



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN ADAPTIVE EXTENDED
KALMAN FILTER UNTUK *SPEED SENSORLESS*
CONTROL MOTOR INDUKSI DI UNIT
PENGGERAK KERETA API PT INKA**

FADILA ANISA

NRP. 023116 40000 031

Dosen Pembimbing

Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 181801

DESIGN OF ADAPTIVE EXTENDED KALMAN FILTER FOR SPEED SENSORLESS CONTROL INDUCTION MOTOR IN MOVEMENT UNIT PT INKA

FADILA ANISA
NRP. 023116 40000 031

Supervisors
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology and Engineering System
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Fadila Anisa
NRP : 023116 40000 031
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ SI Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan
Rekayasa Sistem
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul PERANCANGAN ADAPTIVE EXTENDED KALMAN FILTER UNTUK SPEED SENSORLESS CONTROL MOTOR INDUKSI DI UNIT PENGGERAK KERETA API PT.INKA adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, Yang membuat
pernyataan,



Fadila Anisa

NRP. 0231164000031



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *ADAPTIVE EXTENDED KALMAN
FILTER* UNTUK *SPEED SENSORLESS CONTROL*
MOTOR INDUKSI DI UNIT PENGGERAK KERETA API
PT. INKA**

Oleh:

Fadila Anisa

NRP. 023 116 4000 0031

**Surabaya, 22 Januari 2020
Mengetahui/Menyetujui,**

Dosen Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN. 19760523 200012 2 0



Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

vii



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN

**PERANCANGAN *ADAPTIVE EXTENDED KALMAN*
FILTER UNTUK *SPEED SENSORLESS CONTROL*
MOTOR INDUKSI DI UNIT PENGGERAK KERETA API
PT. INKA**

TUGAS AKHIR





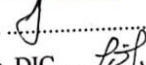

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Fadila Anisa

NRP. 023 116 4000 0031

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T..........(Pembimbing I)
2. Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D..........(Pembimbing II)
3. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T..........(Penguji I)
4. Dr. Ir. Syamsyul Arifin, M.T..........(Penguji II)
5. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc......(Penguji III)
6. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc. DIC..........(Penguji IV)

SURABAYA
Januari 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**PERANCANGAN *ADAPTIVE EXTENDED KALMAN
FILTER* UNTUK *SPEED SENSORLESS CONTROL*
MOTOR INDUKSI DI UNIT PENGGERAK KERETA API
PT INKA**

Nama : Fadila Anisa
NRP : 02311640000031
Departemen : Teknik Fisika FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Dewasa ini, motor induksi banyak digunakan pada bidang transportasi sebagai penggerak berbasis listrik. Salah satu aplikasinya yaitu sebagai penggerak kereta listrik. Informasi kecepatan sangat dibutuhkan untuk sistem pengendalian kecepatan dengan struktur umpan balik (*closed loop*) sehingga dipasang sensor kecepatan. Akan tetapi sensor memiliki keterbatasan resolusi dan harga yang relative mahal. Untuk menggantikan peran sensor digunakan metode *speed sensorless* dengan berbasis observer sehingga dapat diaplikasikan pada *speed sensorless control induction motor*. Pada Tugas Akhir ini, dirancanglah *speed sensorless control* pada motor induksi di unit penggerak kereta api PT. INKA menggunakan algoritma *Adaptive Extended Kalman Filter* (AEKF) sebagai estimator dan *Direct Torque Control* sebagai sistem pengendalian kecepatan tanpa sensor. Hasil pemodelan *plant* pada tegangan masukan 380 Volt motor induksi menunjukkan arus dan fluks konstan pada nilai 4,41 A dan 1,135 Wb di 0,35 detik. Hasil uji open loop respon kecepatan *plant* konstan pada 157,0796275 rad/s di detik ke 0,4 dan kecepatan keluaran estimator konstan pada 157,0796250 rad/s di detik yang sama. Nilai rata-rata error estimator 0,000058% dan rata-rata RMSE 0,0331. Hal ini menunjukkan algoritma AEKF sangat baik digunakan sebagai estimator kecepatan. Selain itu pengujian sistem kontrol dilakukan pada kecepatan 50 rpm, 80

rpm, dan 100 rpm untuk kecepatan rendah serta 350 rpm, 500 rpm, dan 650 rpm untuk kecepatan sedang. Hasil pengujian sistem kontrol menunjukkan tidak ada yang memiliki *error steady state* lebih dari 5% sehingga dapat dikatakan *speed sensorless control* yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik.

Kata Kunci— Adaptive Extended Kalman Filter, Direct Torque Control, Motor Induksi, Speed Sensorless Control.

**DESIGN OF ADAPTIVE EXTENDED KALMAN FILTER
FOR SPEED SENSORLESS CONTROL INDUCTION
MOTOR IN MOVEMENT UNIT PT INKA**

Name : Fadila Anisa
NRP : 0231164000031
Department : Teknik Fisika FTIRS-ITS
Supervisor : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

Nowadays, induction motors are widely used in the field of transportation as electric based movers. One application is as an electric train driver. Speed information is needed for a speed control system with a feedback structure (closed loop) so that a speed sensor is installed. However, the sensor has a high resolution and a relatively expensive price. To take the role of the sensor, the observer-based sensorless method is used so that it can be applied to the sensorless control of the speed of the induction motor. In this Final Project, sensorless speed control is designed on the induction motor in the drive unit PT. INKA uses the Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF) algorithm as an estimator and Direct Torque Control as a sensorless speed control system. The results of *plant* modeling at the 380 Volt input voltage of the induction motor show a constant current and flux at a value of 4.41 A and 1.135 Wb at 0.35 seconds. The results of the open loop response of the *plant* speed response are constant at 157.0796275 rad / s at 0.4 seconds and the output speed estimator is constant at 157.0796250 rad / s at the same second. The average of error is 0,000058% and the average of RMSE is 0,0331. It shows the AEKF algorithm very well to be used as a speed estimator. In addition, control system testing is carried out at speeds of 50 rpm, 80 rpm and 100 rpm for low speeds and 350 rpm, 500 rpm and 650 rpm for medium speeds. The results of the control system test prove that no one has a

steady state error of more than 5% which can be approved by the speed sensorless control that has been designed is work properly.

Keywords — Adaptive Extended Kalman Filter, Direct Torque Control, Induction Motor, Speed Sensorless Control.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikan Tugas Akhir dengan judul “Perancangan Adaptive Extended Kalman Filter Untuk *Speed Sensorless Control* Motor Induksi di Unit Penggerak Kereta Api PT. INKA”

Ucapan terima kasih disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini :

- 1 Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
- 2 Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir dan Bapak Febry Pandu Wijaya, S.T.,M.Eng.,Ph.D. selaku pembimbing kedua.
- 3 Ibu Dr. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes selaku dosen wali yang senantiasa memberikan bimbingan kepada penulis.
- 4 Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
- 5 Kedua orang tua (Bapak Tunas Puasawan dan Ibu Sri Endah P. Y.) dan kakak (Fauziah Aini) serta segenap keluarga yang telah memberikan kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
- 6 Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Fisika Rekayasa.
- 7 Kepada Mas Syahrul Munir yang membantu dalam pengerjaan
- 8 Kepada Raihan Sergi yang memberi dukungan dan meminjamkan laptop selama pengerjaan
- 9 Teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa dan teman-teman asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol.
- 10 Seluruh teman-teman angkatan 2016 yang turut memberikan dukungannya
- 11 Semua pihak yang terlibat dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna penyempurnaan laporan tugas akhir. Semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, Desember 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Motor Induksi.....	5
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	7
2.3 Transformasi Clarke.....	8
2.4 Adaptive Extended Kalman Filter	9
2.6 Direct Torque Control.....	12
BAB III METODOLOGI.....	15
3.1 Pemodelan Motor Induksi.....	15
3.2 Perancangan Adaptive Extended Kalman Filter.....	19

3.3. Pengujian <i>Adaptive Extended Kalman Filter</i>	21
3.4. Perancangan <i>Speed Sensorless Control</i>	22
3.5. Pengujian <i>Speed Sensorless Control</i>	23
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Hasil Uji Validasi Model.....	25
4.2 Pengujian <i>Adaptive Extended Kalman Filter</i>	27
4.3 Pengujian <i>Speed Sensorless Control</i>	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN.....	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor Induksi	5
Gambar 2.2 Bagian-bagian Motor Induksi	6
Gambar 2.3 Stator	7
Gambar 2.4 Rotor.....	7
Gambar 2.5 Representative Kombinasi Vektor	9
Gambar 2.6 Diagram Blok Direct Torque Control	12
Gambar 2.7 Rangkaian Inverter 3 Fasa	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 3.2 Diagram Blok Rancangan Speed Sensorless Control Menggunakan DTC.....	23
Gambar 4.1 Arus <i>Plant</i> Motor Induksi	25
Gambar 4.2 Fluks <i>Plant</i> Motor Induksi.....	26
Gambar 4.3 Kecepatan <i>Plant</i> Motor Induksi	26
Gambar 4.4 Arus <i>Plant</i> dan Arus Estimator AEKF.....	28
Gambar 4.5 Fluks <i>Plant</i> dan Fluks Estimator AEKF.....	28
Gambar 4.6 Autokorelasi Error Arus Alfa.....	30
Gambar 4.7 Autokorelasi Error Arus Beta	30
Gambar 4.8 Autokorelasi Error Fluks Alfa	31
Gambar 4.9 Autokorelasi Error Fluks Beta	31
Gambar 4.10 Kecepatan <i>Plant</i> dan Kecepatan Estimator AEKF	32
Gambar 4.11 Autokorelasi Error Kecepatan.....	34
Gambar 4.12 Perubahan Matriks Kovarian Q.....	35
Gambar 4.13 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 50 rpm Tanpa AEKF.....	36
Gambar 4.14 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 50 rpm dengan AEKF	36
Gambar 4.15 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 80 rpm Tanpa AEKF.....	37
Gambar 4.16 Respon Closed Loop Set Point 80 rpm dengan AEKF.....	37

Gambar 4.17 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 100 rpm Tanpa AEKF.....	38
Gambar 4.18 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 100 rpm dengan AEKF	38
Gambar 4.19 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 350 rpm Tanpa AEKF.....	39
Gambar 4.20 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 350 rpm dengan AEKF	39
Gambar 4.21 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 500 rpm Tanpa AEKF.....	40
Gambar 4.22 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 500 rpm dengan AEKF	40
Gambar 4.23 Respon Sistem Kontrol Close Loop Set Point 650 rpm Tanpa AEKF.....	41
Gambar 4.24 Respon Sistem Kontrol Close Loop Set Point 650 rpm dengan AEKF	41

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Motor Induksi	18
Tabel 3. 2 Hasil Pengukuran No Load dengan Tachometer	21
Tabel 4.1 Perbandingan Kecepatan Hasil Pengukuran dengan Hasil Pemodelan Simulasi Motor Induksi.....	27
Tabel 4.2 Nilai RMSE Antara Arus dan Fluks <i>Plant</i> dengan AEKF	29
Tabel 4.3 Perbandingan Kecepatan Hasil Estimasi AEKF dengan Hasil Simulasi Plant Motor Induksi.....	33
Tabel 4. 4 Parameter Performansi Uji Sistem Kontrol Closed Loop Tanpa AEKF	42
Tabel 4. 5 Parameter Performansi Uji Sistem Kontrol Closed Loop Dengan AEKF.....	42

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017, tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), telah mendorong pihak-pihak terkait untuk memenuhi target penurunan polusi udara dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu upaya yang dilakukan pemerintah untuk mewujudkan RUEN adalah pada bidang transportasi dan otomotif. Indonesia tengah mengembangkan transportasi listrik, karena dinilai lebih ramah lingkungan. Transportasi listrik yang sedang dikembangkan antara lain mobil listrik, motor listrik dan kereta rel listrik (KRL). Pembangunan KRL di beberapa daerah sudah dilaksanakan, seperti commuter line Jabodetabek.

Di dalam dunia industri penggunaan jenis motor banyak digunakan, terutama untuk bidang transportasi, termasuk transportasi berbasis listrik. Motor induksi lebih sering digunakan pada dunia industri dan transportasi dikarenakan konstruksi yang kuat, harga yang relative murah. Motor induksi adalah sebuah alat yang berfungsi untuk menkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Disebut motor induksi karena motor ini bekerja dengan adanya arus yang terinduksi sebagai akibat dari adanya perbedaan relative antara putaran rotor dengan medan magnet berputar yang dihasilkan oleh arus stator. Secara umum motor induksi terbagi menjadi dua yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa. [1]

Pada banyak aplikasi, motor induksi dituntut beroperasi pada kecepatan tertentu dengan beban varian. Untuk itu, perlu digunakan sistem pengendalian kecepatan dengan struktur umpan balik (*close loop*). Dalam hal ini, informasi kecepatan sangat dibutuhkan sehingga dipasang sensor kecepatan seperti sensor posisi, tachogenerator, atau digital shaft encoder. Akan tetapi sensor memiliki keterbatasan resolusi dan persyaratan pemasangan serta harga yang relatif mahal. Oleh karena itu banyak peneliti mengembangkan penelitian tentang motor induksi

tanpa sensor atau dikenal sebagai *sensorless induction motor*. Selain itu penghapusan sensor dapat mengurangi biaya dan dapat meningkatkan keandalan motor.

Salah satu cara untuk menggantikan peran sensor adalah dengan menggunakan metode observer. Observer mampu mengestimasi variabel keadaan sebuah sistem dengan menggunakan model analitis [2]. Salah satu jenis observer yang mampu bekerja pada kondisi ber-noise dan sistem non linier adalah adaptive extended Kalman Filter (AEKF). AEKF merupakan pengembangan dari algoritma Standar Extended Kalman Filter (EKF) yang dapat memperbarui matriks kovarian Q secara on-line, dan menghitung matriks kovarian R berdasarkan matriks kovarian Q tersebut. Sehingga AEKF dipercaya memiliki keandalan dan performansi lebih tinggi daripada EKF. Pada penelitian ini akan dirancang sistem pengendalian tanpa sensor atau speed sensorless control menggunakan metode Adaptive Extended Kalman Filter.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil permasalahan sebagai berikut :

- a. Bagaimana merancang *adaptive extended kalman filter* sebagai estimator kecepatan?
- b. Bagaimana merancang sistem *speed sensorless control* untuk motor induksi menggunakan *adaptive extended kalman filter*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah merancang sistem *speed sensorless control* motor induksi dengan metode adaptive extended kalman filter sebagai estimator kecepatan motor menggunakan data pengukuran arus dan tegangan masukan motor induksi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Parameter motor induksi mengacu pada motor induksi yang digunakan pada unit penggerak kereta api produksi PT. INKA (Persero).
- b. Data yang digunakan untuk estimator adalah data arus dan tegangan masukan motor induksi.
- c. Validasi model dilakukan dengan mengacu pada hasil pengukuran saat motor induksi beroperasi open loop.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Motor Induksi adalah salah satu jenis motor listrik, dimana Motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. [3] Motor induksi sendiri secara umum dibagi menjadi 2 jenis yaitu motor induksi 1 fasa dan motor induksi 3 fasa.



Gambar 2.1 Motor Induksi [4]

Beberapa kelebihan dari motor induksi adalah :

- a. Bentuknya sederhana, dengan konstruksi yang cukup kuat.
- b. Biayanya murah dan dapat diandalkan.
- c. Efisiensinya tinggi dan pada keadaan normal tidak memerlukan sikat, sehingga rugi-rugi gesekan (losis) dapat dikurangi.
- d. Perawatan yang minimum.

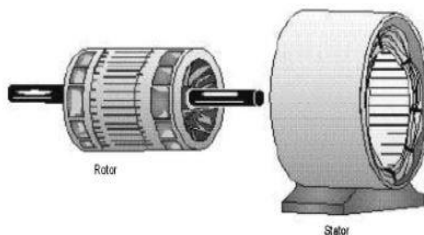
Sedangkan kelemahan dari motor induksi di antaranya adalah :

- a. Pengaturan kecepatannya berpengaruh pada efisiensinya.
- b. Kecepatan akan berkurang jika bebannya bertambah.
- c. Kopel mulanya lebih rendah dari pada mesin arus searah paralel.

2.1.1. Stator

Stator terdiri dari susunan laminasi inti dimana setiap tumpukan laminasi inti ini memiliki jalur-jalur berbentuk silindris yang didalamnya terdiri dari kumparan-kumparan yang dililitkan. Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi. Tiap kumparan pada motor induksi tiga fasa tersebar dalam jalur-jalur yang disebut belitan fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris. Bagian bagian dari stator adalah

- a. Lempengan Inti
- b. Tumpukan Inti dengan Kertas Isolasi pada beberapa alurnya
- c. Tumpukan inti dan kumpangan dalam cangkang stator

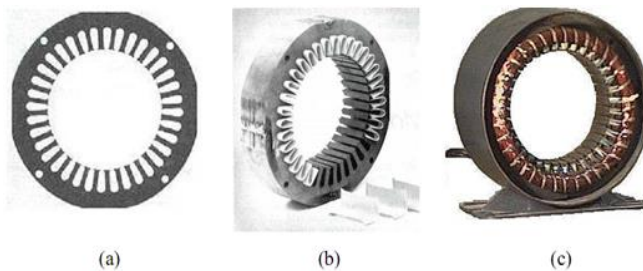


Gambar 2. 2 Bagian-bagian Motor Induksi [5]

2.1.2. Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada

kumparan rotor. Rotor terdiri dari kumpulan – kumpulan lilitan kumparan tembaga. Terminal belitan rotor dihubungkan dengan tiga cincin slip yang terisolasi dan terikat pada poros rotor. Rotor belitan yang berhungunan loop tertutup dengan slip ring mendapatkan arus melalui fluks dalam bentuk induksi dari stator. Pada rotor belitan, cincin slip terhubung ke sebuah tahanan luar yang dapat mengurangi arus start.



Gambar 2. 3 Stator [6]



Gambar 2. 4 Rotor [7]

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja dari motor induksi adalah motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Aliran arus ac tiga fasa melintasi kumparan stator sehingga menimbulkan medan magnetic bolak-balik (polaritasnya) di ruang rotor. Medan magnetik bolak-balik

inilah yang berperan mempertahankan putaran rotor. [8] Bila kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator. Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi. Bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot-slotnya yang dililitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutub akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putar medan stator dan sebaliknya.

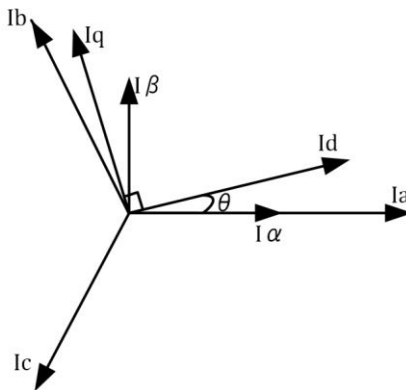
2.3 Transformasi Clarke

Sumber tegangan tiga fasa dalam istilah umum di Indonesia lebih familiar disebut dengan nama sumber tegangan R-S-T. Dan penamaan ini berasal dari penggunaan simbol R, S, dan T untuk penamaan tiap fasanya serta digunakan simbol N untuk penghantar netral. Sumber tegangan tiga fasa dalam tugas akhir ini dimisalkan dengan simbol A-B-C untuk merepresentasikan tiap fasanya. Sumber tegangan tiga fasa sendiri merupakan suatu

sumber tegangan AC yang menggunakan 3 penghantar yang sama namun terpisah oleh sudut fasa sebesar 120° .

Namun, untuk merepresentasikan tegangan pada motor induksi, dibutuhkan tegangan yang terpisah oleh sudut fasa sebesar 90° yang biasa disebut dengan tegangan $(\alpha\beta)$. Oleh karena itu dibutuhkan suatu transformasi untuk mengubah analisis fasor dari bentuk 3D menjadi 2D. Fasor tiga fasa (abc) disederhanakan menjadi $(\alpha\beta)$. Penggambaran transformasi clarke tertera pada Gambar 2.6. Adapun persamaan transformasi clarke ditunjukkan pada persamaan (2.1):

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$



Gambar 2. 5 Representative Kombinasi Vektor [9]

2.4 Adaptive Extended Kalman Filter

Algoritma pada Kalman filter merupakan suatu fase kerja pengolahan state vektor. Fase kerja ini terdiri dari dua langkah, yaitu:

- a. Prediksi
- b. Koreksi

Filter kalman digunakan untuk sistem yang linier. Sedangkan hasil respon motor induksi adalah non linier, sehingga extended filter kalman lebih relevan digunakan pada penelitian ini karena bisa digunakan untuk sistem non-linier. [11]

Extended filter kalman adalah suatu cara untuk mengestimasi suatu sistem yang memiliki respon linier. Dikarenakan motor induksi adalah jenis motor yang memiliki sistem non-linier maka extended filter kalman yang dapat digunakan untuk *plant* motor induksi. Extended extended filter kalman adalah algoritma untuk mengestimasi variable $x^*_{(k+1/k)} \in R^n$ dari suatu sistem dinamik stokastik non linier. Extended filter kalman ini menggabungkan sistem dan pengukuran dalam mengestimasi variable keadaan. Dimana $x^*_{(k+1/k)} \in R^n$ adalah variable keadaan dari sistem dinamik stokastik non linier dan variable pengukuran. [1] Pada Extended Kalman Filter (EKF) matriks Q dan matriks R dianggap sebagai konstanta dan di cari melalui metode *trial-and-error* yang memakan banyak waktu. Oleh karena itu, matriks Q diperbarui secara online dengan menggunakan pendekatan Adaptive Extended Kalman Filter (AEKF) sehingga matriks R dapat dihitung. Untuk membuktikan keefektifan algoritma AEKF, kinerja estimasi dari algoritma AEKF dibandingkan dengan algoritma EKF di bawah kondisi yang sulit atau rumit untuk rentang kecepatan yang luas [12]

Matriks Q pada metode EKF memiliki syarat-syarat diantaranya yaitu berukuran $n \times n$ dimana n adalah jumlah *state* dari model *plant* yang akan diestimasi, determinan dari matriks Q $\neq 0$, dan merupakan matriks diagonal. Kemudian matriks R berukuran $m \times m$ dimana m adalah jumlah input *state* dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\sigma_R^2 = \sigma_{sensor}^2 + \sigma_{ADC}^2 \quad (2.2)$$

$$R = I \times \sigma_R^2 \quad (2.3)$$

Dimana :

σ_{sensor}^2 = standar deviasi data pengukuran

σ_{ADC}^2 = standar deviasi error pengukuran *analog-to-digital converter*

Langkah –Langkah untuk adaptive extended Kalman filter adalah [12]:

- a. Pembentukan state vector prediksi

$$x_{(k+1)}^* = A_d \hat{x}_{(k)} + B_d u_{(k)} \quad (2.4)$$

- b. Estimasi covariance matrik pada extended filter kalman

$$P_{(k+1)}^* = f_{(k+1)} \hat{P}_{(k)} f_{(k+1)}^T + Q_{(k)} \quad (2.5)$$

Dimana :

$$f_{(k+1)} = \frac{\partial[A_d X + B_d u]}{\partial x} \quad (2.6)$$

- c. Penetapan Gain Matrik Extended filter kalman

$$K_{(k+1)} = P_{(k+1)}^* h_{(k+1)}^T [h_{(k+1)} P_{(k+1)}^* h_{(k+1)}^T + R_{(k+1)}]^{-1} \quad (2.7)$$

Dimana R adalah output noise covariance matrix

$$h_{(k+1)} = \frac{\partial[C_d X]}{\partial x} \quad \text{Untuk } x = x_{(k+1)}^* \quad (2.8)$$

- d. Estimasi state yang baru

$$\hat{x}_{(k+1)} = x_{(k+1)}^* + K_{(k+1)} [y_{(k+1)} - \hat{y}_{(k+1)}] \quad (2.9)$$

Dimana :

$$\hat{y}_{(k+1)} = h_{(k+1)} x_{(k+1)}^* \quad (2.10)$$

- e. Update error matriks kovarian

$$\hat{P}_{(k+1)} = P_{(k+1)}^* - K_{(k+1)} h_{(k+1)} P_{(k+1)}^* \quad (2.11)$$

- f. Estimasi kovarian dari residu inovasi diperoleh dari rata-rata sekuens residu sebelumnya untuk panjang jendela N :

$$\hat{C}_{V_{(k)}} = \frac{1}{N} \sum_{j=j_0}^k V_{(j)} V_{(j)}^T \quad (2.12)$$

- g. Estimasi kebisingan proses diperoleh

$$\hat{Q}_{(k+1)} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=j_0}^k \Delta x_{(j)} \Delta x_{(j)}^T \approx K_{(k)} \hat{C}_{V_{(k)}} K_{(k)}^T \quad (2.13)$$

- h. Ulangi langkah kembali ke langkah pertama hingga iterasi ke-k

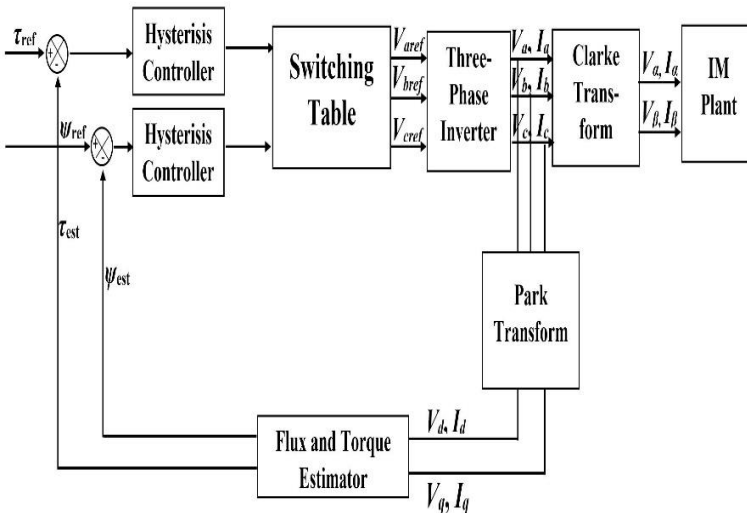
Dengan :

$x_{(k+1)}^*$ = vektor state diperluas (*extended state vector*)

- $\hat{x}_{(k+1)}$ = estimasi state baru
 $P_{(k+1)}^*$ = matriks kovarian error ekstrapolasi
 $\hat{P}_{(k+1)}$ = matriks kovarian error estimasi state
 $f_{(k+1)}$ = fungsi untuk me-linearisasi model non linear.
 $K_{(k+1)}$ = *update* gain estimator
 $Q_{(k)}$ = matriks kovarian noise sistem.
 $\hat{Q}_{(k+1)}$ = *update* matriks kovarian noise sistem
 $R_{(k+1)}$ = matriks kovarian noise pengukuran.

2.6 Direct Torque Control

Keuntungan dari induksi motor telah menentukan perkembangan penting dari penggerak listrik, dengan mesin induksi sebagai elemen eksekusi, untuk semua aspek terkait: *starting, braking, speed reversal, speed change* dan sebagainya. Operasi dinamis dari sistem penggerak motor induksi memiliki peran penting dalam kinerja keseluruhan yang menjadi bagiannya. [13]



Gambar 2. 6 Diagram Blok Direct Torque Control

Direct torque control (DTC) drive motor induksi menawarkan kinerja tinggi dalam hal kesederhanaan pengendali dan respon torsi elektromagnetik yang cepat. Dengan sifat dominan, *direct torque control* motor induksi merupakan alternative dalam aplikasi industri. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6, prinsip DTC klasik adalah kontrolnya dipisahkan dari fluks stator dan torsi elektromagnetik menggunakan kontrol histerisis kesalahan fluks stator dan kesalahan torsi serta posisi fluks stator. [14]

Gambar 2.6 menunjukkan diagram blok dari *Direct Torque Control* motor induksi. Namun, masalah utama adalah bahwa ketika beroperasi pada kondisi tunak, DTC menghasilkan tingkat tinggi riak torsi, frekuensi *switching* variable inverter selama periode fundamental.

Dalam mengendalikan motor induksi, perlu dilakukan transformasi dari tiga fasa (a-b-c) menjadi dua fasa saja menggunakan transformasi clarke (α - β) dan transformasi park (d - q) untuk memudahkan karena mengurangi kompleksitas sistem menggunakan tegangan DC daripada tegangan AC. Pendekatan ini sangat berguna untuk kebutuhan kontrol vektor karena memungkinkan mengendalikan hanya satu komponen flux alih-alih dua komponen. [9]

Inverter direpresentasikan dengan sumber tegangan di sisi AC. Sinyal referensi tegangan AC dari *switching table* menghasilkan tegangan tiga fasa pada output inverter. Model rangkaian inverter tiga fasa yang digunakan pada *Direct Torque Control* ditunjukkan pada Gambar 2.7. terdiri dari satu sumber arus terkontrol di sisi DC dan tiga sumber tegangan terkontrol di sisi AC. Sumber arus DC memenuhi persamaan berikut.

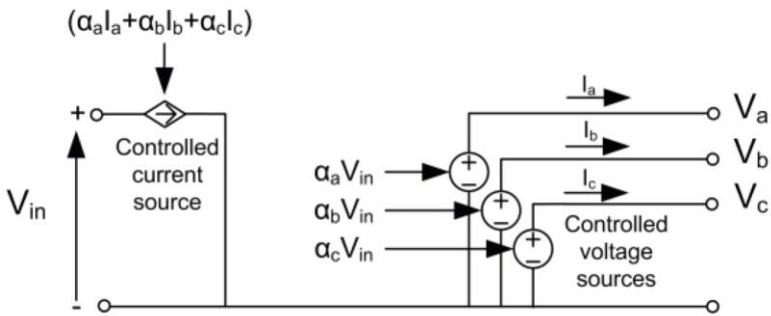
$$I_{dc} = \alpha_a I_a + \alpha_b I_b + \alpha_c I_c \quad (2.14)$$

Dimana $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ adalah rasio antara tegangan fasa dan tegangan DC bus. Selain itu tegangan keluaran inverter tiga fasa memenuhi persamaan berikut.

$$V_a = \alpha_a V_{in} \quad (2.15)$$

$$V_b = \alpha_b V_{in} \quad (2.16)$$

$$V_b = \alpha_b V_{in} \quad (2.17)$$



Gambar 2.7 Rangkaian Inverter 3 Fasa

BAB III METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah mendapatkan informasi kecepatan dengan masukan dari *Adaptive Extended Kalman Filter* berupa tegangan dan arus untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi. Selain itu dirancang sistem pengendalian kecepatan berbasis *sensorless* menggunakan *Direct Torque Control*. Penelitian ini dimulai dengan mencari sumber – sumber literatur pada jurnal mengenai motor induksi, *Adaptive Extended Kalman Filter*, serta *Direct Torque Control*. Referensi yang didapatkan dari studi literatur ini digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini. Secara keseluruhan metode penelitian tugas akhir ini dapat dilihat melalui diagram alir pada Gambar 3.1 di bab ini.

3.1 Pemodelan Motor Induksi

Pemodelan motor induksi dapat ditinjau sebagai kerangka acuan stator atau kerangka acuan rotor dan parameter yang digunakan dalam pemodelan adalah arus stator atau arus rotor dengan fluks rotor. Sehingga persamaan motor induksi dapat dinyatakan sebagai berikut : [10]

$$\frac{di_{\alpha s}^s}{dt} = -k_{\Gamma}(L_s R_r + L_r R_s)i_{\alpha s}^s + \frac{P}{2}\omega_0 i_{\beta s}^s + k_{\Gamma}R_r \lambda_{\alpha s}^s + \frac{P}{2}k_{\Gamma}\omega_0 \lambda_{\beta s}^s + k_{\Gamma}L_r V_{\alpha s}^s \quad (3.1)$$

$$\frac{di_{\beta s}^s}{dt} = -k_{\Gamma}(L_s R_r + L_r R_s)i_{\beta s}^s - \frac{P}{2}\omega_0 i_{\alpha s}^s + k_{\Gamma}R_r \lambda_{\beta s}^s - \frac{P}{2}k_{\Gamma}\omega_0 \lambda_{\alpha s}^s + k_{\Gamma}L_r V_{\beta s}^s \quad (3.2)$$

$$\frac{d\lambda_{\alpha s}^s}{dt} = -R_s i_{\alpha s}^s + V_{\alpha s}^s \quad (3.3)$$

$$\frac{d\lambda_{\beta s}^s}{dt} = -R_s i_{\beta s}^s + V_{\beta s}^s \quad (3.4)$$

$$\frac{d\omega_0}{dt} = \frac{2}{3} \frac{P}{2J} (\lambda_{\alpha s}^s i_{\beta s}^s - \lambda_{\beta s}^s i_{\alpha s}^s) - \frac{T_L}{J} \quad (3.5)$$

Dimana :

$$k_{\Gamma} = \frac{1}{L_s^2 - L_s L_r} \quad (3.6)$$

$$T = \frac{2P}{3} \left(\lambda_{\alpha s}^s i_{\beta s}^s - \lambda_{\beta s}^s i_{\alpha s}^s \right) \quad (3.7)$$

$$\lambda_s^s = L_s i_s^s + L_m i_r^s \quad (3.8)$$

$$\lambda_r^s = L_m i_s^s + L_r i_r^s \quad (3.9)$$

Sehingga persamaan motor induksi menggunakan kerangka acuan stator dapat dinyatakan sebagai persamaan nonlinear orde-lima berikut

$$\begin{aligned} \frac{d i_{\alpha s}^s}{dt} &= \frac{L_m R_r}{(L_s L_r - L_m^2) L_r} \lambda_{\alpha r}^s + \frac{P L_m}{2(L_s L_r - L_m^2)} \omega_0 \lambda_{\beta r}^s - \\ &\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_s L_r - L_m^2) L_r} i_{\alpha s}^s + \frac{L_r}{(L_s L_r - L_m^2)} V_{\alpha s}^s \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d i_{\beta s}^s}{dt} &= \frac{L_m R_r}{(L_s L_r - L_m^2) L_r} \lambda_{\beta r}^s - \frac{P L_m}{2(L_s L_r - L_m^2)} \omega_0 \lambda_{\alpha r}^s - \\ &\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_s L_r - L_m^2) L_r} i_{\beta s}^s + \frac{L_r}{(L_s L_r - L_m^2)} V_{\beta s}^s \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\frac{d \lambda_{\alpha s}^s}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \lambda_{\alpha r}^s + \frac{P}{2} \omega_0 \lambda_{\beta r}^s + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{\alpha s}^s \quad (3.12)$$

$$\frac{d \lambda_{\beta s}^s}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \lambda_{\beta r}^s + \frac{P}{2} \omega_0 \lambda_{\alpha r}^s + \frac{R_r L_m}{L_r} i_{\beta s}^s \quad (3.13)$$

$$\frac{d \omega_0}{dt} = \frac{2 P L_m}{3 J L_r} \left(\lambda_{\alpha s}^s i_{\beta s}^s - \lambda_{\beta s}^s i_{\alpha s}^s \right) - \frac{T_L}{J} \quad (3.14)$$

dengan :

R_s, R_r = Hambatan stator dan hambatan rotor

$\lambda_{\alpha r}^s, \lambda_{\alpha s}^s$ = α -axis fluks rotor dan fluks stator

$\lambda_{\beta r}^s, \lambda_{\beta s}^s$ = β -axis fluks rotor dan fluks stator

$V_{\alpha s}^s, i_{\alpha s}^s$ = α -axis tegangan dan arus stator

$V_{\beta s}^s, i_{\beta s}^s$ = β -axis tegangan dan arus stator

L_r, L_s, L_m = Induktansi rotor, induktansi stator, dan induktansi mutual

ω_0 = kecepatan rotor

k_{Γ} = Konstanta.

T = Torsi Elektromagnetik

T_L = Torsi beban

P = Jumlah Pole

J = Momen Inersia

Selanjutnya pemodelan motor induksi dibuat pada software Matlab dengan asumsi semua parameter diketahui. Motor induksi adalah *plant* nonlinier, dengan pemodelan state space sebagai berikut

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.15)$$

$$y = Cx \quad (3.16)$$

Mengacu pada persamaan (3.10)-(3.14) pada bab sebelumnya, maka didapatkan matriks $A \in R^{5 \times 5}$ dan $B \in R^{5 \times 2}$ sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} -A_1 & 0 & A_2 & A_3 & 0 \\ 0 & -A_1 & -A_3 & A_2 & 0 \\ A_4 & 0 & -A_5 & -pole \omega_r/2 & 0 \\ 0 & A_4 & -pole \omega_r/2 & -A_5 & 0 \\ -A_6 \lambda_{\beta r} & A_6 \lambda_{\alpha r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Dimana :

$$A_1 = \frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{\sigma L_r^2 L_s} \quad (3.19)$$

$$A_2 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_r^2 L_s} \quad (3.20)$$

$$A_3 = \frac{P L_m \omega_r}{2 \sigma L_r L_s} \quad (3.21)$$

$$A_4 = \frac{L_m R_r}{L_r} \quad (3.22)$$

$$A_5 = \frac{R_r}{L_r} \quad (3.23)$$

$$A_6 = \frac{2 P L_m}{3 \sigma L_r} \quad (3.24)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad (3.25)$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} \quad (3.26)$$

Dan memiliki matriks $C \in R^{2 \times 5}$ sebagai berikut :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Dengan matriks $x \in R^{5 \times 1}$ dan matriks $A \in R^{2 \times 1}$ sebagai berikut.

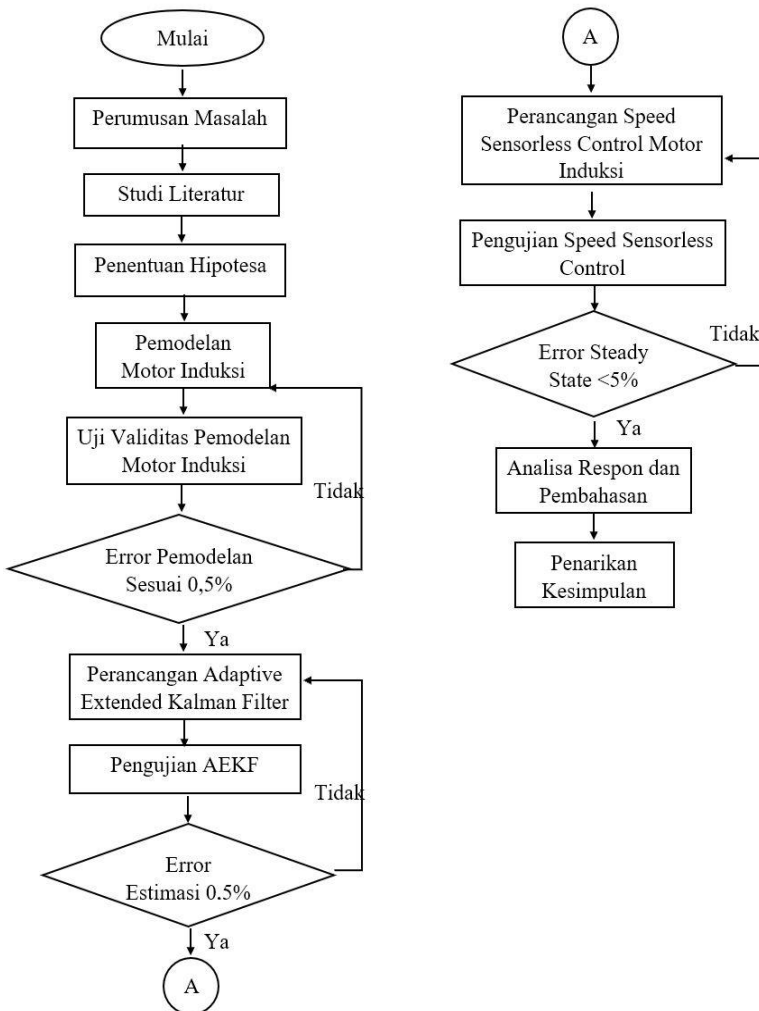
$$x = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$u = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Parameter motor induksi yang digunakan mengacu pada jurnal [2] dikarenakan motor induksi ini mempunyai empat *pole*, kapasitas sebesar 1.5kW dan frekuensi 50 Hz, dimana sama dengan motor induksi yang digunakan pada saat pengambilan data di PT.INKA. Parameter motor induksi tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Parameter Motor Induksi [2]

No	Nama Parameter	Lambang	Nilai
1	Induktansi Mutal	Lm	0.258 H
2	Induktansi Rotor	Lr	0.274 h
3	Induktansi Stator	Ls	0.274 H
4	Hambatan Rotor	Rr	3.805 Ohm
5	Hambatan Stator	Rs	4.850 Ohm
6	Inersia Rotor	J	0.031Kgm ²
7	Pole	P	4
8	Sampling Time	Ts	10 ⁻⁶
9	Frekuensi	F	50 Hz



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Perancangan Adaptive Extended Kalman Filter

Perancangan *adaptive extended kalman filter* digunakan untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi, dengan input berupa tegangan dan arus. Didalam algoritma *adaptive extended*

kalman filter akan ada perubahan bentuk domain kontinu menjadi bentuk domain diskrit. Matriks diskrit dari motor induksi adalah sebagai berikut :

$$A_d = I_{5 \times 5} + T_s A \quad (3.30)$$

$$A_d = I_{5 \times 5} + T_s \begin{bmatrix} -A_1 & 0 & A_2 & A_3 & 0 \\ 0 & -A_1 & -A_3 & A_2 & 0 \\ A_4 & 0 & -A_5 & -pole \omega_r/2 & 0 \\ 0 & A_4 & -pole \omega_r/2 & -A_5 & 0 \\ -A_6 \lambda_{\beta r} & A_6 \lambda_{\alpha r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d = T_s B \quad (3.31)$$

$$B_d = T_s \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_d = C \quad (3.32)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Menggunakan bentuk diskrit diatas dan berdasarkan persamaan (2.4)-(2.13) maka dapat disusun algoritma *Adaptive Extended Kalman Filter* (AEKF). Dimana matriks $x^*_{(k+1)} \in R^{5 \times 1}$, $f_{(k+1)} \in R^{5 \times 5}$, $R_k \in R^{2 \times 2}$, $h_{(k+1)} \in R^{2 \times 5}$, dan $y_{(k+1)} \in R^{2 \times 1}$ didefinisikan sebagai berikut

$$x^*_{(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 - (A_1 T_s) x_1 + A_2 T_s x_3 + A_3 T_s x_4 x_5 + T_s B_1 V_{\alpha s} \\ 1 - (A_1 T_s) x_2 - A_3 T_s x_3 x_5 + A_2 T_s x_4 + T_s B_1 V_{\beta s} \\ A_4 T_s x_1 + (1 - A_5 T_s) x_3 - T_s x_4 x_5 \\ A_4 T_s x_2 + T_s x_3 x_5 + (1 - A_5 T_s) x_4 \\ -A_6 T_s x_4 x_1 + A_6 T_s x_3 x_2 + x_5 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$f_{(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 - T_s A_1 & 0 & A_2 T_s & A_3 T_s x_5 & A_3 T_s x_4 \\ 0 & 1 - T_s A_1 & -A_3 T_s x_5 & A_2 T_s & A_3 T_s x_3 \\ A_4 T_s & 0 & 1 - T_s A_5 & -pole x_5/2 & T_s x_4 \\ 0 & A_4 T_s & -pole x_5 T_s/2 & 1 - T_s A_5 & T_s x_3 \\ -A_6 T_s x_4 & A_6 T_s x_3 & A_6 T_s x_2 & -A_6 T_s x_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 2 \times 10^{-8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \times 10^{-8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \times 10^{-8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} 2 \times 10^{-4} & 0 \\ 0 & 2 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$h_{(k+1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$y_{(k+1)} = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Tabel 3. 2 Hasil Pengukuran No Load dengan Tachometer

Tegangan (Volt)	Kecepatan Motor Induksi Tachometer (rpm)	Kecepatan Motor Induksi Tachometer (Rad/s)
378	1503	157,314
296	1500	157
263	1499	156,8953333
226	1498	156,7906667

3.3. Pengujian Adaptive Extended Kalman Filter

Berikutnya dilakukan tahapan pengujian pada *adaptive extended kalman filter* dengan cara membandingkan output yang telah didapat dari motor induksi sebagai acuan, dengan hasil output *adaptive extended kalman filter* sebagai pengestimasi.

Extended kalman filter dapat di katakan baik apa bila bisa mendapatkan respon yang sama dengan hasil respon motor induksi atau dengan error estimasi kurang dari 0.5%. Dengan melakukan Percobaan tanpa beban pada motor induksi dengan pengambilan menggunakan alat pengukur putaran yaitu tachometer . Sehingga dari pengujian tersebut didapatkan data kecepatan yang tertera pada Tabel 3.2

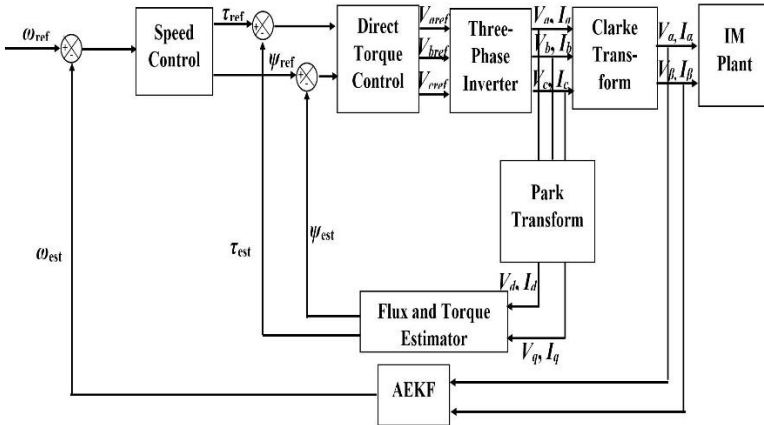
3.4. Perancangan *Speed Sensorless Control*

Speed sensorless control yang akan dirancang pada penelitian ini menggunakan metode *Direct Torque Control*. DTC ini sendiri merupakan salah satu metode yang digunakan dalam *drive* frekuensi variabel untuk mengendalikan torsi dan kecepatan motor listrik AC tiga fasa yang melibatkan perhitungan estimasi fluks dan torsi magnetic motor berdasarkan pada tegangan dan arus motor yang diukur.

Struktur dari *speed sensorless control* motor induksi menggunakan sistem *direct torque control*, estimator flux dan torsi, serta estimator kecepatan AEKF yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Perbedaan antara kecepatan referensi dengan kecepatan estimasi menjadi masukan untuk *speed control* yang kemudian memberikan output berupa torsi referensi dan fluks referensi. Perbedaan antara torsi maupun fluks referensi dengan hasil estimasinya menjadi masukan untuk *Direct Torque Controller* dan memberikan hasil pengukuran tegangan referensi. Tegangan referensi dilewatkan inverter 3 fasa untuk merubahnya menjadi tegangan dan arus masukan *plant* induksi motor yang sebelumnya akan di transformasi dari bentuk tiga fasa a-b-c menjadi dua fasa α - β dan d - q . Informasi tegangan dan arus α - β digunakan oleh algoritma AEKF untuk memberikan estimasi kecepatan serta informasi tegangan arus d - q digunakan oleh estimator flux dan torsi untuk memberikan estimasi flux dan torsi sebagai *feedback* sistem *closed loop* ini.

Speed control merupakan regulator PI dengan gain kontrol proposional sebesar 0,1 dan gain kontrol integral sebesar 0,01. Blok *direct torque control* terdiri dari *hysteresis control* dan

switching table seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. *Three-Phase Inverter* (Inverter tiga fasa) memiliki rangkaian seperti pada Gambar 2.7 yang memenuhi (2.14)-(2.17)



Gambar 3. 2 Diagram Blok Rancangan Speed Sensorless Control Menggunakan DTC

3.5. Pengujian *Speed Sensorless Control*

Pengujian *speed sensorless direct torque control* dilakukan untuk mengetahui kinerja atau performansi dari sistem kendali kecepatan tanpa sensor seperti *settling time*, *rise time*, *maximum overshoot*, dan *error steady state*.

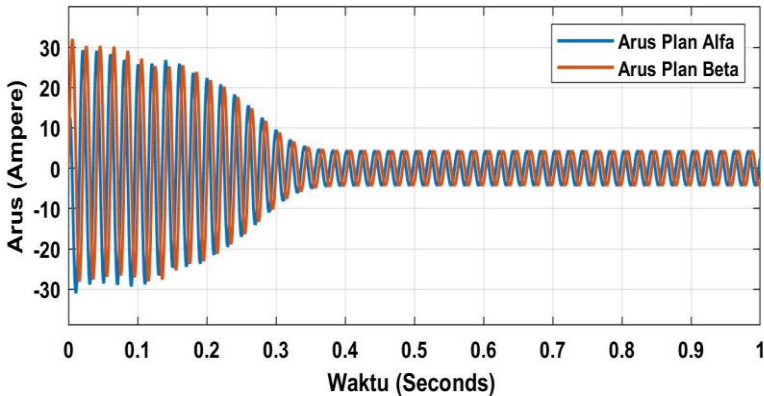
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Validasi Model

Simulasi yang dilakukan di Matlab untuk uji validasi model menggunakan parameter-parameter yang terdapat pada Tabel 3.1.

Penggunaan parameter seperti yang ditunjukkan Tabel 3.1 disebabkan oleh parameter pada jurnal [2] ini mempunyai empat *pole*, kapasitas sebesar 1.5kW dan frekuensi 50 Hz dimana sama dengan motor induksi yang digunakan pada saat pengambilan data di PT.INKA.

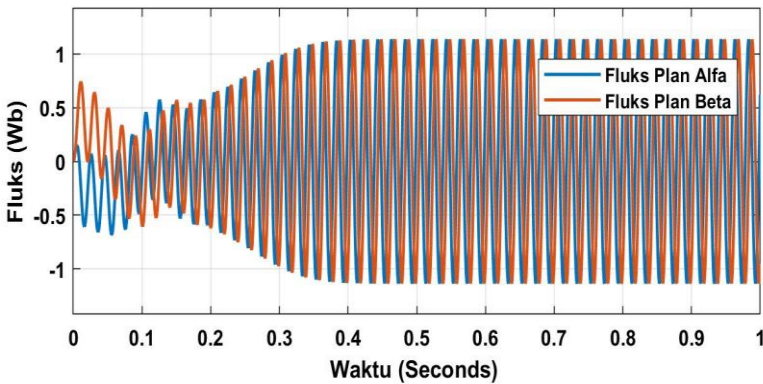


Gambar 4.1 Arus *Plant* Motor Induksi

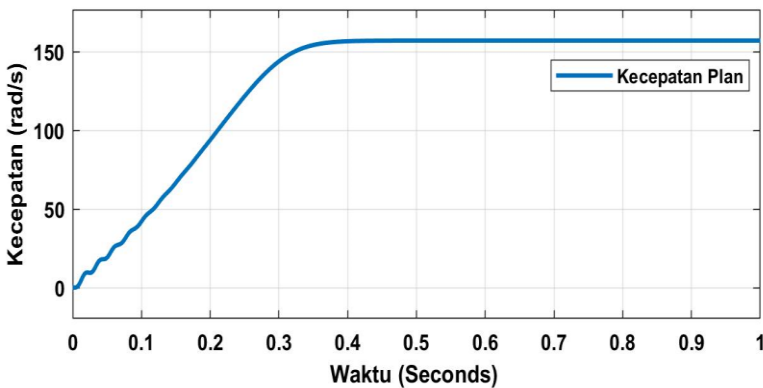
Dapat dilihat pada Gambar 4.1 terdapat arus keluaran ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) dari *plant* motor induksi. Pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa baik arus $i_{\alpha s}$ maupun $i_{\beta s}$ mengalami kondisi transien dari sebesar 30 A menjadi 4,41 A selama 0,35 sekon. Setelah itu respon arus steady pada nilai *peak* sebesar 4.41 A.

Fluks keluaran ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) dari *plant* motor induksi ditunjukkan pada Gambar 4.2. Dapat dilihat dari gambar tersebut, $\lambda_{\alpha r}$ naik dari kondisi 0 menuju ke 0,8 pada 0,013 detik pertama, kemudian $\lambda_{\alpha r}$ mengalami kondisi transien hingga mencapai steady pada 1,138 Wb di detik 0,35 sekon. Sedangkan $\lambda_{\beta r}$ dari

titik 0 turun hingga ke nilai $-0,36$ di detik ke $0,008$ s dan mulai steady pada nilai *peak* sebesar $1,138$ pada $0,35$ s. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, arus mengalami kondisi transien hingga detik ke $0,38$, begitupun dengan respon fluks yang mengalami kondisi transien hingga di detik yang sama. Dan saat respon arus mulai menunjukkan keadaan steady, respon fluks juga mengalami kondisi steady. Hal ini menunjukkan bahwa arus dan fluks memiliki hubungan satu sama lain.



Gambar 4.2 Fluks *Plant* Motor Induksi



Gambar 4.3 Kecepatan *Plant* Motor Induksi

Gambar 4.3 menampilkan kecepatan *plant* ketika tegangan 380 Volt. Respon kecepatan motor (ω_r) *plantt* naik dari 0 rad/s menuju kondisi steady pada kecepatan 157.0796275 rad/s di 0,35 detik.

Selain itu dilakukan pengujian dengan berbagai tegangan masukan dan dibandingkan antara kecepatan motor induksi hasil pengukuran menggunakan tachometer dengan kecepatan motor induksi hasil simulasi.

Tabel 4.1 Perbandingan Kecepatan Hasil Pengukuran dengan Hasil Pemodelan Simulasi Motor Induksi

Tegangan (Volt)	Kecepatan Motor Induksi Tachometer (Rad/s)	Kecepatan Motor Induksi Simulasi (Rad/s)	Error (%)
378	157,314	157.0796275	0,149%
296	157	157,0790483	0,050%
263	156,8953333	157,0380256	0,091%
226	156,7906667	157,0013025	0,133%
Rata-rata			0,106%

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa error kecepatan antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi pemodelan tidak ada yang diatas 0,5% sehingga dapat dikatakan bahwa pemodelan yang dirancang telah sesuai.

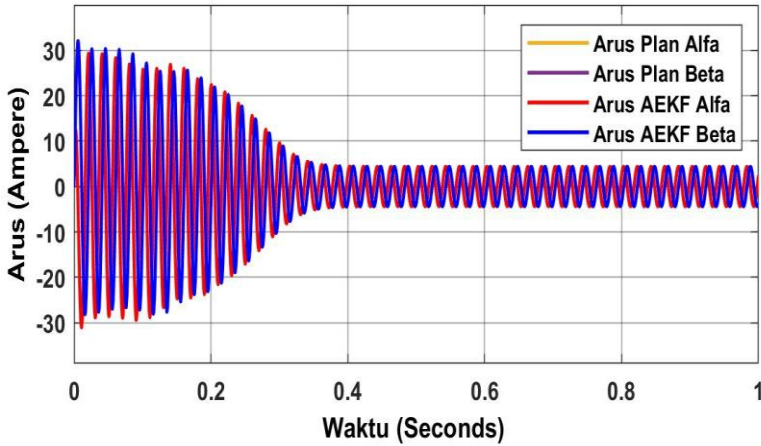
4.2 Pengujian *Adaptive Extended Kalman Filter*

Berdasarkan algoritma yang telah dijelaskan pada bab dua. Dengan masukan arus dan tegangan, akan diperoleh estimasi kecepatan dari motor induksi tiga fasa

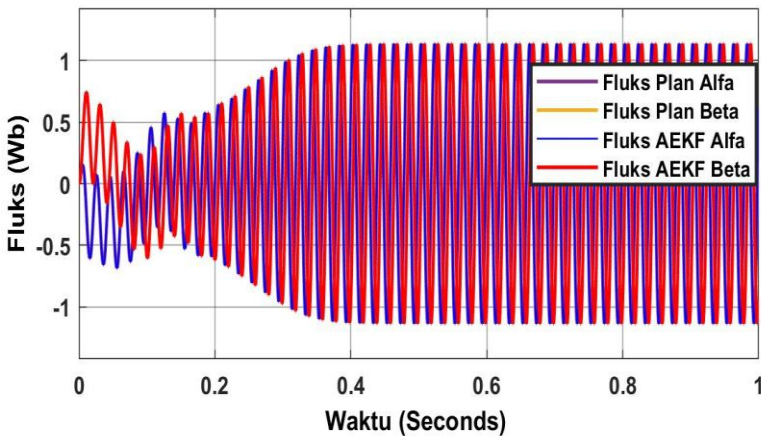
Berdasarkan pada Gambar 4.4 respon arus estimasi menunjukan nilai yang berhimpitan dengan respon arus *Plant*. Arus estimasi menunjukkan nilai steady pada 4.41 A di 0,35 detik, nilai estimasi arus tersebut berhimpitan dengan arus *Plantt*.

Gambar 4.5 menunjukkan respon fluks estimasi, dapat dilihat bahwa fluks estimasi menunjukkan nilai steady pada 1.135

Wb di 0.35 detik, dimana nilai estimasi fluks tersebut juga berhimpitan dengan fluks *Plant*.



Gambar 4.4 Arus *Plant* dan Arus Estimator AEKF



Gambar 4.5 Fluks *Plant* dan Fluks Estimator AEKF

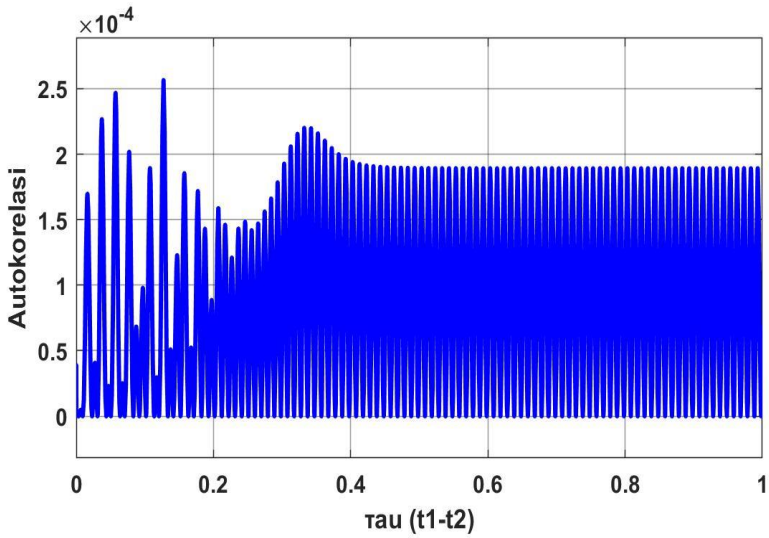
Perbandingan antara arus maupun fluks antara *plant* dengan keluaran estimator AEKF ditunjukkan oleh nilai RMSE (*Root*

Mean Square Error) yang ditampilkan pada Tabel 4.2. Dari tabel tersebut dapat dilihat nilai RMSE baik untuk arus maupun fluks dengan variasi tegangan masukan 378 V, 296 V, 263 V, dan 226 V sangatlah kecil. Sehingga performansi dari estimator AEKF sangat baik.

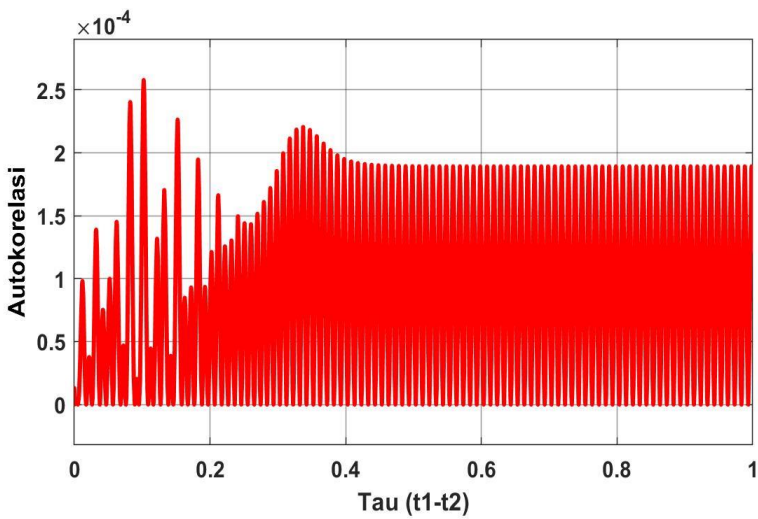
Tabel 4.2 Nilai RMSE Antara Arus dan Fluks *Plant* dengan AEKF

Keterangan	Tegangan (Volt)	RMSE
Arus Alfa <i>Plant</i> dan <i>Estimator</i>	378	0,0094
	296	0,0072
	263	0,0063
	226	0,0052
Arus Beta <i>Plant</i> dan <i>Estimator</i>	378	0,0093
	296	0,0071
	263	0,0062
	226	0,0052
Fluks Alfa <i>Plant</i> dan <i>Estimator</i>	378	0,0011
	296	0,0009
	263	0,0009
	226	0,0008
Fluks Beta <i>Plant</i> dan <i>Estimator</i>	378	0,0008
	296	0,0008
	263	0,0008
	226	0,0007

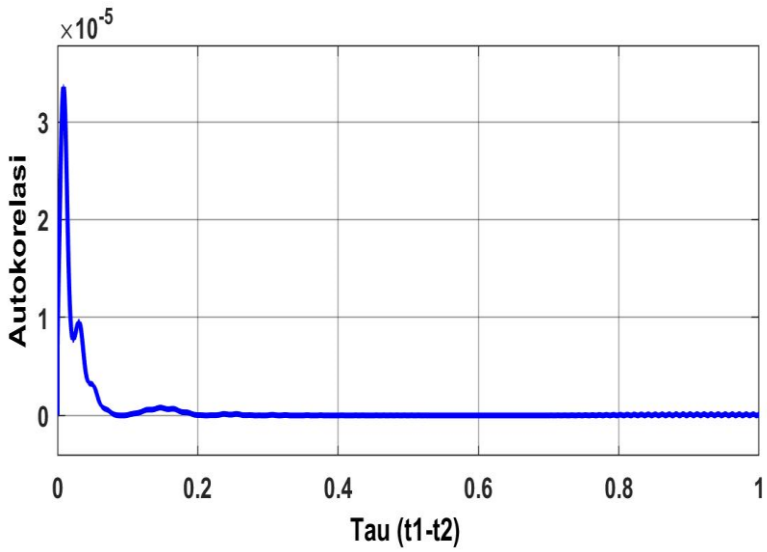
Parameter performansi yang dapat digunakan untuk mengetahui kinerja estimator dengan membandingkan hasil antara estimator dan *plant*, selain RMSE salah satunya adalah autokorelasi. Grafik autokorelasi dari error arus dan error fluks ditunjukkan oleh Gambar 4.6-Gambar 4.9 berikut.



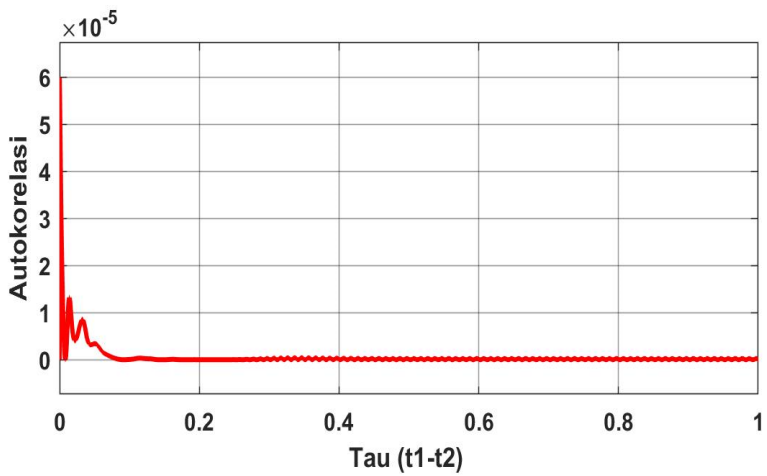
Gambar 4.6 Autokorelasi Error Arus Alfa



Gambar 4.7 Autokorelasi Error Arus Beta



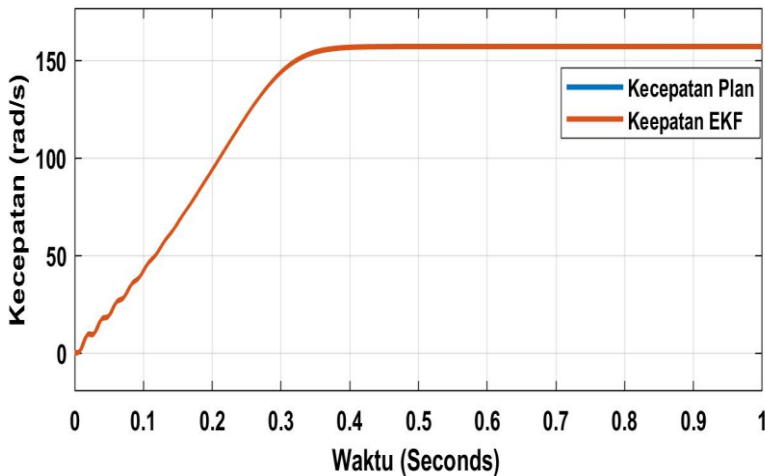
Gambar 4.8 Autokorelasi Error Fluks Alfa



Gambar 4.9 Autokorelasi Error Fluks Beta

Berdasarkan Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 terlihat bahwa autokorelasi error arus semakin bertambah saat awal perubahan waktu $\tau(t_1-t_2)$, dan bernilai tetap hingga akhir, sehingga nilai arus sekarang bergantung pada nilai arus sebelumnya. Begitu pula untuk fluks, pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 ditunjukkan bahwa autokorelasi error fluks memiliki tren kenaikan yang sama dengan plot grafik autokorelasi arus, sehingga dapat dikatakan bahwa nilai fluks saat ini bergantung pada nilai fluks sebelumnya.

Gambar 4.11 menunjukkan respon antara kecepatan *Plant* dan kecepatan estimasi. Dimana garis kuning menunjukkan respon kecepatan *Plant* sedangkan garis merah menunjukkan respon kecepatan estimasi. Respon keduanya saling berhimpitan membuktikan bahwa hasil kecepatan estimasi mendekati nilai kecepatan *Plant*. Kecepatan *Plant* steady pada nilai 157.0796275 rad/s pada 0.4 detik sedangkan kecepatan estimasi *steady* pada 157,0796250 rad/s pada 0,4 detik. Sehingga error antara kecepatan *Plant* dan estimasi sebesar 0.0000016% atau sangat kecil.

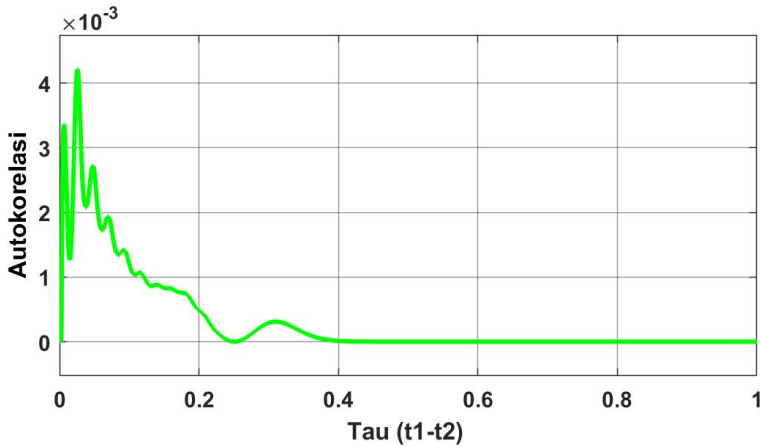


Gambar 4.10 Kecepatan *Plant* dan Kecepatan Estimator AEKF

Gambar 4.10 menampilkan bahwa kecepatan hasil estimasi AEKF sangatlah berhimpit dengan hasil kecepatan pemodelan *Plant* yang dirancang. Sedangkan Tabel 4.3 menampilkan perbandingan kecepatan hasil estimasi AEKF dengan kecepatan simulasi *plant* motor induksi, dimana untuk variasi tegangan 378V, 296 V, 263 V, dan 226 V menghasilkan error rata-rata sebesar $5,8 \times 10^{-5}\%$ atau sangatlah kecil sehingga dapat diabaikan. Selain itu ditampilkan pula parameter performansi lain dari estimasi berupa nilai RMSE pada Tabel 4.3 dimana nilai rata-rata RMSE sebesar 0,0331 dan grafik autokorelasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Berdasarkan tabel dapat dilihat bahwa nilai RMSE antara kecepatan *plant* motor induksi dengan kecepatan estimator AEKF memiliki nilai yang kecil baik untuk semua variasi tegangan sumber yang ditampilkan. Selain itu pada Tabel 4.4 ditunjukkan pula perbandingan nilai kecepatan hasil estimasi AEKF dengan hasil pengukuran motor induksi di lapangan. Dari tabel tersebut dapat dilihat error rata-rata sebesar 0,1325% dengan masing-masing variasi tegangan masukan tidak ada error yang melebihi batas 0,5%. Sehingga dapat dikatakan AEKF telah bekerja sebagai estimator kecepatan dengan baik atau sesuai.

Tabel 4.3 Perbandingan Kecepatan Hasil Estimasi AEKF dengan Hasil Simulasi Plant Motor Induksi

Tegangan (Volt)	Kecepatan <i>Plant</i> Motor Induksi (rad/s)	Kecepatan Estimasi AEKF (rad/s)	Error (%)	RMSE
378	157,0796275	157,0796250	$1,6 \times 10^{-6}$	0,0180
296	157,0790483	157,0790540	$3,6 \times 10^{-6}$	0,0289
263	157,0380256	157,0383676	$2,2 \times 10^{-4}$	0,0364
226	157,0013025	157,0012905	$7,6 \times 10^{-6}$	0,0492
Rata-rata			$5,8 \times 10^{-5}$	0,0331



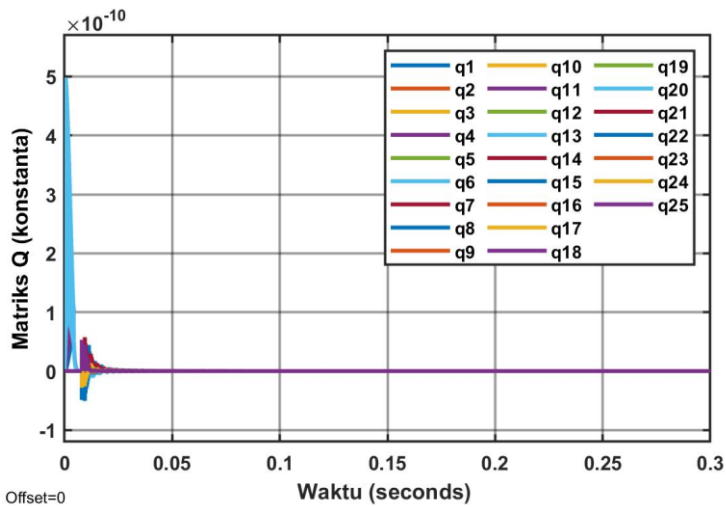
Gambar 4.11 Autokorelasi Error Kecepatan

Berdasarkan Gambar 4.11 dapat diketahui bahwa nilai estimasi kecepatan tidak bergantung pada perubahan waktu, dikarenakan grafik autokorelasi error kecepatan sangat tinggi disaat $\tau(t_1-t_2)$ awal.

Tabel 4.4 Perbandingan Kecepatan Hasil Estimasi AEKF dengan Hasil Pengukuran Motor Induksi

Tegangan (Volt)	Kecepatan Motor Induksi Tachometer (Rad/s)	Kecepatan Estimasi AEKF (Rad/s)	Error (%)
378	157,314	157,0796250	0,149
296	157	157,0790540	0,050
263	156,8953333	157,0383676	0,091
226	156,7906667	157,0012905	0,134
Rata-rata			0,1325

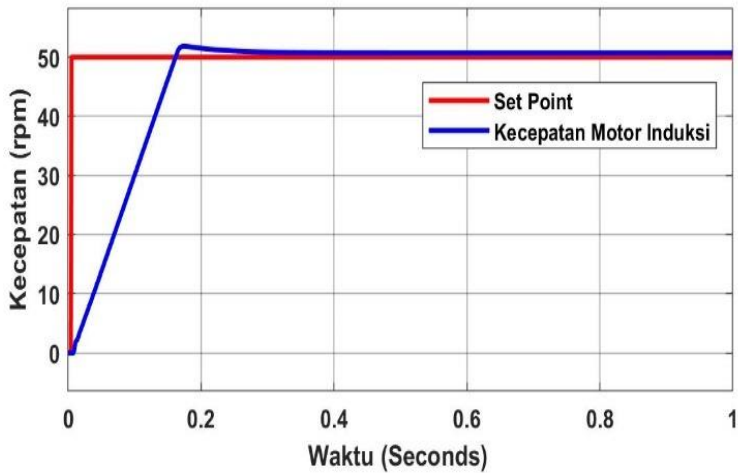
Untuk membuktikan bahwa matriks Q bekerja secara *adaptive* atau *ter-update* secara *on-line* disertakan pula grafik perubahan matriks kovarian Q yang ditampilkan pada Gambar 4.7. terlihat bahwa matriks kovarian Q yang berukuran 5x5 memiliki perubahan yang semakin kecil dan bahkan mendekati nilai nol setelah detik ke-0,025.



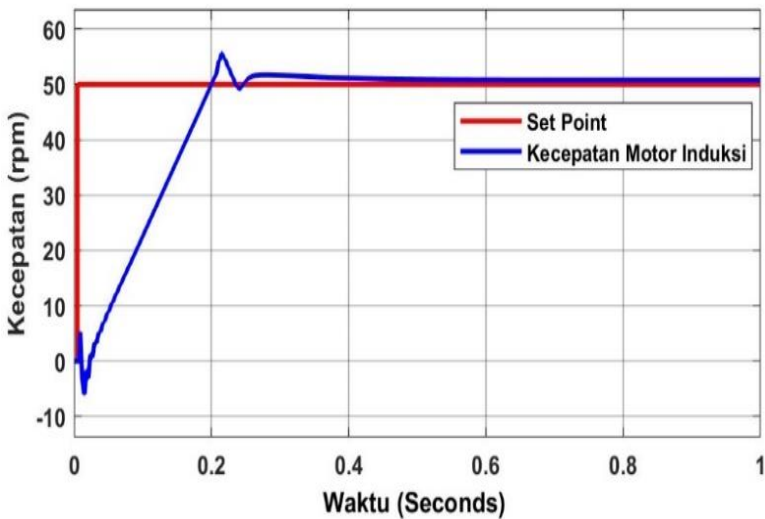
Gambar 4.12 Perubahan Matriks Kovarian Q

4.3 Pengujian *Speed Sensorless Control*

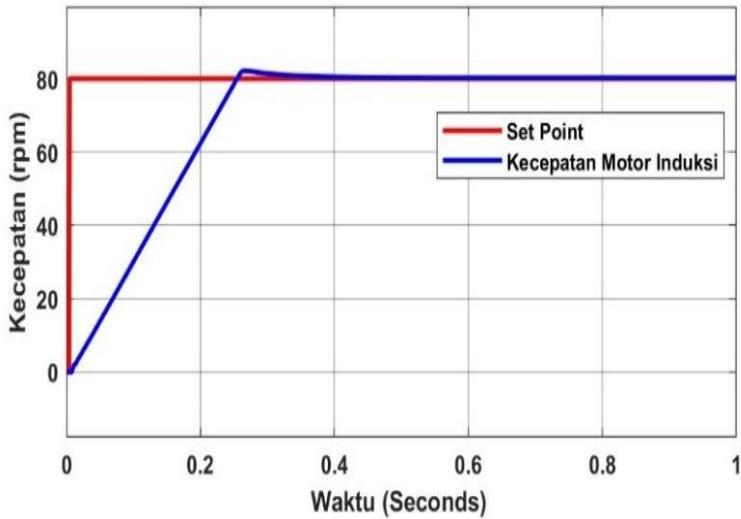
Pengujian sistem kontrol dilakukan dengan menggunakan variasi nilai *set point* dalam rentang kecepatan 50 rpm – 650 rpm. Dalam hal ini digunakan fungsi step sebagai *set point* sistem pengendalian, dengan nilai akhir 50 rpm, 80 rpm, 100 rpm, 350 rpm, 500 rpm, 650 rpm. Hasil respon sistem pengendalian yang telah dirancang ini ditunjukkan pada Gambar 4.13-4.24.



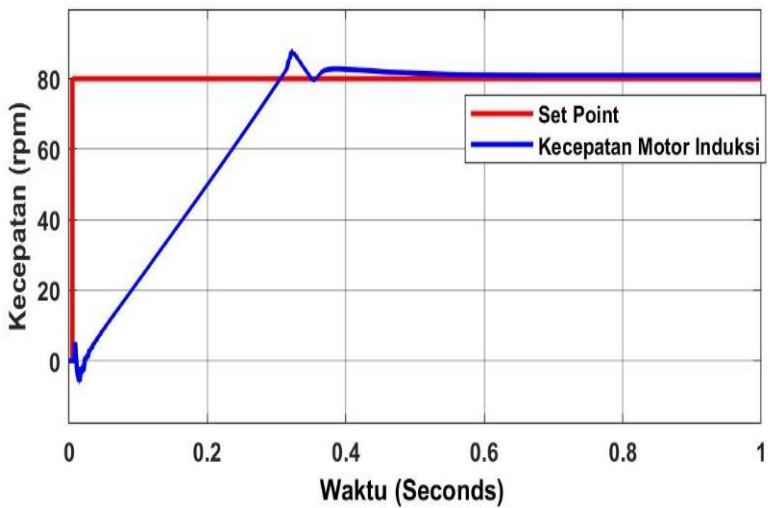
Gambar 4.13 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 50 rpm Tanpa AEKF



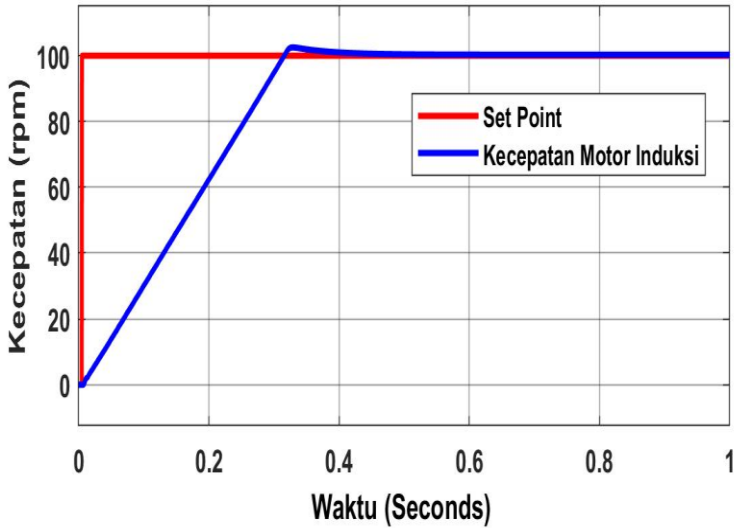
Gambar 4.14 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 50 rpm dengan AEKF



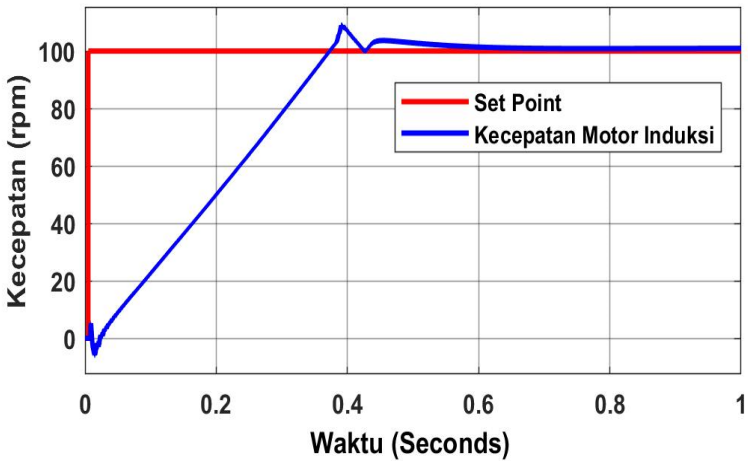
Gambar 4.15 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 80 rpm Tanpa AEKF



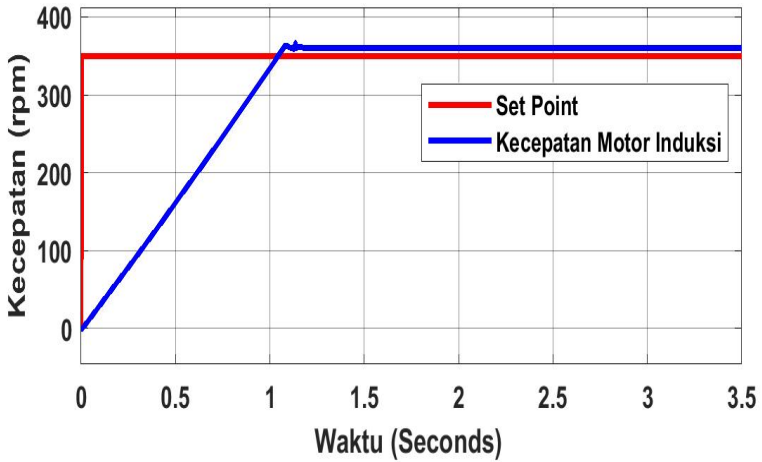
Gambar 4.16 Respon Closed Loop Set Point 80 rpm dengan AEKF



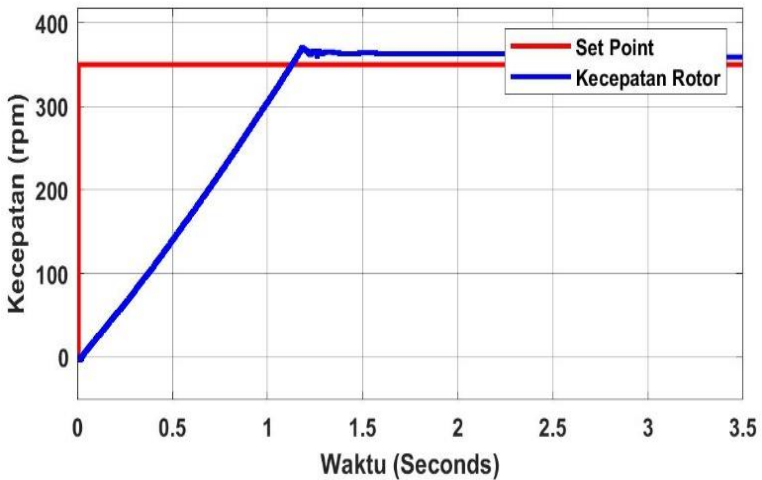
Gambar 4.17 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 100 rpm Tanpa AEKF



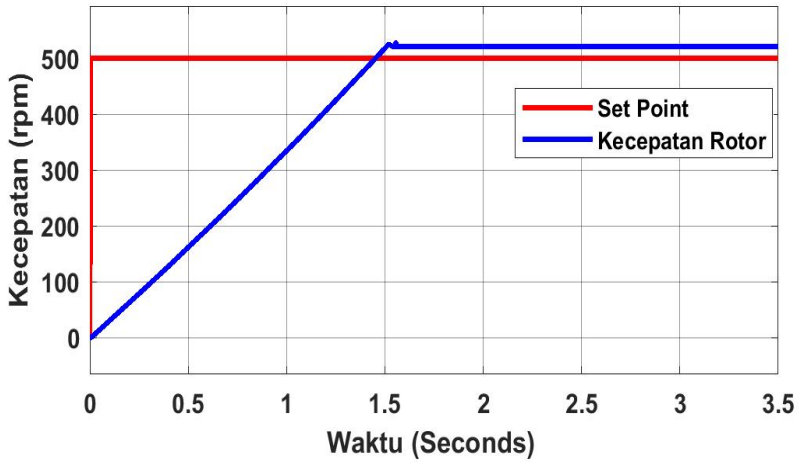
Gambar 4.18 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 100 rpm dengan AEKF



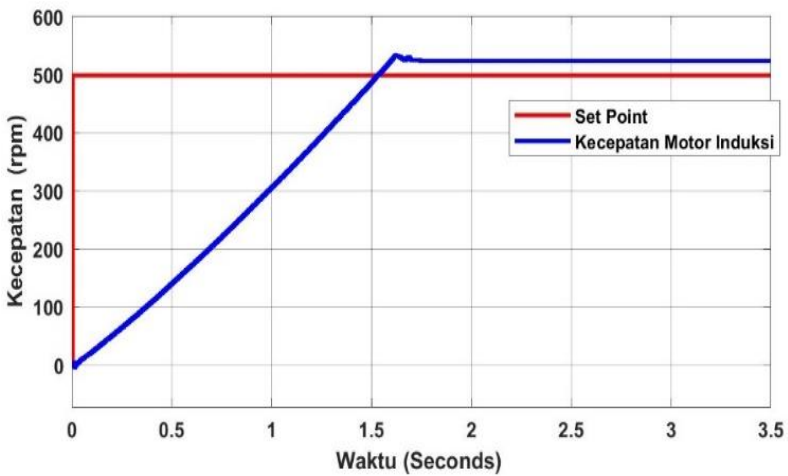
Gambar 4.19 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 350 rpm Tanpa AEKF



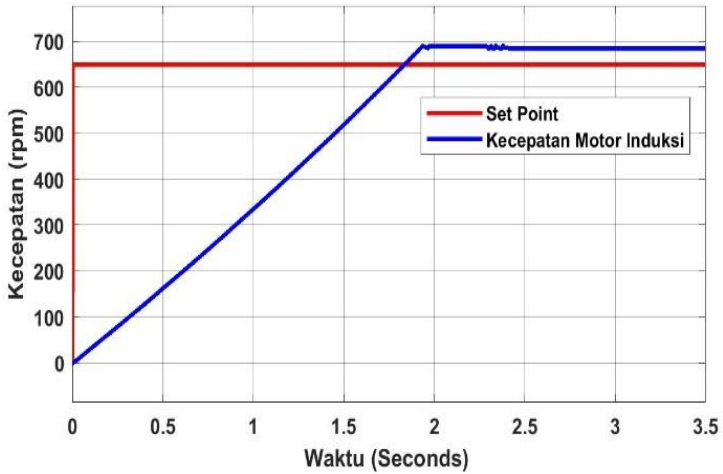
Gambar 4.20 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 350 rpm dengan AEKF



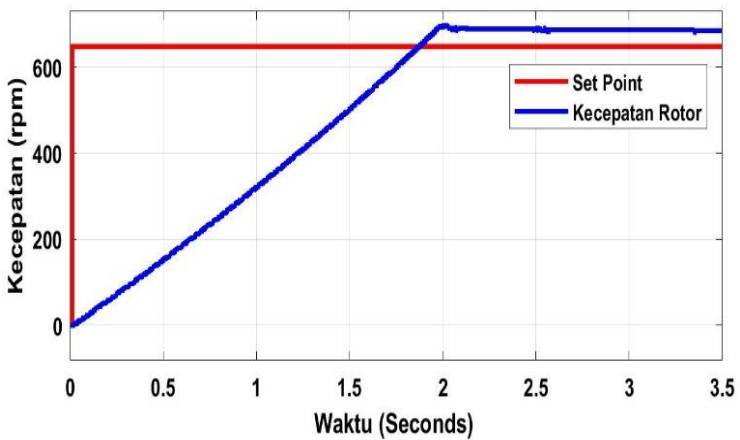
Gambar 4.21 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 500 rpm Tanpa AEKF



Gambar 4.22 Respon Sistem Kontrol Closed Loop Set Point 500 rpm dengan AEKF



Gambar 4.23 Respon Sistem Kontrol Close Loop Set Point 650 rpm Tanpa AEKF



Gambar 4.24 Respon Sistem Kontrol Close Loop Set Point 650 rpm dengan AEKF

Dari grafik-grafik tersebut, dapat diketahui parameter performansi seperti yang tertulis pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3. Berdasarkan tabel-tabel tersebut ditunjukkan bahwa error steady state respon dari semua set point yang diberikan tidak ada yang melebihi ambang batas maksimum yaitu 5% sehingga dapat dikatakan rancangan *speed sensorless control* yang dibuat telah sesuai.

Tabel 4. 4 Parameter Performansi Uji Sistem Kontrol Closed Loop Tanpa AEKF

Set Point	Error Steady State	Maximum Overshoot	Settling Time (s)	Rise Time (s)
50	1,36%	3,70%	0,250	0,162
80	0,35%	2,75%	0,265	0,250
100	0,29%	2,60%	0,340	0,320
350	2,87%	4,71%	1,150	1,045
500	3,44%	5,16%	1,615	1,452
650	4,35%	6,15%	1,150	1,045

Tabel 4. 5 Parameter Performansi Uji Sistem Kontrol Closed Loop Dengan AEKF

Set Point	Error Steady State	Maximum Overshoot	Settling Time (s)	Rise Time (s)
50	2,68%	9,50%	0,260	0,197
80	1,499%	7,875%	0,375	0,300
100	1,300%	6,50%	0,530	0,335
350	2,61%	6,00%	1,318	1,126
500	3,94%	6,72%	2,580	2,000
650	4,97%	7,54%	2,200	1,916

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Pada pemodelan motor induksi yang telah dirancang didapatkan nilai arus rms sebesar 3,1 ampere, nilai fluks rms 0,8 Wb.
- b. Kemudian hasil pengujian observer untuk tegangan masukan 378 V didapatkan nilai kecepatan *Plantt* sebesar 157,0796275 rad/s dan nilai kecepatan estimator AEKF sebesar 157,0796250 rad/s. Sedangkan pada pengukuran tachometer didapatkan nilai kecepatan sebesar 157,314 rad/s.
- c. Error steady state antara kecepatan *Plantt* dengan kecepatan estimator AEKF sangatlah kecil yaitu sebesar 0,0000016%. Sedangkan error steady state antara kecepatan motor induksi hasil pengukuran tachometer sebesar 0,149%.
- d. Nilai rata-rata error estimasi sebesar 0,000058% dan nilai rata-rata RMSE sebesar 0,0331. Karena error baik pada estimasi, pemodelan maupun pengukuran langsung tidak ada yang melebihi 0,5% sehingga dapat dikatakan *adaptive extended kalman filter* bekerja dengan baik.
- e. Perancangan *speed sensorless control* menggunakan metode pengendalian *Direct Torque Control* dengan pengujian pada rentang kecepatan 50 rpm – 650 rpm memperoleh hasil error steady state untuk semua variasi set point pada rentang kecepatan tersebut tidak ada yang diatas 5%. Sehingga dapat dikatakan bahwa sistem pengendalian *speed sensorless control* yang dirancang layak untuk rentang kecepatan tersebut

5.2 Saran

Berdasarkan tugas akhir yang telah dilakukan, terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut :

- a. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan perancangan hardware speed sensorless control motor induksi menggunakan adaptive extended Kalman filter
- b. Dapat dilakukan perbandingan variasi nilai gain proposional dan gain integral untuk penelitian selanjutnya.

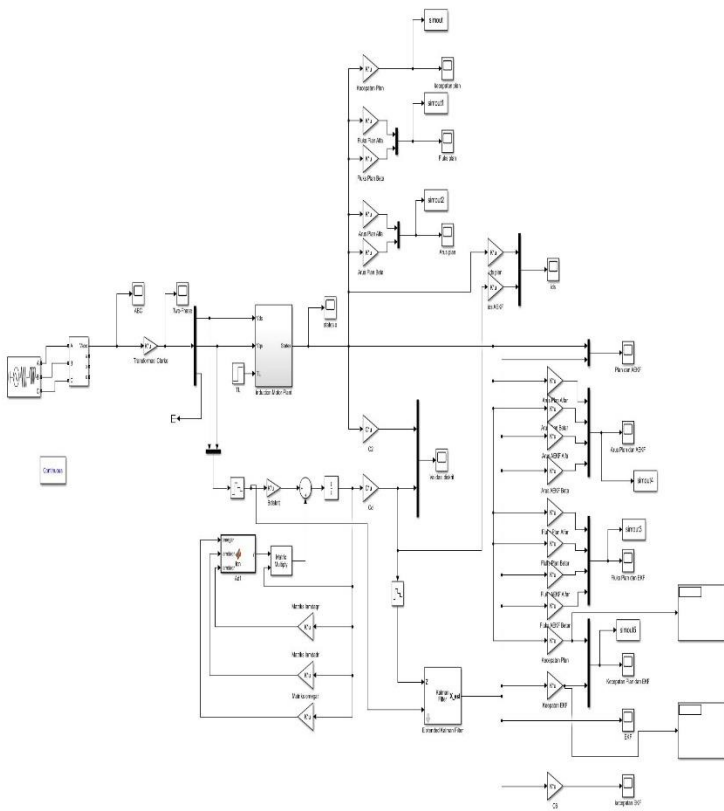
DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Tiwari, S. Das dan A. Pal, "Sensorless Speed Control of Induction Motor Drive Using Extended Kalman Filter Observer," 22 May 2017.
- [2] S. Allaoui dan K. Chafaa, "Induction Motor State Estimation using Tuned Extended Kalman Filter," *IEEE 978-1-4673-6673-1*, 2015.
- [3] T. Orłowska-Kowalska, P. Wojsznis dan C. Kowalski, "Comparative study of different flux estimators for sensorless induction motor drive," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 49, no. 1, pp. 49-63, 2000.
- [4] M. B. Payan, J. M. R. Fernandez, J. M. M. Ortega dan J. M. R. Santos, "Techno-economic Optimal Power Rating of Induction Motors," *Applied Energy*, vol. 240, pp. 1031-1048, 2019.
- [5] Q. Han, Z. Ding, X. Xu, T. Wang dan F. Chu, "Stator current model for detecting rolling bearing faults in induction motors using magnetic equivalent circuits," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 131, pp. 554-575, 2019.
- [6] M. A. Therib, "Three Phase Induction Motors," *ResearchGate*, 2017.
- [7] M. N. Qomarudin, "Memahami Transformasi Koordinat DQ Pada Motor Induksi 3 Fasa," *ResearchGate*, 2017.
- [8] Anonim, *Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation User Guide*, Microsemi.

- [9] T. F. Chan dan K. Shi, *Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives*, John Wiley & Sons, 2011.
- [10] S. Meziane, R. Toufouti dan H. Benalla, “Nonlinear Control of Induction Machines Using an Extended Kalman Filter,” vol. 5, 2008.
- [11] E. Zerdali, “Adaptive Extended Kalman Filter for Speed-Sensorless Control of Induction Motors.,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018.
- [12] M. M. B. P. Mascarenhas, *Speed Control of Induction Machine Based on Direct Torque Control Method*, Faculdade de Ciencias e Tecnologia, 2013.
- [13] Y. Kumsuwan, S. Premrudeepreechacharn dan H. A. Toliyat, “Modified direct torque control method for induction motor drives based on amplitude and angle control of stator flux,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 10, pp. 1712-1718, 2008.

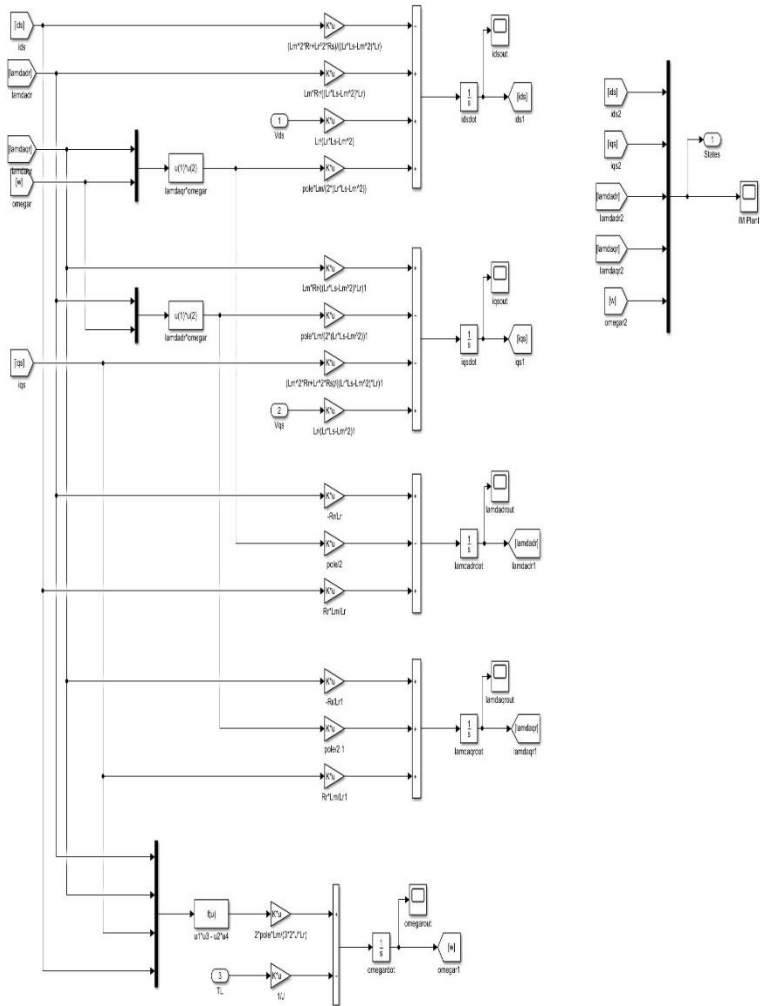
LAMPIRAN

Berikut adalah simulasi uji open loop *speed sensorless* menggunakan *adaptive extended Kalman filter* dengan software matlab



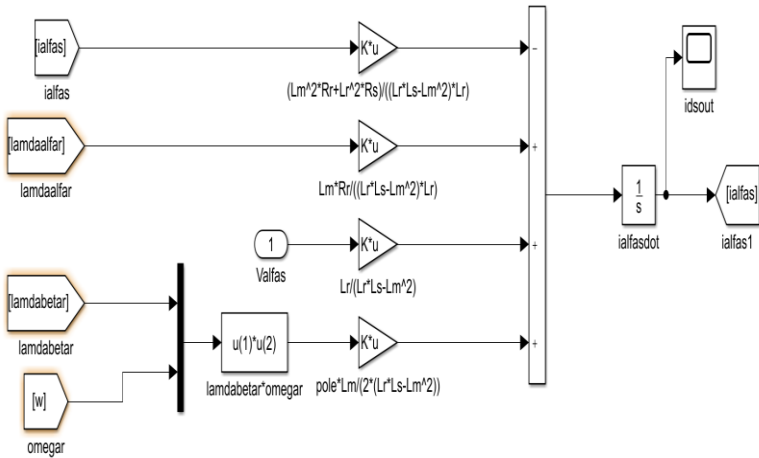
Gambar 1 Simulasi Uji Open Loop Speed Sensorless dengan AEKF

Kemudian dibawah ini adalah hasil rancangan simulasi pemodelan *Plant* motor induksi

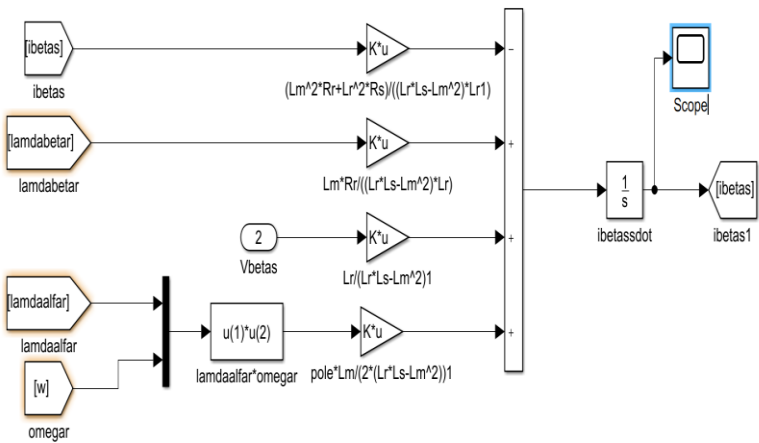


Gambar 2 Simulasi Pemodelan *Plant* Motor Induksi

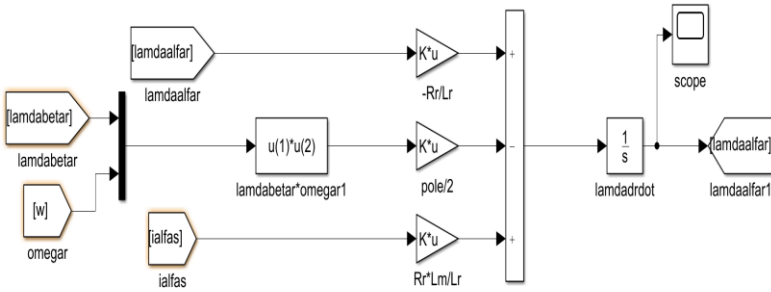
Secara detail pemodelan *Plant* motor induksi dapat diuraikan menjadi seperti berikut.



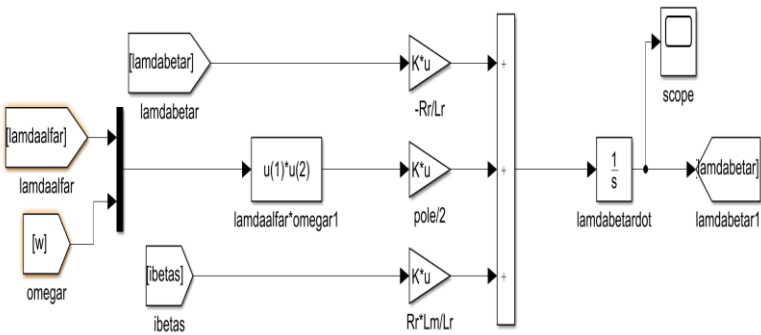
Gambar 3 Arus Alfa Motor Induksi



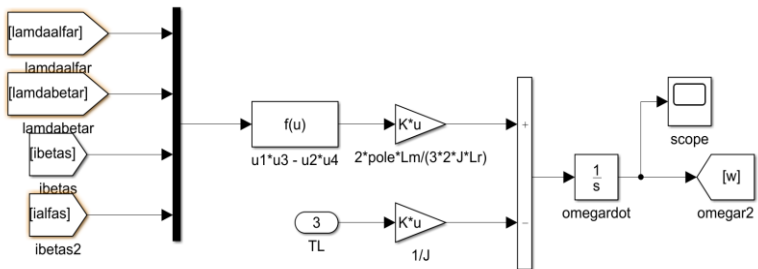
Gambar 4 Arus Beta Motor Induksi



Gambar 5 Fluks Alfa Motor Induksi



Gambar 6 Fluks Beta Motor Induksi



Gambar 7 Kecepatan Motor Induksi

Script program matlab yang digunakan :

A. Parameter Motor Induksi

```

Lm = 0.258;
Ls = 0.274;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805;
Rs = 4.85;
pole = 4;
J = 0.031;
Ts = 0.000001;
Tr = Lr/Rr;
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
P = [ 1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 1 0 0;
0 0 0 1 0; 0 0 0 0 1];
H=[ 1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0];
R = [2*10e-4 0; 0 2*10e-4];

%% BENTUK FUNCTION Yang di asumsikan
terdapat nilai
ids=0;
iqs=0;
lamdadr=0;
lamdaqr=0;
omegar=0;

a1 = (Lm^2*Rr+Lr^2*Rs)/(tho*Ls*Lr^2);
a2 = Lm*Rr/(tho*Ls*Lr^2);
a3 = pole*Lm/(tho*Ls*Lr);
a4 = Lm*Rr/Lr ;
a5 = Rr/Lr;
a6 = 2*pole*Lm/(3*J*Lr);

A = [-a1          0          a2
a3*omegar      0;          0

```

```

-a1          -a3*omegar  a2
0;

                                a4          0
-a5          -pole*omegar 0;
                                0          a4
pole*omegar -a5          0;
                                -a6*lamdaqr
a6*lamdadr 0          0
0];

n= length(A);

B = [ 1/(tho*Ls) 0; 0 1/(tho*Ls); 0 0;
      0 0; 0 0];
C = [1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0];

```

B. Function Matlab Adiskrit

```

function y =
fcn(omegar, lamdadr, lamdaqr)
%#codegen

Lm = 0.258;
Ls = 0.274;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805;
Rs = 4.85; Tr = Lr/Rr;
J = 0.031;
tho = 1-(Lm^2/(Lr*Ls));
Ts = 0.000001;
Ki= tho*Ls;
Kr= (Rs*Lr^2 + Lm^2*Rr)/(Lr^2);
pole = 4;

a1 = (Lm^2*Rr+Lr^2*Rs)/(tho*Ls*Lr^2);
a2 = Lm*Rr/(tho*Ls*Lr^2);

```

```

a3 = pole*Lm/(2*tho*Ls*Lr);
a4 = Lm*Rr/Lr ;
a5 = Rr/Lr;
a6 = 2*pole*Lm/(3*2*J*Lr);

y = eye(5) + Ts*[-a1          0
a2          a3*omegar      0;
0          -a1          -a3*omegar  a2
0;
a4          0          -a5
-pole*omegar/2 0; 0          a4
pole*omegar/2 -a5          0;
-a6*lamdaqr a6*lamdadr 0
0          0];

```

C. Script Matlab untuk mencari nilai RMSE

```

%arus alfa
data1=simout4.signals.values(:,1);
data2=simout4.signals.values(:,3);
n1=size(data1,1);
e1=data1-data2;
rmse1=sqrt(mean(e1.^2));

%arus beta
data3=simout4.signals.values(:,2);
data4=simout4.signals.values(:,4);
n2=size(data3,1);
e2=data3-data4;
rmse2=sqrt(mean(e2.^2));

%fluks alfa
data5=simout3.signals.values(:,1);
data6=simout3.signals.values(:,3);
n3=size(data5,1);
e3=data5-data6;

```

```
rmse3=sqrt(mean(e3.^2));

%fluks beta
data7=simout3.signals.values(:,2);
data8=simout3.signals.values(:,4);
n4=size(data7,1);
e4=data7-data8;
rmse4=sqrt(mean(e4.^2));

%kecepatan
data9=simout5.signals.values(:,1);
data10=simout5.signals.values(:,2);
n5=size(data9,1);
e5=data9-data10;
rmse5=sqrt(mean(e5.^2));
```

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama penulis Fadila Anisa. Penulis dilahirkan di Manado, pada tanggal 19 Maret 1998 sebagai anak bungsu dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Sidoarjo, Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Wage 02 hingga tahun 2010, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Sidoarjo hingga tahun 2013, pendidikan menengah atas di SMAN 1 Sidoarjo hingga tahun 2016, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini.

Pada bulan Juni 2019, penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan Adaptive Extended Kalman Filter Untuk Speed Sensorless Control Motor Induksi Di Unit Penggerak Kereta Api PT. INKA**. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui *email: fadilaanisa3010@gmail.com*