafik:



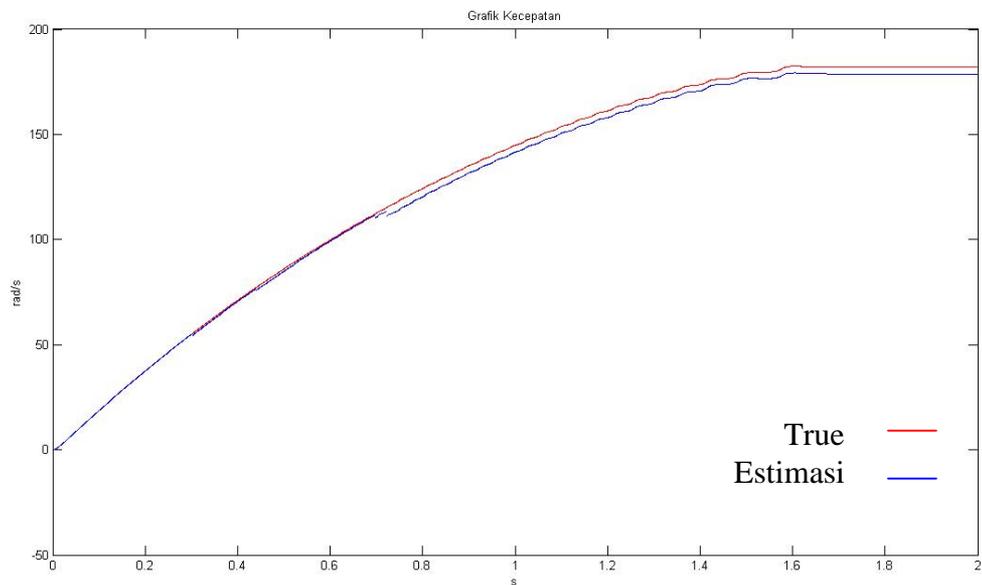
Gambar 5.5. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0,3N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.6. Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0,3N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.7. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0,3N.m$

Sumber: Pengujian

Pada $T_l = 0,3N.m$ berdasarkan pada pengujian secara langsung terhadap motor, didapat $i_a = 0,69$ A. Sedangkan hasil simulasi, didapat nilai arus jangkar referensi (i_r) = 0,667 A, pada kondisi state (t=2) arus jangkar pengukuran (arus jangkar yang didapat dari measurement EKF/ y) = 0,637 A, dan arus jangkar estimasi (estimasi state arus jangkar/ \hat{x}_1) = 0,638 A. Sedangkan nilai arus jangkar yang sebenarnya dalam simulasi (x_1) = 0,645 A.

Sedangkan pada gambar 5.7 adalah perbandingan antara kecepatan yang sebenarnya dalam simulasi (x_2) dengan kecepatan estimasi (\hat{x}_2).

Tabel 5.3. Perbandingan nilai arus jangkar saat t=2 s.

i_r (A)	x_1 (A)	y (A)	\hat{x}_1 (A)	$x_1 - \hat{x}_1$ (A)	$y - \hat{x}_1$ (A)
0,667	0,645	0,637	0,638	0,007	0,001

Pada saat t=2 s, didapat hasil simulasi:

$$x = \begin{bmatrix} 0.645 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [0.637]$$

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 0.679 \\ 178.834 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 004 *$$

$$\begin{bmatrix} 1.184 & 0.003 \\ 0.003 & 0.005 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0.638 \\ 178.834 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.008 & 0.000 \\ 0.000 & 54.765 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} -3.849 & 0.000 \\ 0.000 & 54.566 \end{bmatrix}$$

$$R = [0.008]$$

$$A = \begin{bmatrix} -126.155 & -19.358 \\ 7.501 & -0.010 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

Dapat dituliskan persamaan (4.10) dalam angka:

$$x = \begin{bmatrix} 0.645 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [0.637]$$

Sedangkan persamaan (4.11) yang merupakan “time update equation” dari EKF adalah:

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 0.679 \\ 178.834 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 004 * \begin{bmatrix} 1.184 & 0.003 \\ 0.003 & 0.005 \end{bmatrix}$$

Dan persamaan (4.12) sebagai “measurement update equation” dari EKF:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k^-$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix} = \frac{1.0e + 004 * \begin{bmatrix} 1.184 & 0.003 \\ 0.003 & 0.005 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} * 1.0e + 004 * \begin{bmatrix} 1.184 & 0.003 \\ 0.003 & 0.005 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [0.008]}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0.638 \\ 178.834 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.679 \\ 178.834 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix} ([0.637] - [0.679])$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.008 & 0.000 \\ 0.000 & 54.765 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.002 \end{bmatrix} * [1 \ 0] \right) * 1.0e + 004 * \begin{bmatrix} 1.184 & 0.003 \\ 0.003 & 0.005 \end{bmatrix}$$

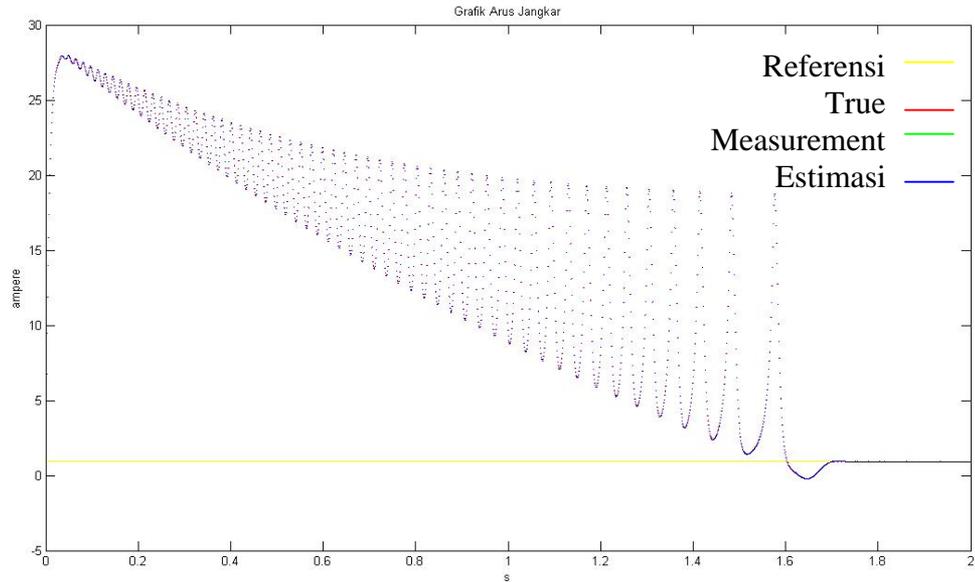
White noise Q dan R pada saat t=2 s:

$$Q = \begin{bmatrix} -3.849 & 0.000 \\ 0.000 & 54.566 \end{bmatrix}$$

$$R = [0.008]$$

V.3.3. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0,5N.m$

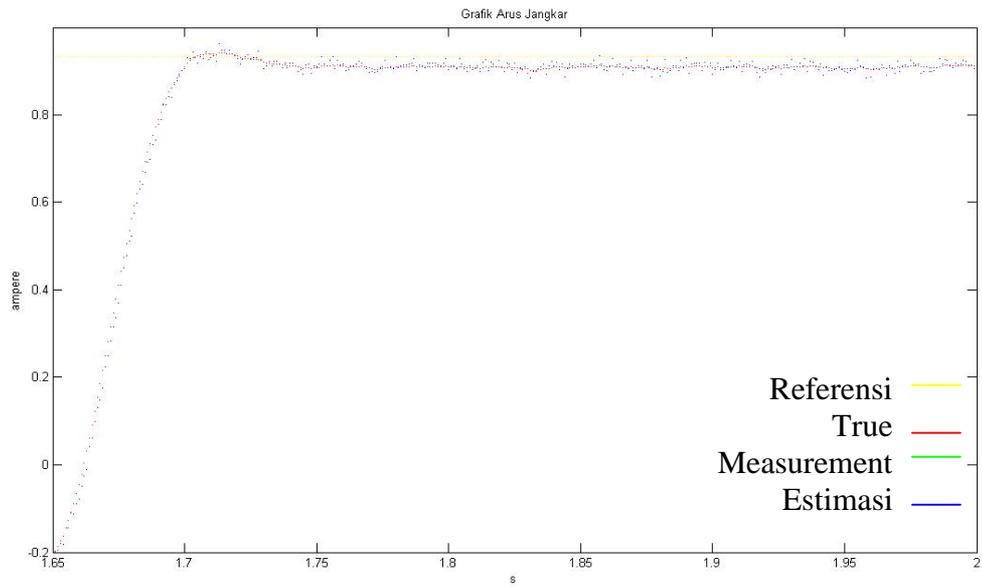
Dengan memberikan nilai $u_2 = 0,5$, dan arus referensi (i_r) = 0,933A, yang mempresentasikan kecepatan referensi (ω_r) = 200 rad/s. Maka keluaran sistem bila digambarkan dalam grafik:



Gambar 5.8. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0,5N.m$

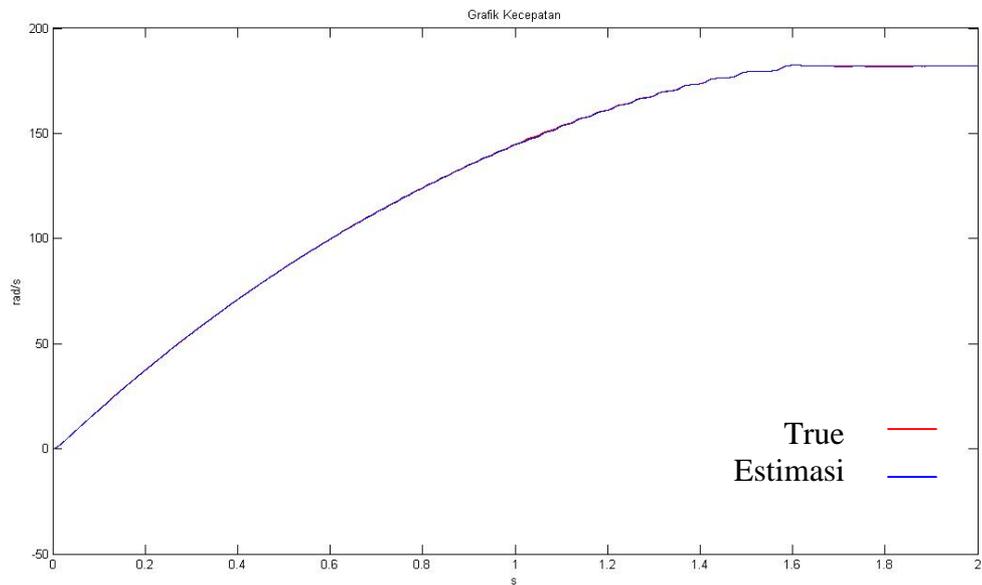
Sumber: Pengujian





Gambar 5.9. Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 0,5N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.10. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0,5N.m$

Sumber: Pengujian

Pada $T_l = 0,5N.m$ berdasarkan pada pengujian secara langsung terhadap motor, didapat $i_a = 0,94$ A. Sedangkan hasil simulasi, didapat nilai arus jangkar referensi (i_r) = 0,933 A, pada kondisi state (t=2) arus jangkar pengukuran (arus jangkar yang didapat dari measurement EKF/ y) = 0,905 A, dan arus jangkar estimasi (estimasi state arus jangkar/ \hat{x}_1) = 0,906 A. Sedangkan nilai arus jangkar yang sebenarnya dalam simulasi (x_1) = 0,909 A.

Sedangkan pada gambar 5.10 adalah perbandingan antara kecepatan yang sebenarnya dalam simulasi (x_2) dengan kecepatan estimasi (\hat{x}_2).

Tabel 5.4. Perbandingan nilai arus jangkar saat t=2 s.

i_r (A)	x_1 (A)	y (A)	\hat{x}_1 (A)	$x_1 - \hat{x}_1$ (A)	$y - \hat{x}_1$ (A)
0,933	0,909	0,905	0,906	0,003	0,001

Pada saat t=2 s, didapat hasil simulasi:

$$x = \begin{bmatrix} 0.909 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [0.905]$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0.905 \\ 181.929 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 *$$

$$\begin{bmatrix} 4.190 & -0.002 \\ -0.002 & 0.005 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ -0.0005 \end{bmatrix}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 0.906 \\ 181.929 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.0007 & 0.000 \\ 0.000 & -4.8552 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1.8568 & 0.000 \\ 0.000 & -5.112 \end{bmatrix}$$

$$R = [-7.3100e - 004]$$

$$A = \begin{bmatrix} -126.155 & -19.122 \\ 7.501 & -0.010 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

Dapat dituliskan persamaan (4.10) dalam angka:

$$x = \begin{bmatrix} 0.909 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [0.905]$$

Sedangkan persamaan (4.11) yang merupakan “time update equation” dari EKF adalah:

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 0.906 \\ 181.929 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 *$$

$$\begin{bmatrix} 4.190 & -0.002 \\ -0.002 & 0.005 \end{bmatrix}$$

Dan persamaan (4.12) sebagai “measurement update equation” dari EKF:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k^-$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.0000 \\ -0.0005 \end{bmatrix} = \frac{1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 4.190 & -0.002 \\ -0.002 & 0.005 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} * 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 4.190 & -0.002 \\ -0.002 & 0.005 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [-7.3100e - 004]}$$

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 0.906 \\ 181.929 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.905 \\ 181.929 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.0000 \\ -0.0005 \end{bmatrix} ([0.905] - [0.905])$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.008 & 0.000 \\ 0.000 & 54.765 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.0000 \\ -0.0005 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right) 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 4.190 & -0.002 \\ -0.002 & 0.005 \end{bmatrix}$$

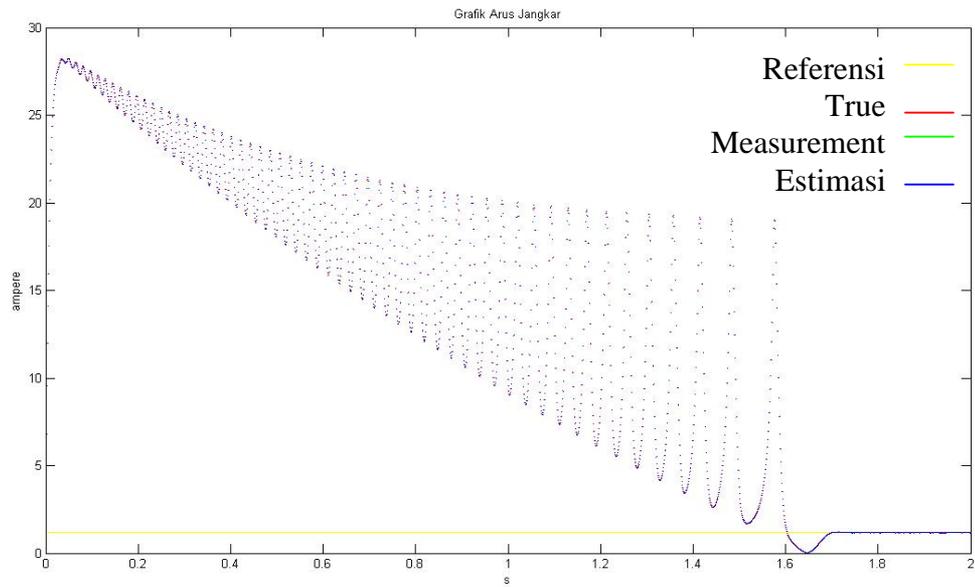
White noise Q dan R pada saat t=2 s:

$$Q = \begin{bmatrix} 1.8568 & 0.000 \\ 0.000 & -5.112 \end{bmatrix}$$

$$R = [-7.3100e - 004]$$

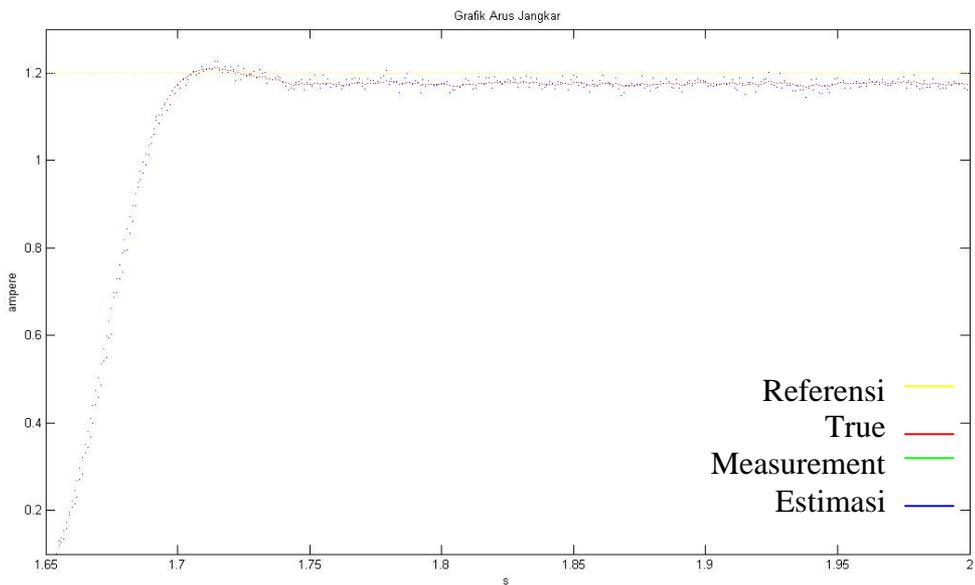
V.3.4. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 0,7N.m$

Dengan memberikan nilai $u_2 = 0,7$, dan arus referensi $(i_r) = 1,199A$, yang mempresentasikan kecepatan referensi $(\omega_r) = 200 \text{ rad/s}$.



Gambar 5.11. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 0,7N.m$

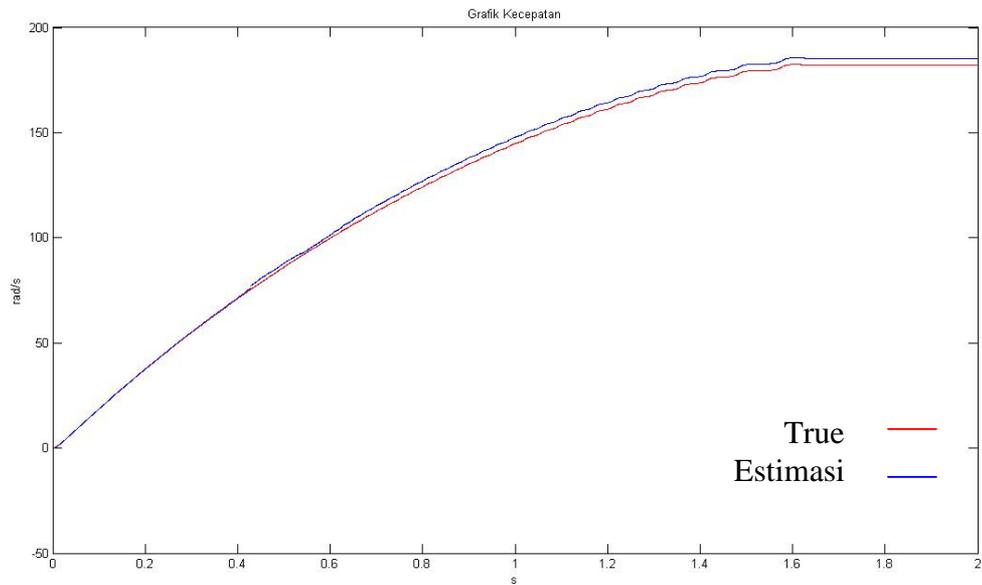
Sumber: Pengujian



Gambar 5.12. Grafik arus jangkar saat steady state dengan

$$T_l = 0,7N.m$$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.13. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 0,7N.m$

Sumber: Pengujian

Pada $T_l = 0,7N.m$ berdasarkan pada pengujian secara langsung terhadap motor, didapat $i_a = 1,23$ A. Sedangkan hasil simulasi, didapat nilai arus jangkar referensi (i_r) = 1,199 A, pada kondisi state (t=2) arus jangkar pengukuran (arus jangkar yang didapat dari measurement EKF/ y) = 1,161 A, dan arus jangkar estimasi (estimasi state arus jangkar/ \hat{x}_1) = 1,162 A. Sedangkan nilai arus jangkar yang sebenarnya dalam simulasi (x_1) = 1,174 A.

Sedangkan pada gambar 5.13 adalah perbandingan antara kecepatan yang sebenarnya dalam simulasi (x_2) dengan kecepatan estimasi (\hat{x}_2).

Tabel 5.5. Perbandingan nilai arus jangkar saat t=2 s.

i_r (A)	x_1 (A)	y (A)	\hat{x}_1 (A)	$x_1 - \hat{x}_1$ (A)	$y - \hat{x}_1$ (A)
1,199	1,174	1,161	1,162	0,012	0,001

Pada saat $t=2$ s, didapat hasil simulasi:

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} 1.174 \\ 181.931 \end{bmatrix} & \hat{x} &= \begin{bmatrix} 1.162 \\ 185.146 \end{bmatrix} \\
 y &= [1.161] & P &= \begin{bmatrix} 0.010 & 0.000 \\ 0.000 & -9.582 \end{bmatrix} \\
 \hat{x}^- &= \begin{bmatrix} 1.055 \\ 185.145 \end{bmatrix} & Q &= \begin{bmatrix} -0.531 & 0.000 \\ 0.000 & -9.776 \end{bmatrix} \\
 P^- &= 1.0e + 003 * & R &= [0.0103] \\
 & \begin{bmatrix} -7.272 & -0.007 \\ -0.007 & -0.009 \end{bmatrix} & A &= \begin{bmatrix} -126.155 & -19.485 \\ 7.501 & -0.010 \end{bmatrix} \\
 K &= \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.001 \end{bmatrix} & C &= [1 \ 0]
 \end{aligned}$$

Dapat dituliskan persamaan (4.10) dalam angka:

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} 1.174 \\ 181.931 \end{bmatrix} \\
 y &= [1.161]
 \end{aligned}$$

Sedangkan persamaan (4.11) yang merupakan “*time update equation*” dari EKF adalah:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}^- &= \begin{bmatrix} 1.055 \\ 185.145 \end{bmatrix} \\
 P^- &= 1.0e + 003 * \\
 & \begin{bmatrix} -7.272 & -0.007 \\ -0.007 & -0.009 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Dan persamaan (4.12) sebagai “*measurement update equation*” dari EKF:

$$\begin{aligned}
 K_k &= P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1} \\
 \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0)) \\
 P_k &= (I - K_k C) P_k^-
 \end{aligned}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.001 \end{bmatrix} = \frac{1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -7.272 & -0.007 \\ -0.007 & -0.009 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} * 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -7.272 & -0.007 \\ -0.007 & -0.009 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [0.0103]}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 1.162 \\ 185.146 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.055 \\ 185.145 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.001 \end{bmatrix} ([1.161] - [1.055])$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.010 & 0.000 \\ 0.000 & -9.582 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.001 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right) * 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -7.272 & -0.007 \\ -0.007 & -0.009 \end{bmatrix}$$

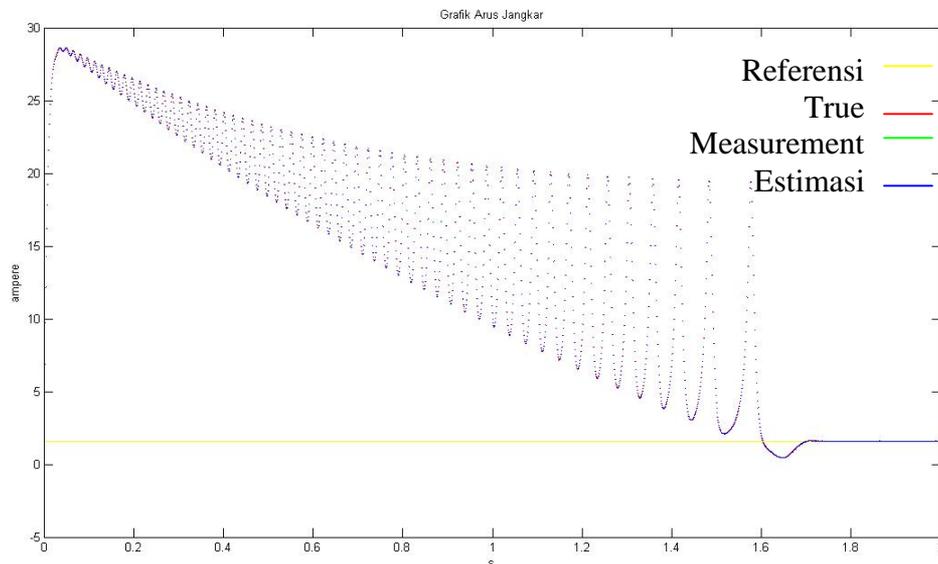
White noise Q dan R pada saat t=2 s:

$$Q = \begin{bmatrix} -0.531 & 0.000 \\ 0.000 & -9.776 \end{bmatrix}$$

$$R = [0.0103]$$

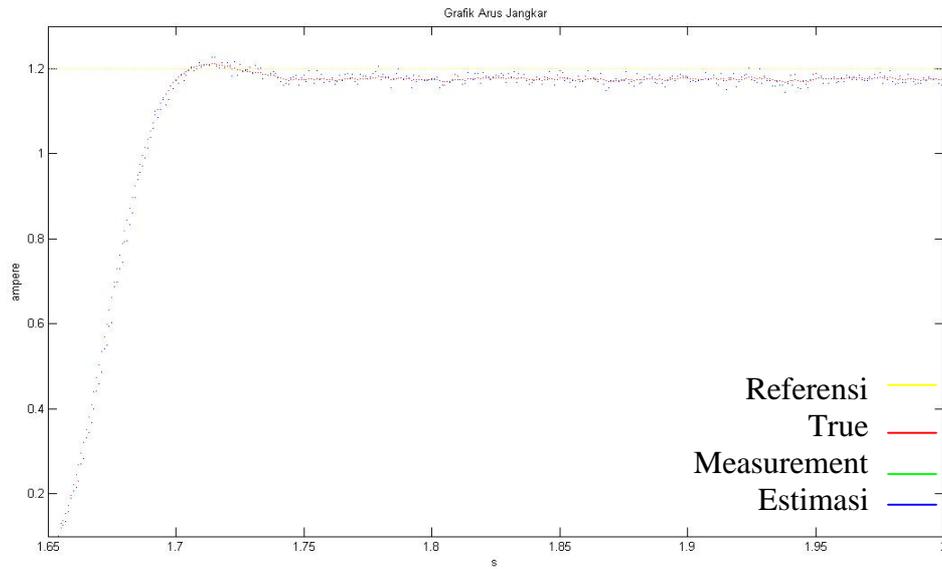
V.3.5. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_f = 1N.m$

Dengan memberikan nilai $u_2 = 1$, dan arus referensi (i_r) = 1,599A, yang mempresentasikan kecepatan referensi (ω_r) = 200 rad/s.



Gambar 5.14. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_f = 1N.m$

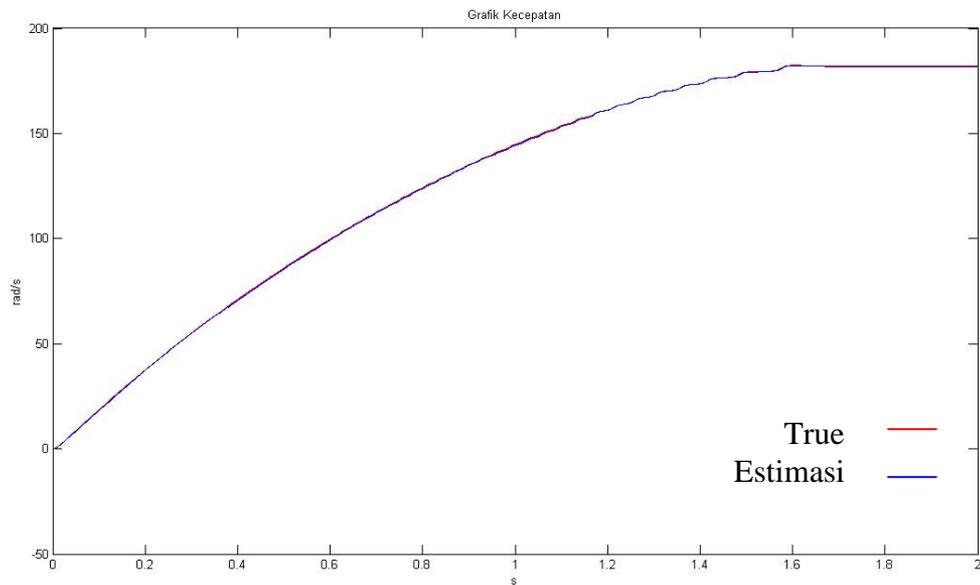
Sumber: Pengujian



Gambar 5.15. Grafik arus jangkar saat steady state dengan

$$T_l = 1N.m$$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.16. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi

kecepatan dengan $T_l = 1N.m$

Sumber: Pengujian

Pada $T_l = 1N.m$ berdasarkan pada pengujian secara langsung terhadap motor, didapat $i_a = 1,52$ A. Sedangkan hasil simulasi, didapat

nilai arus jangkar referensi (i_r) = 1,599 A, pada kondisi state (t=2) arus jangkar pengukuran (arus jangkar yang didapat dari measurement EKF/ y) = 1,548 A, dan arus jangkar estimasi (estimasi state arus jangkar/ \hat{x}_1) = 1,547 A. Sedangkan nilai arus jangkar yang sebenarnya dalam simulasi (x_1) = 1,570 A.

Sedangkan pada gambar 5.16 adalah perbandingan antara kecepatan yang sebenarnya dalam simulasi (x_2) dengan kecepatan estimasi (\hat{x}_2).

Tabel 5.6. Perbandingan nilai arus jangkar saat t=2 s.

i_r (A)	x_1 (A)	y (A)	\hat{x}_1 (A)	$x_1 - \hat{x}_1$ (A)	$y - \hat{x}_1$ (A)
1,599	1,540	1,548	1,547	0,007	0,001

Saat t=2 s, didapat hasil simulasi:

$$x = \begin{bmatrix} 1.570 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [1.548]$$

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 1.706 \\ 181.822 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 3.402 & -0.010 \\ -0.010 & 0.018 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.003 \end{bmatrix}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 1.547 \\ 181.822 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.001 & 0.000 \\ 0.000 & 18.176 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 6.984 & 0.000 \\ 0.000 & 17.466 \end{bmatrix}$$

$$R = [-0.0015]$$

$$A = \begin{bmatrix} -126.155 & -18.417 \\ 7.501 & -0.010 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

Dapat dituliskan persamaan (4.10) dalam angka:

$$x = \begin{bmatrix} 1.570 \\ 181.931 \end{bmatrix}$$

$$y = [1.548]$$

Sedangkan persamaan (4.11) yang merupakan “time update equation” dari EKF adalah:

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 1.706 \\ 181.822 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 *$$

$$\begin{bmatrix} 3.402 & -0.010 \\ -0.010 & 0.018 \end{bmatrix}$$

Dan persamaan (4.12) sebagai “*measurement update equation*” dari EKF:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k^-$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.003 \end{bmatrix} = \frac{1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 3.402 & -0.010 \\ -0.010 & 0.018 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{[1 \ 0] * 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 3.402 & -0.010 \\ -0.010 & 0.018 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [0.0103]}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 1.547 \\ 181.822 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.706 \\ 181.822 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.003 \end{bmatrix} ((1.548) - [1.706])$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.001 & 0.000 \\ 0.000 & 18.176 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.000 \\ -0.003 \end{bmatrix} * [1 \ 0] \right) * 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} 3.402 & -0.010 \\ -0.010 & 0.018 \end{bmatrix}$$

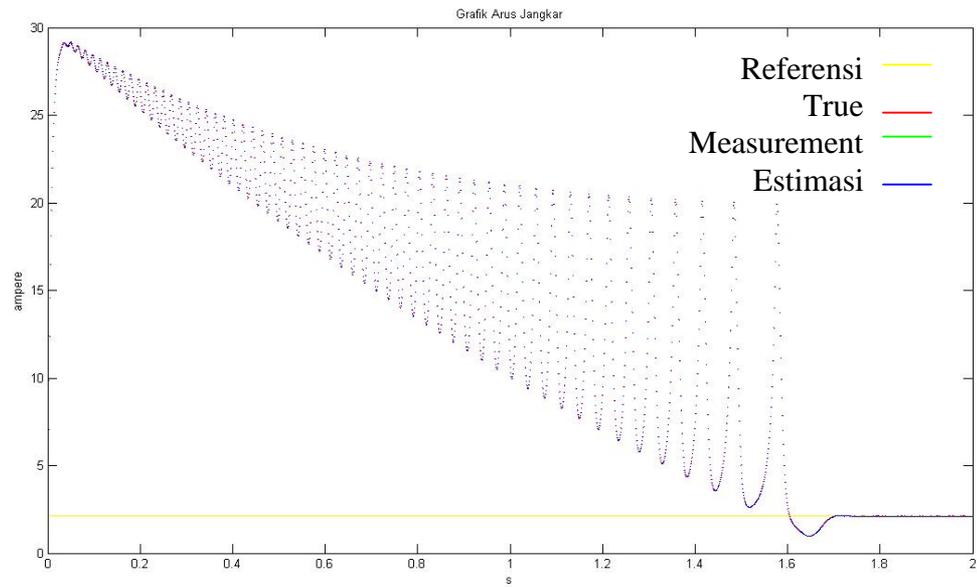
White noise Q dan R pada saat t=2 s:

$$Q = \begin{bmatrix} 6.984 & 0.000 \\ 0.000 & 17.466 \end{bmatrix}$$

$$R = [-0.0015]$$

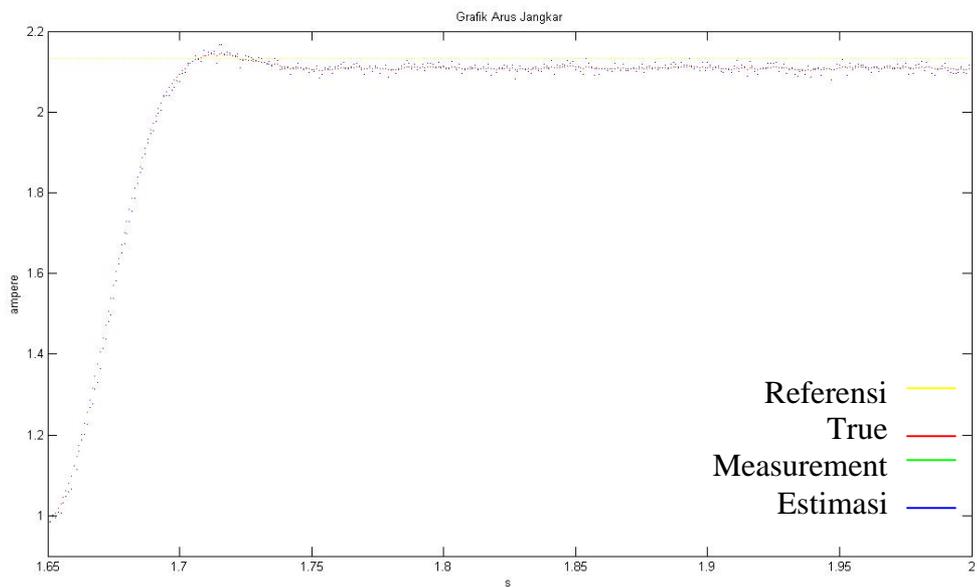
V.3.6. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = 1,4N.m$

Dengan memberikan nilai $u_2 = 1,4$, dan arus referensi $(i_r) = 2,132A$, yang mempresentasikan kecepatan referensi $(\omega_r) = 200 \text{ rad/s}$.



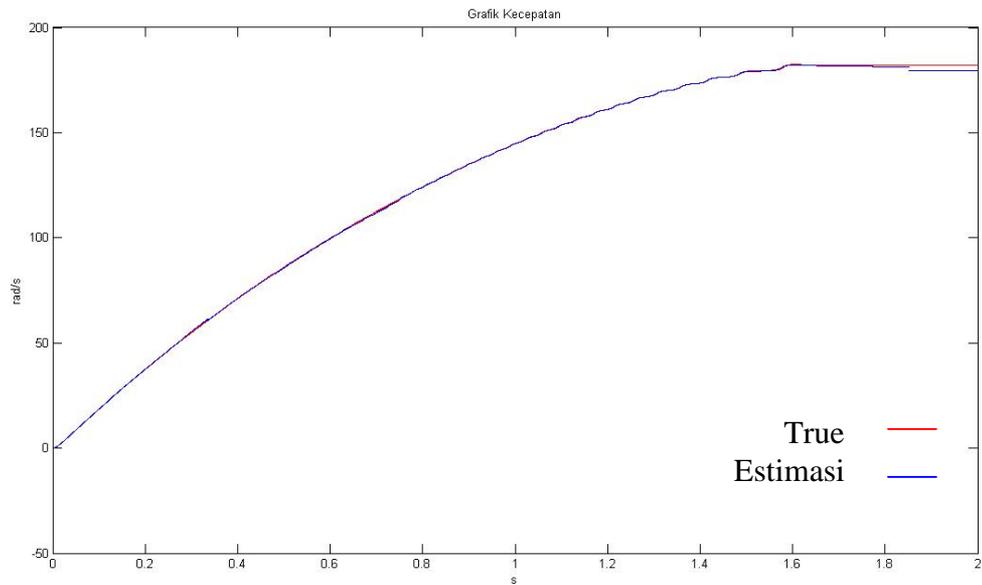
Gambar 5.17. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = 1,4N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.18. Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = 1,4N.m$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.19. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = 1,4N.m$

Sumber: Pengujian

Pada $T_l = 1,4N.m$ berdasarkan pada pengujian secara langsung terhadap motor, didapat $i_a = 2,16$ A. Sedangkan hasil simulasi, didapat nilai arus jangkar referensi (i_r) = 2,132 A, pada kondisi state (t=2) arus jangkar pengukuran (arus jangkar yang didapat dari measurement EKF/ y) = 2,115 A, dan arus jangkar estimasi (estimasi state arus jangkar/ \hat{x}_1) = 2,1152 A. Sedangkan nilai arus jangkar yang sebenarnya dalam simulasi (x_1) = 2,108 A.

Sedangkan pada gambar 5.19 adalah perbandingan antara kecepatan yang sebenarnya dalam simulasi (x_2) dengan kecepatan estimasi (\hat{x}_2).

Tabel 5.7. Perbandingan nilai arus jangkar saat t=2 s.

i_r (A)	x_1 (A)	y (A)	\hat{x}_1 (A)	$x_1 - \hat{x}_1$ (A)	$y - \hat{x}_1$ (A)
2,132	2,108	2,115	2,1152	0,009	0,0002

Saat $t=2$ s, didapat hasil simulasi:

$$x = \begin{bmatrix} 2.108 \\ 181.932 \end{bmatrix}$$

$$y = [2.115]$$

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 2.410 \\ 179.547 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -3.408 & -0.001 \\ -0.001 & 0.019 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.0005 \end{bmatrix}$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 2.1152 \\ 179.5475 \end{bmatrix}$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.0065 & -0.000 \\ -0.000 & 19.6563 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} -5.434 & 0.000 \\ 0.000 & 19.673 \end{bmatrix}$$

$$R = [-0.0065]$$

$$A = \begin{bmatrix} -126.155 & -17.693 \\ 7.501 & -0.010 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0]$$

Dapat dituliskan persamaan (4.10) dalam angka:

$$x = \begin{bmatrix} 2.108 \\ 181.932 \end{bmatrix}$$

$$y = [2.115]$$

Sedangkan persamaan (4.11) yang merupakan “time update equation” dari EKF adalah:

$$\hat{x}^- = \begin{bmatrix} 2.410 \\ 179.547 \end{bmatrix}$$

$$P^- = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -3.408 & -0.001 \\ -0.001 & 0.019 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.0005 \end{bmatrix}$$

Dan persamaan (4.12) sebagai “measurement update equation” dari EKF:

$$K_k = P_k^- C^T (C P_k^- C^T + R_k)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, 0))$$

$$P_k = (I - K_k C) P_k^-$$

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.0005 \end{bmatrix} = \frac{1.0e+003 * \begin{bmatrix} -3.408 & -0.001 \\ -0.001 & 0.019 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} * 1.0e+003 * \begin{bmatrix} -3.408 & -0.001 \\ -0.001 & 0.019 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [-0.0065]}$$

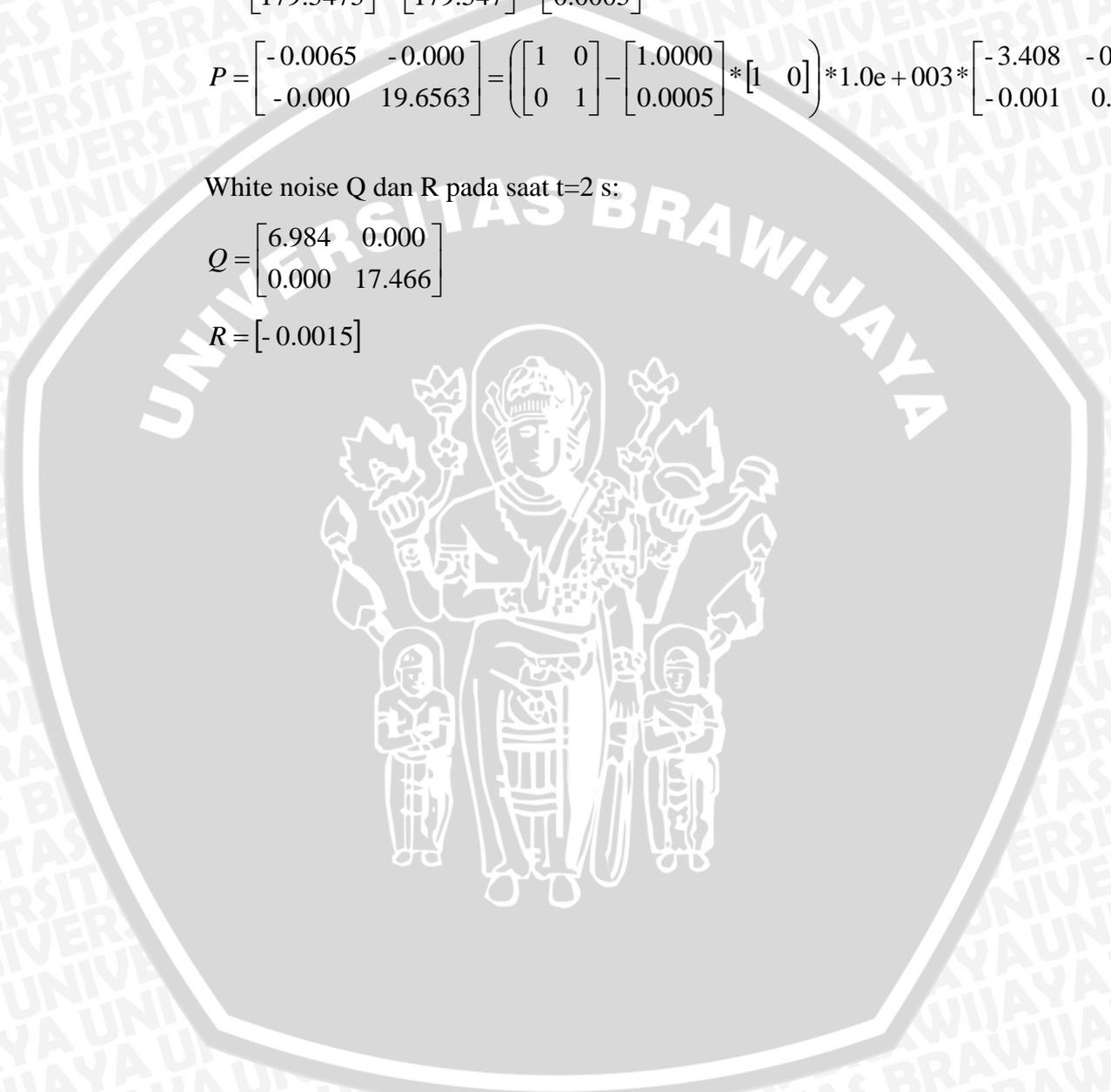
$$\hat{x} = \begin{bmatrix} 2.1152 \\ 179.5475 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.410 \\ 179.547 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.0005 \end{bmatrix} ((2.115) - [2.410])$$

$$P = \begin{bmatrix} -0.0065 & -0.000 \\ -0.000 & 19.6563 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.0000 \\ 0.0005 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right) * 1.0e+003 * \begin{bmatrix} -3.408 & -0.001 \\ -0.001 & 0.019 \end{bmatrix}$$

White noise Q dan R pada saat t=2 s:

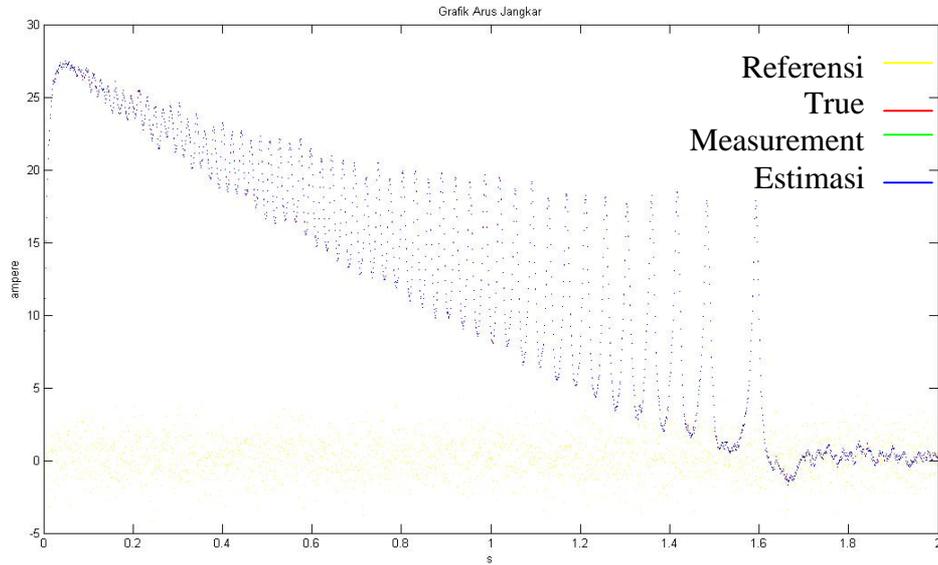
$$Q = \begin{bmatrix} 6.984 & 0.000 \\ 0.000 & 17.466 \end{bmatrix}$$

$$R = [-0.0015]$$



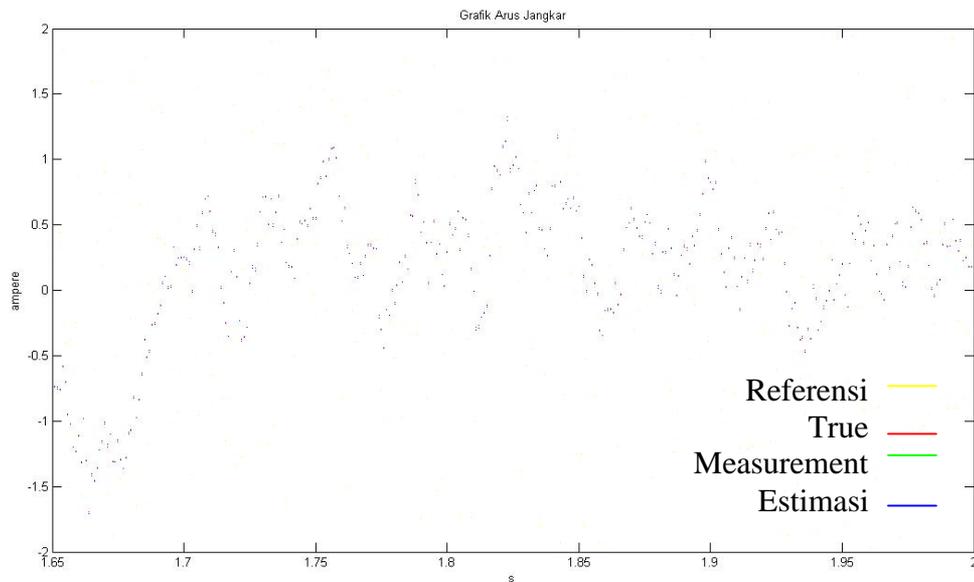
V.3.7. Hasil Pengujian Simulasi Dengan $T_l = acak$

Dengan memberikan nilai $u_2 = randn$, kecepatan referensi (ω_r) = 200 rad/s. Maka hasil dari simulasi:



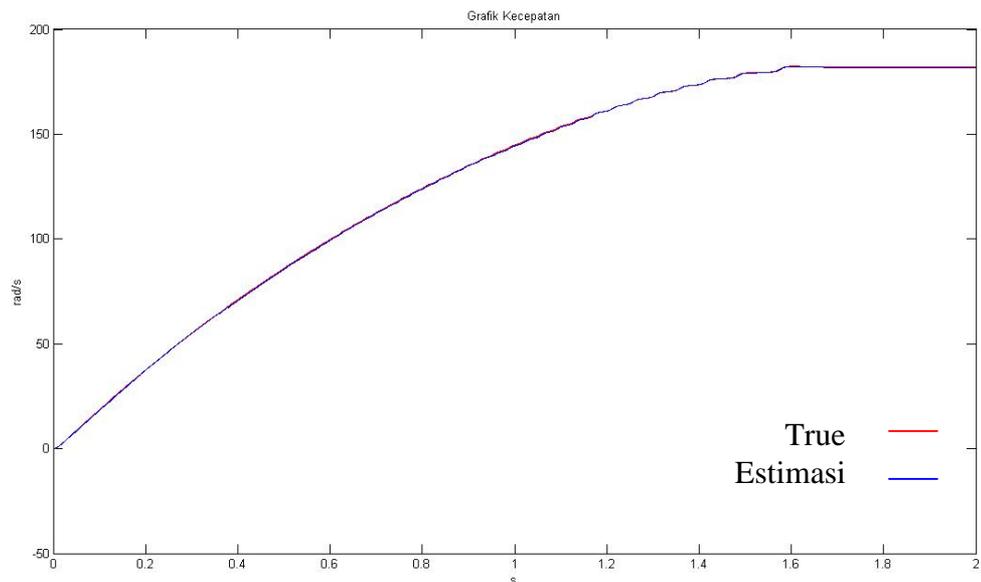
Gambar 5.20. Grafik arus jangkar referensi, arus jangkar measurement, arus jangkar sebenarnya dan estimasi arus jangkar dengan $T_l = acak$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.21. Grafik arus jangkar saat steady state dengan $T_l = acak$

Sumber: Pengujian



Gambar 5.22. Grafik kecepatan yang sebenarnya dan estimasi kecepatan dengan $T_l = acak$

Sumber: Pengujian

Pada pemberian nilai random untuk torsi beban, dimana nilai ini diberikan setiap waktu sampling (0,001 s) maka nilai arus jangkar referensi, arus jangkar pengukuran dan estimasi arus jangkar menjadi acak menyesuaikan nilai torsi beban yang ada.

Sedangkan estimasi kecepatan motor dapat menyesuaikan dengan perubahan arus, seperti terlihat pada gambar 5.22 dimana kecepatan estimasi tidak menjadi seacak arus estimasi.

V.4. Analisa Hasil Pengujian

Analisa hasil pengujian adalah analisa terhadap simulasi yang telah dibuat. Analisa yang dilakukan adalah analisa pada setiap pengujian simulasi.

- Pengujian dengan $T_l = 0N.m$

Untuk simulasi dengan menggunakan $T_l = 0N.m$ diketahui perbedaan antara arus jangkar hasil pengujian langsung pada motor di Laboratorium dengan hasil perhitungan nilai arus jangkar referensi memiliki nilai:

$$i_a - i_r = 0,057 \text{ ampere.}$$

Perbedaan nilai arus jangkar referensi dengan nilai arus jangkar hasil simulasi:

$$i_r - x_1 = 0,014 \text{ ampere}$$

Sedangkan perbedaan antara nilai arus jangkar hasil simulasi dengan nilai arus jangkar estimasi EKF saat $t=2$ s:

$$x_1 - \hat{x}_1 = 0,003 \text{ ampere.}$$

Dan selisih antara nilai arus jangkar measurement EKF dengan nilai arus jangkar estimasi saat $t=2$ s:

$$y - \hat{x}_1 = 0,001 \text{ ampere.}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady pada measurement EKF adalah $\pm 1,75$ detik.

- Pengujian dengan $T_l = 0,3N.m$

Untuk simulasi dengan menggunakan $T_l = 0,3N.m$ diketahui perbedaan antara arus jangkar hasil pengujian langsung pada motor di Laboratorium dengan hasil perhitungan nilai arus jangkar referensi memiliki nilai:

$$i_a - i_r = 0,023 \text{ ampere.}$$

Perbedaan nilai arus jangkar referensi dengan nilai arus jangkar hasil simulasi:

$$i_r - x_1 = 0,022 \text{ ampere}$$

Sedangkan perbedaan antara nilai arus jangkar hasil simulasi dengan nilai arus jangkar estimasi EKF saat $t=2$ s:

$$x_1 - \hat{x}_1 = 0,007 \text{ ampere.}$$

Dan selisih antara nilai arus jangkar measurement EKF dengan nilai arus jangkar estimasi saat $t=2$ s:

$$y - \hat{x}_1 = 0,001 \text{ ampere.}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady pada measurement EKF adalah $\pm 1,75$ detik.

- Pengujian dengan $T_l = 0,5N.m$

Untuk simulasi dengan menggunakan $T_l = 0,5N.m$ diketahui perbedaan antara arus jangkar hasil pengujian langsung pada motor di Laboratorium dengan hasil perhitungan nilai arus jangkar referensi memiliki nilai:

$$i_a - i_r = 0,007 \text{ ampere.}$$

Perbedaan nilai arus jangkar referensi dengan nilai arus jangkar hasil simulasi:

$$i_r - x_1 = 0,024 \text{ ampere}$$

Sedangkan perbedaan antara nilai arus jangkar hasil simulasi dengan nilai arus jangkar estimasi EKF saat $t=2$ s:

$$x_1 - \hat{x}_1 = 0,003 \text{ ampere.}$$

Dan selisih antara nilai arus jangkar measurement EKF dengan nilai arus jangkar estimasi saat $t=2$ s:

$$y - \hat{x}_1 = 0,001 \text{ ampere.}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady pada measurement EKF adalah $\pm 1,75$ detik.

- Pengujian dengan $T_l = 0,7N.m$

Untuk simulasi dengan menggunakan $T_l = 0,7N.m$ diketahui perbedaan antara arus jangkar hasil pengujian langsung pada motor di Laboratorium dengan hasil perhitungan nilai arus jangkar referensi memiliki nilai:

$$i_a - i_r = 0,031 \text{ ampere.}$$

Perbedaan nilai arus jangkar referensi dengan nilai arus jangkar hasil simulasi:

$$i_r - x_1 = 0,025 \text{ ampere}$$

Sedangkan perbedaan antara nilai arus jangkar hasil simulasi dengan nilai arus jangkar estimasi EKF saat $t=2$ s:

$$x_1 - \hat{x}_1 = 0,012 \text{ ampere.}$$

Dan selisih antara nilai arus jangkar measurement EKF dengan nilai arus jangkar estimasi saat $t=2$ s:

$$y - \hat{x}_1 = 0,001 \text{ ampere.}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady pada measurement EKF adalah $\pm 1,75$ detik.

- Pengujian dengan $T_l = 1N.m$

Untuk simulasi dengan menggunakan $T_l = 1N.m$ diketahui perbedaan antara arus jangkar hasil pengujian langsung pada motor di Laboratorium dengan hasil perhitungan nilai arus jangkar referensi memiliki nilai:

$$i_a - i_r = 0,079 \text{ ampere.}$$

Perbedaan nilai arus jangkar referensi dengan nilai arus jangkar hasil simulasi:

$$i_r - x_1 = 0,059 \text{ ampere}$$

Sedangkan perbedaan antara nilai arus jangkar hasil simulasi dengan nilai arus jangkar estimasi EKF saat $t=2$ s:

$$x_1 - \hat{x}_1 = 0,007 \text{ ampere.}$$

Dan selisih antara nilai arus jangkar measurement EKF dengan nilai arus jangkar estimasi saat $t=2$ s:

$$y - \hat{x}_1 = 0,001 \text{ ampere.}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady pada measurement EKF adalah $\pm 1,75$ detik.

- Pengujian dengan $T_l = 1,4N.m$

Untuk simulasi dengan menggunakan $T_l = 1,4N.m$ diketahui perbedaan antara arus jangkar hasil pengujian langsung pada motor di Laboratorium dengan hasil perhitungan nilai arus jangkar referensi memiliki nilai:

$$i_a - i_r = 0,028 \text{ ampere.}$$

Perbedaan nilai arus jangkar referensi dengan nilai arus jangkar hasil simulasi:

$$i_r - x_1 = 0,024 \text{ ampere}$$

Sedangkan perbedaan antara nilai arus jangkar hasil simulasi dengan nilai arus jangkar estimasi EKF saat $t=2$ s:

$$x_1 - \hat{x}_1 = 0,0072 \text{ ampere.}$$

Dan selisih antara nilai arus jangkar measurement EKF dengan nilai arus jangkar estimasi saat $t=2$ s:

$$y - \hat{x}_1 = 0,0002 \text{ ampere.}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi steady pada measurement EKF adalah $\pm 1,75$ detik.

- Pengujian dengan T_l yang acak

Untuk pengujian dengan nilai T_l acak maka nilai referensi menjadi acak. Karena nilai referensi bergantung pada besarnya T_l yang diberikan pada simulasi sistem, sesuai dengan persamaan (4.1).

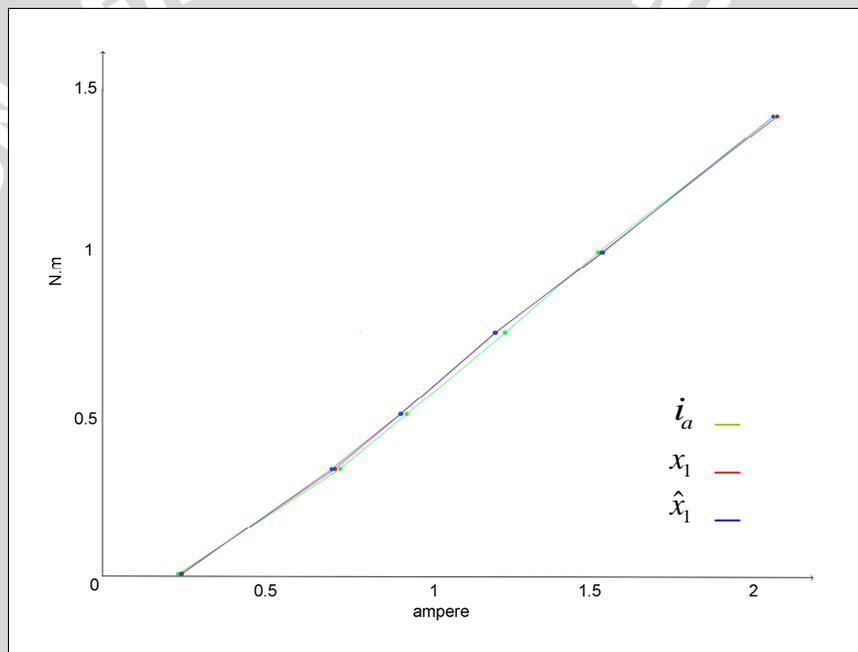
Dengan T_l yang acak, maka nilai measurement EKF menjadi acak mengikuti nilai T_l , begitu pula nilai estimasi arus jangkar EKF. Karena nilai T_l adalah masukan untuk sistem (u_2).

Disini, nilai T_l diberikan acak pada setiap periode sampling, sehingga nilai arus selalu berubah setiap waktu sampling.

Dari seluruh rangkaian pengujian, disusun sebuah grafik dan tabel berdasarkan hasil pengujian arus jangkar di laboratorium, hasil arus jangkar simulasi dari plant serta hasil arus jangkar estimasi dari EKF.

Tabel 5.8. Nilai arus jangkar hasil pengujian

No.	T_l (N.m)	i_a (A)	x_1 (A)	\hat{x}_1 (A)	$i_a - x_1$ (A)	$i_a - \hat{x}_1$ (A)
1	0	0,21	0,241	0,244	0,031	0,034
2	0,3	0,69	0,645	0,638	0,045	0,052
3	0,5	0,94	0,909	0,906	0,031	0,034
4	0,7	1,23	1,174	1,162	0,056	0,068
5	1	1,52	1,540	1,547	0,020	0,027
6	1,4	2,16	2,16	2,115	0,000	0,045



Gambar 5.23. Grafik antara torsi beban dan arus jangkar

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1 Kesimpulan

Dari bab-bab sebelumnya, dibuat kesimpulan mengenai simulasi pengaturan motor DC menggunakan EKF. Beberapa poin kesimpulan yang bisa disusun adalah sebagai berikut:

1. Nilai arus jangkar referensi (i_r) dengan putaran motor konstan (ω_m) sebesar 200 rad/s memiliki perbedaan rata-rata dengan arus jangkar saat pengujian secara langsung sebesar $= 0,032A$
2. Estimasi kecepatan yang dihasilkan oleh EKF yang dirancang memiliki error yang antara 5-10% dengan nilai kecepatan referensi.
3. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai steady state berkisar 1,7-1,8 detik.
4. EKF yang dirancang sebagai pengatur kecepatan motor DC mampu bekerja sesuai harapan, karena nilai estimasi arus jangkar selalu menuju ke nilai sebenarnya dan juga perhitungan measurement EKF.

VI.2 Saran

Dari kesimpulan dapat disusun saran terhadap penelitian yang telah dilakukan, yaitu:

1. Penentuan matriks P, Q, dan R yang disusun secara coba-coba dan pemberian nilai batasan random pada setiap waktu sampling dapat mempengaruhi kinerja dari EKF sehingga bila penentuan matriks P, Q dan R dengan metode selain metode yang telah diterapkan diharapkan mampu untuk memberi hasil yang lebih baik.
2. Pemberian kontroller tambahan untuk mempercepat settling time sistem diharapkan akan memberi hasil yang lebih baik.
3. Penambahan variabel state seperti tegangan jangkar, resistansi jangkar, serta arus medan diharapkan akan menjadikan sistem ini

lebih baik, karena semakin banyak state variabel yang dihitung, maka keluaran sistem akan menjadi semakin baik.



DAFTAR PUSTAKA

1. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley dan Stephen D. Umans, *Mesin-Mesin Listrik*, Surabaya, Erlangga, 1990.
2. Ayassun S. dan G. Karbeyas, *DC Motor Speed Control Using MATLAB/Simulink and Their Integration into Undergraduate Electric Machinery Courses*, Turki, 2007.
3. Gary Bishop dan Greg Welch, *An Introduction to the Kalman Filter*, Chapel Hill, University of Carolina, 2006.
4. George, Moleykutty, *Speed Control Of Separately Excited DC Motor*, *American Journal of Applied Sciences* 5 (3):227-233, 2008.
5. M. A. Muslim dan Dwi Nusantoro, *Goegoes, Penerapan Kontrol Kecepatan Tanpa Sensor Pada Motor DC Menggunakan State Feedback Dan State Observer*, Malang, Universitas Brawijaya, 2009.
6. M. S. Grewall dan A. P. Andrews, *Kalman Filter: Theory and Practice using Kalman Filter*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
7. Nova Ardiansyah, M., *Perancangan dan Simulasi Kontrol Optimal Dengan Metode LQG Dalam Pengendalian Level dan Feedwater Flow Dalam Steam Drum Boiler di PLTU Paiton Unit 6 dan 7*, Malang, Universitas Brawijaya, 2007.
8. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*, cetakan IV, Bandung, Erlangga, 1994.
9. Padmakumar, Vivek Agarwarl dan Karrol Roy, *A Tutorial on Dynamics Simulation of DC Motor and Implementation of Kalman Filter on a Floating Point DSP*, World Academy of Science, 2009.
10. Robert Grover B. dan Patrick Y. C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering 2nd edition*, John Willey & Sons, 1985.
11. Shah, Chirayu, *Sensorless Control of Stepper Motor Using Kalman Filter*, Cleveland, Cleveland State University, 2000.
12. Simon, Dan, *Using Non-Linear Kalman Filtering to Estimate Signals*, Cleveland, Cleveland State University, 2000.

13. Yuan Rui Chen, Nobert C. dan Jie Wu, Sensorless Drive Permagent Magnet Linier Motors Using Modified Kalman Filter, Hongkong, Hongkong Polytechnics University, 2004.
14. Suarjana, Nyoman, Eliminasi Harmonisasi Pada DC Chopper Dengan Motor DC Penguat Terpisah, Malang, Universitas Brawijaya, 2006.



LAMPIRAN I

Listing m-file simulasi:

```

clear all;
clc;
Ra=11.846; %resistansi jangkar
La=0.0939; %induktansi jangkar
Km=1.870; %konstanta mesin
Ke=1.667; %konstanta elektrik
If=0.45; % arus medan
j=0.1; %momen inersia
Bm=0.001; % gesekan viskos
T=0.001; %sampling
x=[0;0];%inisial x
xhat=[0;0];%inisial estimasi
ControlNoise=0.2;
AccelNoise=0.5;
MeasNoise=0.1;
xdotNoise=[ControlNoise/La;AccelNoise/j];
Q=[xdotNoise(1)^2 0; 0 xdotNoise(2)^2];
R=[MeasNoise^2];
P=Q;%inisial covariance
Wr=input('referensi (rad/s)= ');
t=input('waktu (t) = ');
n=round(t/T);
for k=1:n;
    u2=randn;
    ir=(Bm*Wr+u2)/(Ke*If);
    eia=ir-x(1);
    y= x(1) + MeasNoise^2*randn;
    u1=(Km*Wr*abs(sin(Wr))) + (y+eia)*Ra;
    xdot(1)=(-Ra/La)*x(1) + (-Km*x(2)*abs(cos(x(2)))/La) + (u1/La);
    xdot(2)=(Ke*If/j)*x(1) + (-Bm/j)*x(2) - (u2/j);
    xdot=[xdot(1);xdot(2)];
    x=x+xdot*T;
    Q=[xdotNoise(1)^2*randn 0; 0 xdotNoise(2)^2*randn];
    R=[MeasNoise^2*randn];
    A=[-Ra/La -Km*abs(cos(xhat(2)))/La; Ke*If/j -Bm/j];
    C=[1 0];
    deltax=[-Ra/La*xhat(1) - Km*xhat(2)*abs(cos(xhat(2)))/La + u1/La;
    Ke*If/j*xhat(1) - Bm/j*xhat(2) - u2/j]*T;
    xhatmin = xhat + deltax;
    Pmin=A*P*A'+Q;
    K=Pmin*C'*inv(C*Pmin*C'+R);
    xhat = xhatmin + K * (y - xhatmin(1));
    P =(eye(2) - K * C) * Pmin ;
end;

```



