



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN ESTIMATOR KECEPATAN
BERBASIS *DISTURBANCE OBSERVER* UNTUK
SPEED SENSORLESS MOTOR INDUKSI DI
PT.INKA**

ANINDYA AYU PANGESTI
NRP. 023116 4000 028

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 memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 181801

***SPEED ESTIMATOR DESIGN BASED ON
DISTURBANCE OBSERVER FOR SPEED
SENSORLESS INDUCTION MOTORS IN PT.INKA***

ANINDYA AYU PANGESTI
NRP. 023116 40000 028

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 memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Anindya Ayu Pangesti
NRP : 023116 40000 028
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan
Rekayasa Sistem
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Perancangan Estimator Kecepatan Berbasis *Disturbance Observer* Untuk *Speed Sensorless* Motor Induksi di 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
nyataan,



Anindya Ayu Pangesti
NRP. 02311640000028

“Halaman ini memang dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN ESTIMATOR KECEPATAN BERBASIS
DISTURBANCE OBSERVER UNTUK SPEED SENSORLESS
MOTOR INDUKSI DI PT.INKA**

Oleh:

Anindya Ayu Pangesti
NRP. 023116 40000 028

Surabaya, 22 Januari 2019
Mengetahui/Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN. 19760523 200012 2 001

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



“Halaman ini memang dikosongkan”

**PERANCANGAN ESTIMATOR KECEPATAN
BERBASIS *DISTURBANCE OBSERVER* UNTUK *SPEED*
SENSORLESS MOTOR INDUKSI DI 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 :

Anindya Ayu Pangesti

NRP. 023116 40000 028

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 Lelono Widjiantoro ST.,MT..........(Ketua Penguji)
4. Dr.Dhany Arifianto ST.,M.Eng..........(Penguji I)
5. Dr.Ir.Ali Musyafa M.Sc..........(Penguji II)
6. Moch.Kamalul Wafi, S.T, MSc.DIC..........(Penguji III)

**SURABAYA
JANUARI 2020**

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERANCANGAN ESTIMATOR KECEPATAN BERBASIS
DISTURBANCE OBSERVER UNTUK SPEED SENSORLESS
MOTOR INDUKSI DI PT.INKA

Nama : Anindya Ayu Pangesti
NRP : 0231164000028
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D

Abstrak

Penggunaan motor induksi di industri pada bidang transportasi berbasis listrik telah banyak digunakan contohnya sebagai penggerak utama pada kereta listrik. Informasi kecepatan diperlukan untuk pengendalian kecepatan motor pada umumnya diukur menggunakan sensor. Untuk menggantikan peran sensor digunakan metode *speed sensorless* dengan berbasis observer. Pada tugas akhir ini *Disturbance Observer* digunakan untuk mengestimasi kecepatan motor induksi dengan parameter yang mengacu pada motor induksi di PT.INKA. *Disturbance Observer* dirancang dari *Luenberger Observer* dengan penambahan state baru d atau disebut sebagai *disturbance*. *Disturbance* didefinisikan sebagai pembuat nonlinier dari motor induksi yang secara matematis sebagai perkalian antara kecepatan ω_r dengan fluks λ . Pada *Disturbance Observer*, kecepatan estimasi ω_r dipengaruhi oleh nilai estimasi *disturbance* serta estimasi fluks (λ). Adapun perkalian gain dengan error arus serta error *disturbance* digunakan sebagai sinyal koreksi pada *state observer*. Hasil estimasi kecepatan untuk kondisi nominal diperoleh kecepatan estimasi sebesar 156,80 rad/s dengan error sebesar 0,18%. Hasil pengujian penambahan *torsi load* dan pengujian perubahan tahanan menunjukkan bahwa kecepatan estimasi dari estimator yang dirancang mampu mengikuti perubahan kecepatan *plant*.
Kata Kunci—*Disturbance Observer*, Motor induksi, *Speed Sensorless*.

“Halaman ini memang dikosongkan”

*SPEED ESTIMATOR DESIGN BASED ON DISTURBANCE
OBSERVER FOR SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTORS
IN PT.INKA*

Name : Anindya Ayu Pangesti
NRP : 0231164000028
Department : Teknik Fisika FTI-ITS
Supervisor : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu W., S.T., M.Eng., Ph.D

Abstract

Induction motors in industries, especially electricity-based transportation have been widely used, for example as the main driver of electric trains. Speed information needed to control motor speed is generally measured using sensors. To replace the role of the sensor used, the speed sensorless method based on observer is used. This final project Disturbance Observer is used to estimate the speed of the induction motor with parameters that refer to the induction motor at PT.INKA. Disturbance Observer was designed from Luenberger Observer with the addition of a new state or referred to as disturbance. Disturbance is a nonlinear term of an induction motor which is mathematically as a multiplication of the speed ω_r with flux λ . In the Disturbance Observer, the estimated velocity is influenced by the estimated disturbance value and the estimated flux. The gain multiplication with current error and error disturbance is used as correction signals in the state observer. The speed estimation results for nominal conditions obtained 156.80 rad/s with an error of 0.18%. The results of testing the addition of torque load and testing changes in voltage values indicate that the estimator that is designed can follow changes in plant speed.

Keywords — Disturbance Observer, Induction motor, Speed Sensorless.

“Halaman ini memang dikosongkan”

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 Estimator Kecepatan Berbasis *Disturbance Observer* untuk *Speed Sensorless* Motor Induksi Di 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 yang selalu memberikan bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini dan Bapak Febry Pandu Wijaya, S.T.,M.Eng.,Ph.D. selaku pembimbing kedua.
3. Bapak Ir. Sarwono, MM. 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 Lahuri dan Ibu Sumarsih) dan adik (Abiseka Yuda Iswara) serta segenap keluarga yang telah memberikan kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
6. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang minat Rekayasa Instrumentasi.
7. Kepada Yunita Puspita Rini, Dinda Cahya Firdausi, Barakatul Khairat, Yoanne Ayuningtias Sania, dan Nor Indayu yang selalu memberikan dukungan dan semangat tanpa henti.
8. Teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa dan teman teman asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol.
9. Seluruh teman-teman angkatan 2016 yang turut memberikan dukungannya
10. Semua pihak yang terlibat dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

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

Surabaya, 22 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
COVER	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	2
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Motor Induksi.....	5
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi	8
2.3 Permodelan Motor Induksi	10
2.4 Transformasi Clarke	14
2.5 Speed Sensorless	16

2.5 Observer	17
BAB III METODOLOGI	19
3.1 Permodelan Motor Induksi	20
3.2 Perancangan Disturbance Observer	23
3.3 Perancangan Estimator	27
3.4 Pengujian estimator	27
3.5 Perbandingan estimator Disturbance Observer dengan estimator Extended Kalman Filter	27
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Hasil Uji Validasi Model	29
4.2 Hasil Simulasi Observer Kondisi Nominal	31
4.3 Uji Perubahan Nilai Tegangan	36
4.4 Hasil Uji Torsi Load	38
4.5 Perbandingan Hasil Performansi Estimator Disturbance Observer dengan Estimator EKF	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN A	59
LAMPIRAN B	61
LAMPIRAN C	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Motor Induksi	5
Gambar 2. 2 Bagian - bagian motor induksi	6
Gambar 2. 3 Komponen Stator Motor Induksi	7
Gambar 2. 4 Ilustrasi Rotor Motor Induksi.....	7
Gambar 2. 5 Prinsip Operasi motor induksi tipe <i>squirrel-cage</i> rotor	9
Gambar 2. 6 Arah gaya pemutar F_t yang dtimimbulkan oleh rotating magnetic field pada motor induksi (urutan a-b-c-d) [6]	10
Gambar 2. 8 Transformasi Clarke [11].....	15
Gambar 2. 9 Time respon tegangan ABC ke alfa beta [12]	15
Gambar 2. 10 Ilustrasi Blok Observer [16].....	17
Gambar 2. 11 Ilustrasi Blok <i>Disturbance Observer</i> [17].....	18
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	19
Gambar 3. 2 Blok <i>Disturbance Observer</i>	24
Gambar 4. 1 Respon arus <i>plant</i>	29
Gambar 4. 2 Respon fluks <i>plant</i>	30
Gambar 4. 3 Respon kecepatan <i>plant</i>	30
Gambar 4. 4 Respon arus <i>plant</i> dan estimasi	32
Gambar 4. 5 Respon fluks <i>plant</i> dan estimasi.....	32
Gambar 4. 6 Respon kecepatan <i>plant</i> dan estimasi.....	33
Gambar 4. 7 Plot Autokorelasi Error Kecepatan estimasi terhadap Kecepatan Plant.....	34
Gambar 4. 8 Plot Autokorelasi Error Arus estimasi terhadap Arus Plant	34
Gambar 4. 9 Plot Autokorelasi Error Fluks estimasi terhadap Fluks Plant.....	35
Gambar 4. 10 Perubahan respon arus <i>plant</i> dan estimasi saat perubahan tegangan.....	37
Gambar 4. 11 Perubahan respon fluks <i>plant</i> dan estimasi saat perubahan tegangan.....	37
Gambar 4. 12 Perubahan respon kecepatan plant dan estimasi saat perubahan tegangan.....	38

Gambar 4. 13 Respon arus plant dan estimasi saat penambahan torsi load 10 Nm pada detik 2 sekon	39
Gambar 4. 14 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 10 Nm pada detik 2 sekon	39
Gambar 4. 15 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 10 Nm pada detik 3 sekon	40
Gambar 4. 16 Respon arus plant dan estimasi saat penambahan torsi load 6 Nm pada detik 2 sekon	41
Gambar 4. 17 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 6 Nm pada detik 2 sekon	42
Gambar 4. 18 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 6 Nm pada detik 2 sekon .	42
Gambar 4. 19 Respon arus plant dan estimasi saat penambahan torsi load 3 Nm pada detik 2 sekon	43
Gambar 4. 20 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 3 Nm pada detik 2 sekon	44
Gambar 4. 21 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 3 Nm pada detik 2 sekon .	44
Gambar 4. 22 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 1 Nm pada detik 2 sekon .	45
Gambar 4. 23 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 1 Nm pada detik 3 sekon	46
Gambar 4. 24 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 1 Nm pada detik 3 sekon .	46
Gambar 4. 25 Respon kecepatan plant dan estimasi menggunakan EKF	48
Gambar 4. 26 Respon estimator EKF saat terjadi perubahan tegangan.....	48
Gambar 4. 27 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 10 Nm	49
Gambar 4. 28 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 6 Nm	50
Gambar 4. 29 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 3 Nm	51
Gambar 4. 30 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 1 Nm	51

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Parameter Motor Induksi	22
Tabel 4. 1	Data kecepatan motor <i>plant</i> dan pengukuran.....	31
Tabel 4. 2	Data kecepatan motor estimasi dan pengukuran	30
Tabel 4. 3	Respon perubahan kecepatan setelah penambahan torsi load.....	42
Tabel 4.4	Perbandingan nilai RMSE kecepatan.....	54

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL

ω_r	= Kecepatan motor
ω_e	= Kecepatan sinkron
$\lambda_{\beta r}, \lambda_{\alpha r}$	= Fluks rotor pada sumbu acuan $\alpha\beta$
$i_{\beta s}, i_{\alpha s}$	= Arus stator sumbu acuan $\alpha\beta$
V	= Tegangan
$V_{\beta s}, V_{\alpha s}$	= Tegangan stator pada sumbu acuan $\alpha\beta$
x	= State
P	= Jumlah pole
J	= Inersia rotor
T_e	= Torsi Elektromagnetik
R_s	= Resistansi stator
R_r	= Resistansi rotor
L_s	= Induktansi stator
L_r	= Induktansi rotor
L_m	= Induktansi mutual
i_r	= Arus Rotor
i_s	= Arus Stator
f	= Frekuensi
T_l	= Torsi load
$\xi_{\alpha}, \xi_{\beta}$	= Disturbance
d	= Vektor <i>disturbance</i>
\hat{x}	= State estimasi
$\hat{\omega}_r$	= Kecepatan motor estimasi
$\hat{i}_{\alpha s}, \hat{i}_{\beta s}$	= Arus stator estimasi pada sumbu acuan $\alpha\beta$
$\hat{\lambda}_{\alpha r}, \hat{\lambda}_{\beta r}$	= Fluks rotor estimasi pada sumbu acuan $\alpha\beta$
\hat{d}	= Vektor <i>disturbance</i> estimasi

- $\hat{\xi}_\alpha, \hat{\xi}_\beta$ = *Disturbance* estimasi
- $\hat{\omega}_\lambda$ = Kecepatan angular fluks
- \vec{v} = Vektor Kecepatan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan motor induksi dalam industri pada bidang transportasi berbasis listrik telah banyak digunakan. Motor induksi menjadi bagian dari konversi energi listrik menjadi energi mekanik dalam peradaban industri modern dimana sekitar setengah dari energi listrik yang dihasilkan di negara maju dikonsumsi oleh motor listrik, 90% diantaranya adalah motor induksi [1]. Motor induksi bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator, dimana arus rotor merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Dalam industri, motor induksi dinilai lebih ekonomis dan *reliable* serta memiliki kelebihan diantara lain: tidak memerlukan *brushes*, inersia rotor yang rendah, harga yang murah, ukuran dan berat yang ringan [2].

Pada pengaplikasiannya ketersediaan data informasi mengenai kecepatan motor sangat diperlukan. Data kecepatan tersebut dapat diukur menggunakan sensor kecepatan, namun karena faktor *cost* serta faktor *reliabilty* sensor yang makin berkurang seiring berjalannya waktu maka dikembangkan sebuah metode *speed sensorles* motor induksi. Metode *speed sensorless* bertujuan untuk mengeliminasi sensor kecepatan dan posisi dengan menggunakan algoritma estimasi yang melibatkan parameter tegangan dan arus dari motor induksi [2]. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk estimasi kecepatan dalam hal ini yaitu kecepatan motor induksi yaitu dengan menggunakan *observer*. *Observer* merupakan program atau algoritma yang digunakan untuk mengestimasi variabel state yang tidak terukur.

Pada tugas akhir ini *observer* digunakan untuk estimasi *state* arus dan fluks motor induksi berdasarkan data masukan berupa tegangan. Hasil estimasi arus dan fluks tersebut digunakan dalam perancangan estimator kecepatan rotor motor induksi. Pada penelitian sebelumnya telah dirancang *Luenberger Observer*

untuk estimasi kecepatan motor induksi [3]. Namun pada penelitian tersebut, hasil estimasi kecepatan motor induksi saat pengujian beban menunjukkan respon yang lama untuk mendekati respon kecepatan riil motor induksi. Sehingga pada tugas akhir ini dilakukan perancangan estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* untuk mengestimasi kecepatan motor induksi. *Disturbance* didefinisikan sebagai perkalian antara fluks dan kecepatan rotor pada motor induksi. Error *disturbance* akan berpengaruh pada hasil estimasi kecepatan rotor motor induksi. Adapun hasil estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* yang telah dirancang dibandingkan dengan hasil estimator kecepatan berbasis Extended Kalman Filter yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [4].

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil permasalahan sebagai berikut :

- a. Bagaimana perancangan estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* untuk aplikasi *speed sensorless* motor induksi ?
- b. Bagaimana perbandingan estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* dibandingkan dengan kecepatan berbasis *Extended Kalman Filter* ?

1.3 Tujuan

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini sebagai berikut:

- a. Merancang estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* untuk aplikasi *speed sensorless* motor induksi.
- b. Mengetahui perbandingan estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* dengan estimator kecepatan berbasis *Extended Kalman Filter*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun 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, yaitu motor induksi 3 fasa.
- b. Tipe motor induksi yang digunakan yaitu AEEBKB.
- c. Validasi permodelan dilakukan dengan mengacu pada hasil pengukuran saat motor induksi beroperasi *open loop*.
- d. Pemodelan berdasarkan keadaan motor induksi tanpa beban.

"Halaman ini memang dikosongkan"

BAB II

DASAR TEORI

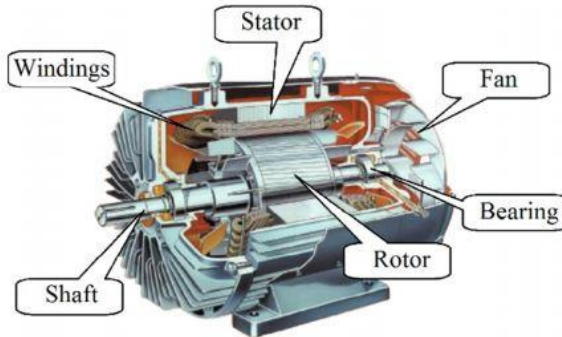
2.1 Motor Induksi

Motor induksi adalah perangkat yang mampu mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan sejak penemuannya pada tahun 1888 [2]. Jika dibandingkan dengan dengan motor DC, motor induksi memiliki beberapa kelebihan diantara lain: faktor harga, perawatan dan proteksi yang sederhana, serta inersia rotor yang lebih rendah. Motor induksi yang umum digunakan yaitu motor induksi 3 fasa dan motor induksi 1 fasa. Penggunaan motor induksi 3 fasa biasanya digunakan di bidang industri dengan kapasitas yang besar sedangkan motor induksi 1 fasa banyak digunakan dalam peralatan rumah tangga seperti kipas angin, mesin cuci dan sebagainya. Keuntungan penting lain yang dimiliki oleh motor induksi tiga fasa antara lain memiliki *self-starting property*, tidak memerlukan *starting device*, *power factor* yang lebih tinggi, dan *speed regulation* yang bagus serta konstruksi yang “*robust*” [5]. Motor induksi bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator, dimana arus rotor merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator.



Gambar 2. 1 Motor Induksi [6]

Adapun komponen motor induksi terbagi menjadi dua, yaitu stator (elemen yang tetap) dan rotor (elemen yang berputar). Gambar 2.2 menjelaskan bagian dan letak stator dan rotor dalam motor induksi



Gambar 2. 2 Bagian - bagian motor induksi [7]

2.1.1 Stator

Stator merupakan komponen pada motor induksi yang terbuat dari piringan pelat baja tipis yang disebut sebagai *laminations* atau laminasi yang disusun rapat dan diberi penyekat satu terhadap lainnya. Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lembaran besi atau pelat baja yang di fabrikasi [8]. Tiap kumparan pada motor induksi tiga fasa tersebar dalam jalur-jalur yang disebut belitan fasa, belitan tersebut terpisah sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapisi dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris. Komponen stator diantaranya: *bearing*, plat penutup, rangka stator, inti stator. Bearing berfungsi sebagai bagian yang memisahkan antara badan stator dan rotor serta tempat peletakan poros atau rotor. Plat penutup terdiri terdiri dari dua bagian yaitu berfungsi sebagai tempat peletakan bearing. Rangka stator merupakan kerangka bagian luar yang dikonstruksikan bersirip untuk memperluas pelepasan panas motor. Inti stator merupakan bagian yang terdiri

dari laminasi yang telah dijelaskan sebelumnya. Fungsi kerja stator yaitu sebagai komponen atau bagian yang diam dari motor induksi dan mempunyai kumparan yang dapat menimbulkan medan elektromagnetik pada kumparan rotornya.



Gambar 2. 3 Komponen Stator Motor Induksi [9]

2.1.2 Rotor

Rotor terdiri dari tumpukan lempengan besi tipis yang dilaminasi dan batang konduktor yang mengitarinya tumpukan besi yang dilaminasi disatukan untuk membentuk inti rotor [8]. Rotor bergerak karena induksi magnet dari kumparan stator. Torsi perputaran rotor ditentukan oleh banyaknya lilitan kawat beserta diameternya. Komponen rotor terdiri dari : Inti besi rotor, kumparan dan poros/ shaft. Inti besi rotor sebagai jalur fluks magnet. Kumparan atau disebut batang penghantar sebagai pembangkit fluks, Sedangkan poros atau shaft sebagai pijakan komponen komponen pada rotor.



Gambar 2. 4 Ilustrasi Rotor Motor Induksi [7]

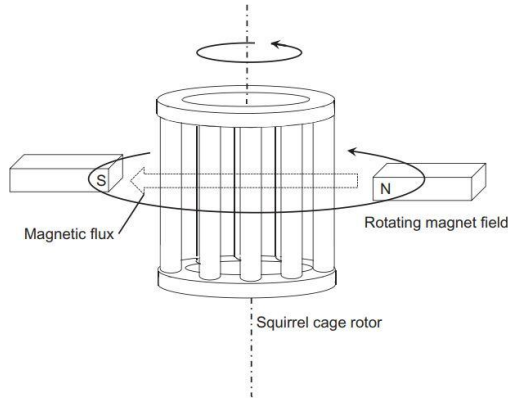
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

Prinsip kerja motor induksi yaitu adanya medan magnet yang berputar dikarenakan sistem tegangan kumparan tiga fasa yang menginduksi rotor sehingga terbentuk torsi elektromagnetik yang menggerakkan rotor [6]. Prinsip kerja motor induksi berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotor. Saat kumparan stator motor induksi 3-fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3-fasa maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar.

Sesuai hukum faraday bahwa apabila terdapat arus yang mengalir pada suatu kabel maka arus itu dapat menghasilkan fluks magnet pada kabel tersebut, dimana arahnya mengikuti kaidah tangan kanan. Setiap fasa dalam kumparan stator akan mengalami hal yang sama karena setiap fasa dialiri arus, namun besarnya fluks yang dihasilkan tidak sama di setiap waktu. Hal ini disebabkan besarnya arus yang berbeda-beda pada tiap fasa di tiap waktunya. Dampak dari peristiwa ini akan mengakibatkan fluks yang dibangkitkan lebih cenderung pada fasa mana yang mengalami kondisi arus paling tinggi. Secara tidak langsung dapat dikatakan bahwa medan magnet yang dibangkitkan juga ikut “berputar” seiring waktu. Kecepatan putaran medan magnet ini disebut kecepatan sinkron.

Ketika ada fluks pada kumparan stator maka arus akan terinduksi pada rotor. Akibat munculnya arus pada rotor dan adanya medan magnet pada stator maka rotor akan berputar mengikuti hukum lorentz. Adapun kecepatan putaran rotor tidak mencapai kecepatan sinkron atau lebih. Karena apabila kecepatan sinkron dan rotor sama, maka tidak ada arus yang terinduksi pada rotor sehingga tidak ada gaya yang terjadi pada rotor sesuai dengan hukum lorentz. Namun saat rotor melambat, kecepatan sinkron dan kecepatan rotor jadi berbeda. Sehingga pada rotor akan terinduksi arus dan menyebabkan rotor mendapatkan gaya berdasarkan hukum lorentz. Dari gaya tersebut motor dapat

menambah kecepatannya kembali. Peristiwa perbedaan kecepatan ini disebut sebagai slip. Gambar 2.5 menjelaskan arah perputaran rotor ketika terhadap pengaruh medan magnet.



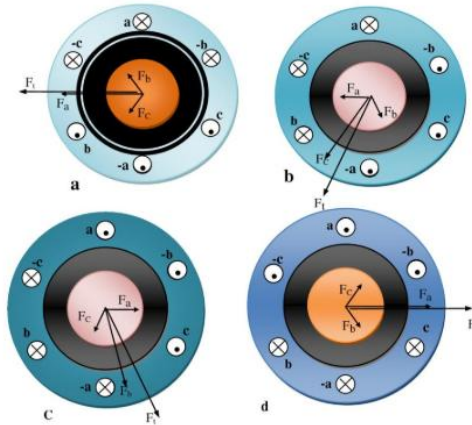
Gambar 2. 5 Prinsip Operasi motor induksi tipe *squirrel-cage* rotor [10]

Seperti yang telah dijelaskan diatas, bahwa dalam motor induksi terdapat *slip* yang timbul dikarenakan adanya perbedaan kecepatan medan putar stator dan rotor. *Slip* akan berubah nilainya dari 0 sampai dengan 1. Pada keadaan start dimana putaran motor induksi masih nol maka slip bernilai 1, sedangkan pada kondisi berbeban slip akan berubah nilainya dari nol persen menuju ke beberapa persen [6]. Pada kondisi beban penuh slip berkisar diantara 1-2,5%, dimana perubahan beban motor akan menghasilkan perubahan slip. Semakin besar beban motor maka slip akan membesar dan kecepatan putar akan menurun. Persamaan slip dinyatakan dalam persamaan (2.1) [6].

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \% \quad (2.1)$$

Gambar 2.6 menjelaskan arah gaya pemutar dalam bentuk vektor gaya medan putar tiga fasa yaitu fasa A,B,C. Pergerakan

gaya medan putar oleh adanya interaksi medan magnet stator dan medan rotor yang ditimbulkan oleh tegangan dan arus induksi [6].



Gambar 2. 6 Arah gaya pemutar F_t yang ditimbulkan oleh rotating magnetic field pada motor induksi (urutan a-b-c-d) [6]

2.3 Pemodelan Motor Induksi

Pemodelan motor induksi dapat ditinjau dari kerangka acuan stator atau kerangka acuan rotor dan parameter yang digunakan dalam pemodelan dapat berupa arus stator atau arus rotor serta fluks stator dan fluks rotor [2]. Tugas akhir ini digunakan pemodelan motor ditinjau dari kerangka acuan stator. Penjabaran persamaan motor induksi dijelaskan pada persamaan (2.2)-(2.37) [2]. Persamaan motor induksi dapat dijelaskan dari persamaan berikut:

$$\vec{V}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s + \frac{P}{2} j \omega_e \vec{\lambda}_s \quad (2.2)$$

$$\vec{V}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + j \frac{P}{2} (\omega_e - \omega_r) \vec{\lambda}_s \quad (2.3)$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_r + L_m \vec{i}_r \quad (2.4)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s \quad (2.5)$$

Dikarenakan kerangka acuan yang digunakan adalah kerangka acuan stator, maka nilai $\omega_e = 0$. Persamaan (2.2) jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\omega_e = 0$), menjadi:

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \dot{\lambda}_{s\alpha} \quad (2.6)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \dot{\lambda}_{s\beta} \quad (2.7)$$

Adapun jenis rotor dari motor induksi ini adalah *squirrel cage* dengan terminal – terminalnya terhubung singkat, maka tegangan rotor V_r adalah nol, sehingga persamaan (2.3) menjadi:

$$0 = i_r R_r + \dot{\lambda}_r + \frac{P}{2} j (\omega_e - \omega_r) \lambda_r \quad (2.8)$$

Saat dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ maka kecepatan sinkron stator bernilai nol ($\omega_e = 0$) maka persamaan (2.8) menjadi :

$$\dot{\lambda}_{r\alpha} = -R_r i_{r\alpha} - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.9)$$

$$\dot{\lambda}_{r\beta} = -R_r i_{r\beta} - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.10)$$

Persamaan (2.5) jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$, maka persamaannya akan menjadi :

$$\lambda_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \quad (2.11)$$

$$\lambda_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \quad (2.12)$$

Dari persamaan (2.6) dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$, maka persamaan akan berubah menjadi :

$$\lambda_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \quad (2.13)$$

$$i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) \quad (2.14)$$

$$\lambda_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \quad (2.15)$$

$$i_{r\beta} = \frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) \quad (2.16)$$

Dari persamaan (2.14) disubstitusikan ke persamaan (2.9) dan persamaan (2.16) disubstitusikan ke persamaan (2.10) maka akan didapatkan bersamaan seperti dibawah ini :

$$\dot{\lambda}_{r\alpha} = -Rr\left(\frac{1}{L_r}(\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) - \frac{P}{2}\omega_r \lambda_{r\alpha}\right) \quad (2.17)$$

$$\dot{\lambda}_{r\beta} = -Rr\left(\frac{1}{L_r}(\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) - \frac{P}{2}\omega_r \lambda_{r\beta}\right) \quad (2.18)$$

Untuk mendapatkan persamaan arus stator pada sumbu alfa, maka ubtitusikan persamaan (2.11) ke persamaan (2.6) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + \frac{d}{dt}(L_S i_{S\alpha} + L_m i_{r\alpha}) \quad (2.19)$$

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + L_S \dot{i}_{S\alpha} + L_m \dot{i}_{r\alpha} \quad (2.20)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.14) ke persamaan (2.20) maka akan menjadi persamaan seperti berikut :

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + L_S \dot{i}_{S\alpha} + \frac{L_m}{L_r} \dot{\lambda}_{r\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{s\alpha} \quad (2.21)$$

Lalu substitusikan persamaan (2.17) pada persamaan (2.21), maka akan di dapatkan persamaan:

$$V_{S\alpha} = R_S i_{S\alpha} + \sigma L_S \dot{i}_{S\alpha} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\alpha} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.22)$$

Lalu persamaan (2.14) disubstitusikan ke persamaan (2.22) maka akan diperoleh persamaan:

$$\dot{i}_{S\alpha} = \frac{V_{S\alpha}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r}\right) i_{S\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_S} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.23)$$

Dengan melakukan langkah yang sama dengan sumbu alfa , dapat dicari nilai pada sumbu beta sebagai berikut:

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + \frac{d}{dt}(L_S i_{S\beta} + L_m i_{r\beta}) \quad (2.24)$$

Subtitusikan persamaan (2.16) pada persamaan (2.36) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + L_S \dot{i}_{S\beta} + \frac{L_m}{L_r} \dot{\lambda}_{r\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \dot{i}_{s\beta} \quad (2.25)$$

Setelah itu pada persamaan (2.18) disubstitusikan pada persamaan (2.25) sehingga didapatkan persamaan:

$$V_{S\beta} = R_S i_{S\beta} + \sigma L_S \dot{i}_{S\beta} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\beta} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.26)$$

Yang terakhir disubstitusikan persamaan maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$i_{S\beta} \dot{=} \frac{V_{S\beta}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_S T_r} \right) i_{S\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\beta} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\alpha} \quad (2.27)$$

Dimana :

$$\sigma = \frac{L_r L_S - L_m^2}{L_r L_S} \quad (2.28)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2.29)$$

Persamaan torsi elektromagnetik pada motor induksi secara umum dapat di tuliskan sebagai berikut :

$$\dot{\omega}_r = \frac{T_e - T_l}{J} \quad (2.30)$$

$$T_e = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{L_r} \right) (\lambda_{r\beta} i_{S\alpha} - \lambda_{r\alpha} i_{S\beta}) \quad (2.31)$$

Sehingga akan didapat persamaan:

$$\dot{\omega}_r = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{J L_r} \right) (\lambda_{r\beta} i_{S\alpha} - \lambda_{r\alpha} i_{S\beta}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.32)$$

Dari penjabaran di atas akan didapatkan persamaan motor induksi:

$$i_{S\alpha} \dot{=} \frac{V_{S\alpha}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r} \right) i_{S\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\beta} \quad (2.33)$$

$$i_{S\beta} \dot{=} \frac{V_{S\beta}}{\sigma L_S} + \left(-\frac{R_S}{\sigma L_S} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_S T_r} \right) i_{S\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_S T_r} \lambda_{r\beta} - \frac{P}{2} \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_S} \lambda_{r\alpha} \quad (2.34)$$

$$\lambda_{r\alpha} \dot{=} -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{S\alpha}) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \right) \quad (2.35)$$

$$\lambda_{r\beta} \dot{=} -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{S\beta}) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \right) \quad (2.36)$$

$$\dot{\omega}_r = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{J L_r} \right) (\lambda_{r\alpha} i_{\beta s} - \lambda_{r\beta} i_{\alpha s}) - \frac{T_l}{J} \quad (2.37)$$

Persamaan (2.33) s/d (2.37) diubah menjadi bentuk *state space*

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.38)$$

$$y = Cx + Du \quad (2.39)$$

Sehingga diperoleh matriks $A \in R^{5 \times 5}$, $B \in R^{5 \times 2}$ dan $C \in R^{2 \times 5}$ sertas $x \in R^{5 \times 1}$ seperti pada penjabaran berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & 0 & \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & \frac{P L_m}{2(L_r L_s - L_m^2)} \omega_r & 0 \\ 0 & -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & \frac{P L_m}{2(L_r L_s - L_m^2)} \omega_r & \frac{L_m R_r}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} & 0 \\ \frac{R_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{P}{2} \omega_r & 0 \\ 0 & \frac{R_r L_m}{L_r} & \frac{P}{2} \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ -\frac{2}{3} \frac{P L_m}{2 J L_r} & \frac{2}{3} \frac{P L_m}{2 J L_r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$D = [0] \quad (2.43)$$

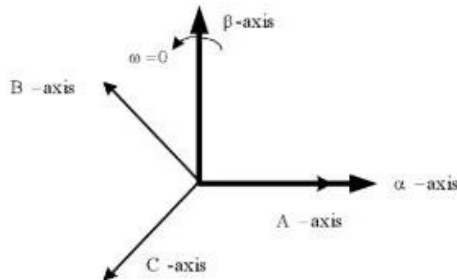
$$x = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

2.4 Transformasi Clarke

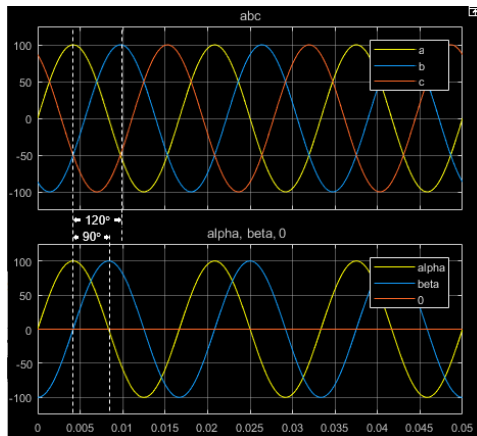
Motor induksi memiliki tiga buah kumparan fasa yang biasa disebut R,S,T atau A,B,C yang disusun sedemikian gelombang tegangan ggl dan atau arus yang dihasilkan setiap kumparan fasanya memiliki perbedaan sudut sebesar 120° . Untuk merepresentasikan tegangan pada motor induksi, dibutuhkan tegangan yang terpisah oleh sudut fasa sebesar 90° atau disebut

dengan tegangan ($\alpha\beta$). Transformasi Clarke merupakan transformasi yang digunakan untuk mengubah analisis fasor dari bentuk 3D menjadi 2D [11]. Fasor tiga fasa (RST) disederhanakan menjadi ($\alpha\beta$). Persamaan Transformasi Clarke ditulis sebagai berikut [11]

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.45)$$



Gambar 2. 7 Transformasi Clarke [11]



Gambar 2. 8 Time respon tegangan ABC ke alfa beta [12]

2.5 Speed Sensorless

Seperti pada penjelasan sebelumnya bahwa prinsip *speed sensorless* yaitu bertujuan untuk mengeliminasi sensor kecepatan dan posisi dengan menggunakan algoritma estimasi kecepatan yang melibatkan parameter tegangan dan arus dari motor induksi [2]. Terdapat banyak metode yang dapat digunakan dalam *speed sensorless*, namun keseluruhan algoritma *speed sensorless* tersebut bergantung pada model matematis dari motor induksi, berikut merupakan klasifikasi dari algoritma estimasi kecepatan [13]:

- a. Open Loop dengan algoritma *slip compensation*
- b. *Slip Frequency Algorithm*
- c. Estimasi kecepatan dengan menggunakan *state equation*.
- d. *Flux estimation and Flux Vector Control Algorithm*
- e. Algoritma Observer
- f. *Model Reference Adaptive Algorithm*
- g. *Extended Kalman Filter (EKF)*
- h. *Neural Network Algorithm*

2.6 Observer

Luenberger adalah orang pertama yang merekomendasikan observer *state* untuk mengestimasi *unknown state* dari sebuah sistem linear deterministik pada tahun 1971 [14]. Observer merupakan sistem yang dapat mengestimasi variabel dari sebuah sistem yang dinyatakan dalam bentuk ruang keadaan. Dengan adanya observer state dari sebuah sistem dapat diketahui berdasarkan input serta pengukuran output. Cara kerja observer dengan meniru sistem yang sebenarnya lalu melakukan estimasi terhadap variabel yang tidak dapat diamati dengan sensor berdasarkan variabel lain yang dapat diamati dengan sensor. Berikut merupakan persamaan umum dari observer [15]

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + K_e \cdot e \quad (2.46)$$

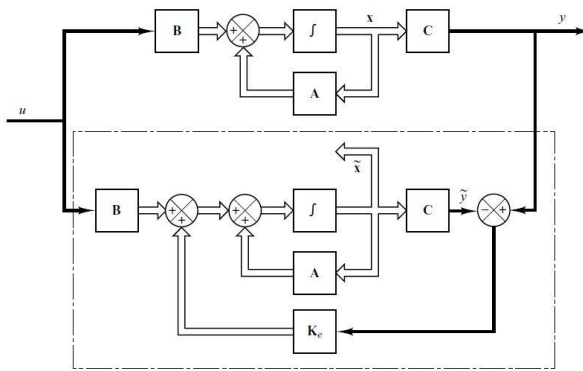
$$e = y - \hat{y} \quad (2.47)$$

Dimana \hat{x} merupakan state observer, $A \in R^{m \times m}$, $B \in R^{m \times n}$, serta $C \in R^{n \times m}$

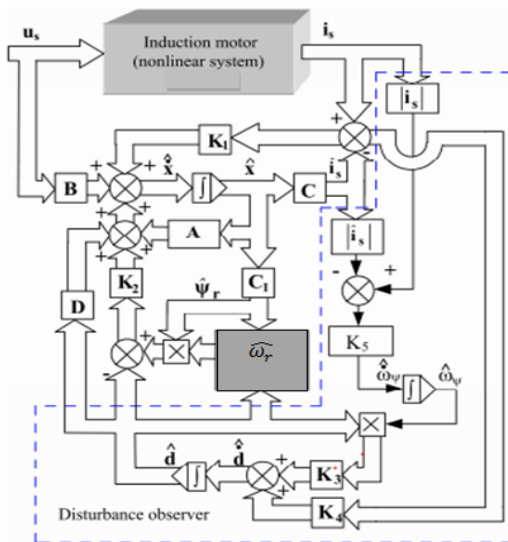
e = error estimasi

$K_e = L$ = gain observer

Ketika output *observer* dikurangkan dengan output dari *plant* lalu dikalikan dengan matriks L dan dijumlahkan dengan persamaan state sistem maka ini disebut sebagai Observer atau *Luenberger Observer*. Observer mengkoreksi estimasi dengan *feedback* dari error estimasi. Error estimasi yang akan digunakan sebagai *feedback* untuk mengoreksi sistem agar model sistem mendekati dengan nilai yang diinginkan. Blok dari observer dapat dilihat pada gambar 2.9. *Disturbance Observer* merupakan modifikasi dari *Luenberger Observer* dengan adanya penambahan state vector d atau yang disebut sebagai *disturbance*. Adapun state estimasi yang dihasilkan oleh *Disturbance Observer* yaitu arus, fluks, dan *disturbance* tersebut. Dalam perancangan estimator pada *Disturbance Observer*, nilai estimasi ω_r dipengaruhi dari *state* fluks estimasi dan *state disturbance* estimasi. Diagram blok dari *Disturbance Observer* dapat dilihat pada gambar 2.10.



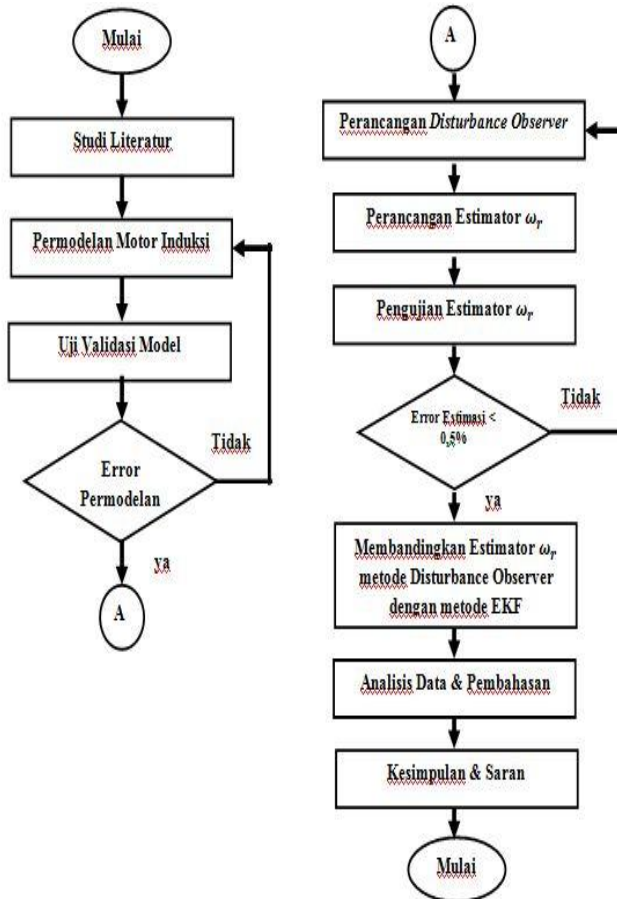
Gambar 2. 9 Ilustrasi Blok Observer [16]



Gambar 2. 10 Ilustrasi Blok *Disturbance Observer* [17]

BAB III METODOLOGI

Secara keseluruhan metode penelitian Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

Pada tugas akhir ini diawali dengan studi literatur terkait dengan topik penelitian meliputi prinsip kerja motor induksi, permodelan motor induksi hingga observer yang digunakan. Setelah didapatkan permodelan motor induksi dilanjutkan pada perancangan observer. Observer yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu *Disturbance Observer*. Observer digunakan untuk mendapatkan estimasi state dari motor induksi dengan menggunakan data arus dan tegangan motor induksi. Selanjutnya dilakukan perancangan estimator kecepatan motor induksi. Pengujian estimator dilakukan pada saat perubahan nilai tegangan dan penambahan *torsi load*. Berdasarkan pengujian tersebut apabila error estimasi sama atau dibawah batas error estimasi yang ditetapkan maka dapat dilanjutkan ke analisis dan pembahasan. Sebelum dilakukan analisis data, dilakukan proses perbandingan antara estimator dengan *Disturbance Observer* yang telah dirancang dengan estimator kecepatan *Extended Kalman Filter*. Setelah dilakukan analisis data dan pembahasan, dilakukan penarikan kesimpulan dan saran.

3.1 Pemodelan Motor Induksi

Pemodelan motor induksi dibuat pada *software* Matlab dengan asumsi semua parameter diketahui. Pemodelan tersebut dibuat berdasarkan pada jurnal motor induksi, observer dan *Disturbance Observer*. Adapun parameter yang digunakan pada permodelan motor induksi ditunjukkan pada Tabel 3.1, penggunaan parameter tersebut dikarenakan parameter pada jurnal [18] dimana sama dengan motor induksi yang digunakan pada saat pengambilan data di PT.INKA [3].

Bentuk persamaan motor induksi yang digunakan seperti tertera di (2.33) – (2.37) lalu diubah menjadi bentuk *state space* pada *Simulink* Matlab. Berdasarkan (2.45) – (2.49) diperoleh matriks $A \in R^{5 \times 5}$, $B \in R^{5 \times 2}$ dan $C \in R^{2 \times 5}$ serta $x \in R^{5 \times 1}$ sesuai dengan (2.40)-(2.44). Pada (2.40) matriks A bersifat nonlinier dikarenakan terdapat nilai ω_r , sehingga bentuk matriks A di modifikasi agar linier dengan menambah kan matriks baru ke dalam persamaan motor induksi.

$$\dot{x} = Ax + Ed + Bu \quad (3.1)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.2)$$

Sehingga bentuk baru dari matriks $A \in R^{4 \times 4}$, $B \in R^{4 \times 2}$ dan $C \in R^{2 \times 4}$, $x \in R^{4 \times 1}$ serta $E \in R^{4 \times 2}$ seperti pada persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{\alpha s} \\ \dot{i}_{\beta s} \\ \dot{\lambda}_{\alpha r} \\ \dot{\lambda}_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & a_2 \\ a_5 & 0 & a_6 & 0 \\ 0 & a_5 & 0 & a_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_3 & 0 \\ 0 & -a_3 \\ -P/2 & 0 \\ 0 & P/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{\alpha} \\ \xi_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_4 & 0 \\ 0 & a_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

dimana

$$a_1 = -\frac{L_m^2 R_r + L_r^2 R_s}{(L_r L_s - L_m^2) L_r} \quad (3.5)$$

$$a_2 = \frac{R_r L_m}{(L_r L_s - L_m^2) L_r}$$

$$a_3 = \frac{P/2 L_m}{(L_r L_s - L_m^2)} \quad (3.6)$$

$$a_4 = \frac{L_r}{(L_r L_s - L_m^2)} \quad (3.7)$$

$$a_5 = \frac{L_m R_r}{L_r} \quad (3.8)$$

$$a_6 = \frac{-R_r}{L_r} \quad (3.9)$$

$$\xi_\alpha = \omega_r \lambda_{\beta r} \quad (3.11)$$

$$\xi_\beta = \omega_r \lambda_{\alpha r} \quad (3.12)$$

Sistem non linier dikelompokkan menjadi pada matriks E, sehingga matriks A dan B tetap linier. Keluaran dari *state space* motor induksi yang sudah dimodifikasi ini terdiri dari 4 yaitu $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$, $\lambda_{\beta r}$, serta $\lambda_{\alpha r}$. Validasi model dilakukan dengan membandingkan *output state* dari *plant* motor induksi dengan *output state* dari *state space plant* motor induksi yang sudah dimodifikasi yang ditunjukkan pada (3.3). Adapun perbandingan state dilakukan terhadap state $i_{\alpha s}, i_{\beta s}$, ketika nilai state dari plant motor induksi dengan plant motor induksi yang dimodifikasi telah sesuai akan dilanjutkan pada perancangan observer.

Tabel 3. 1 Parameter Motor Induksi [18]

Nama	Nilai	Satuan
Induktansi Mutual (Lm)	0,258	H
Induktansi Rotor (Lr)	0,274	H
Induktansi Stator (Ls)	0,274	H
Resistansi Rotor (Rr)	3,80	Ω
Resistansi Motor (Rs)	4,85	Ω
<i>Pole</i>	4	
<i>Time Sampling</i>	1.10^{-6}	
Kapasitas	1,5	kW
Frekuensi (f)	50	Hz
Tegangan (V)	380	Volt

3.2 Perancangan *Disturbance Observer*

Observer digunakan untuk mendapatkan *state* estimasi yaitu $\hat{i}_{\alpha s}$, $\hat{i}_{\beta s}$, $\hat{\lambda}_{\beta r}$, serta $\hat{\lambda}_{\alpha r}$, dari motor induksi dengan input berupa tegangan dan arus. Adapun *state* $\hat{\omega}_r$ akan dihasilkan dari estimator yang dirancang. Dilihat dari (2.33) – (2.37) sistem motor induksi bersifat *nonlinier multivariable*. Dikarenakan pada persamaan (2.45)-(2.48) terdapat perkalian antara ω_r dengan λ_r yang selanjutnya pada persamaan (3.11) dan (3.12) didefinisikan sebagai *internal disturbance* maka ditulis persamaan berikut [17]:

$$\hat{d} = [\hat{\xi}_{\alpha} \quad \hat{\xi}_{\beta}]^T \quad (3.13)$$

Adapun *state* dari observer yang didesain ditunjukkan pada persamaan berikut [17]:

$$\hat{x} = [\hat{i}_s \quad \hat{\lambda}_r]^T \quad (3.14)$$

Perancangan observer sesuai dengan Gambar 2.9, namun karena terdapat *disturbance* tersebut maka terdapat modifikasi pada persamaan observer yang digunakan sebagaimana ditulis pada persamaan (3.15)-(3.19) yang selanjutnya persamaan disebut sebagai *Disturbance Observer* [17]:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + E\hat{d} + k_1(i_s - \hat{i}_s) + k_2(\hat{\omega}_r\hat{\lambda} - \hat{d}) \quad (3.15)$$

$$\frac{d\hat{d}}{dt} = k_3\hat{\omega}_\lambda\hat{d} + k_4(i_s - \hat{i}_s) \quad (3.16)$$

$\hat{\omega}_\lambda$ merupakan *vector* kecepatan angular fluks. Dimana diperoleh dari:

$$\frac{d\hat{\omega}_\lambda}{dt} = k_5[|i_s| - |\hat{i}_s|] \quad (3.17)$$

$$|i_s| = \sqrt{i_{\alpha s}^2 + i_{\beta s}^2} \quad (3.18)$$

$$|\hat{i}_s| = \sqrt{\hat{i}_{\beta s}^2 + \hat{i}_{\beta s}^2} \quad (3.19)$$

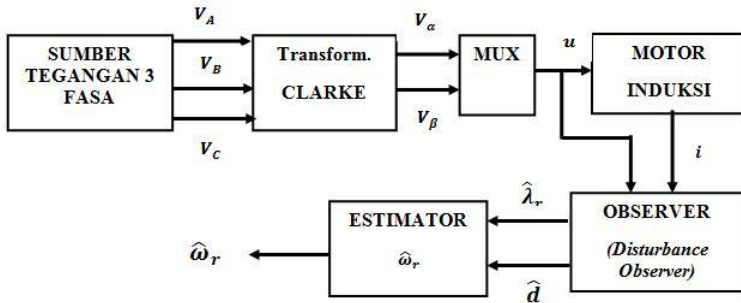
Adapun persamaan (3.15) dan (3.16) dapat ditulis dalam bentuk matriks *state space* seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_3 \hat{\omega}_\lambda \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ e_d \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Dimana $A \in R^{4 \times 4}$, $B \in R^{4 \times 2}$, $E \in R^{4 \times 2}$ dan $\hat{x} \in R^{4 \times 1}$ serta $v \in R^{4 \times 2}$.

$$e_i = i_s - \hat{i}_s \quad (3.21)$$

$$e_d = \hat{\omega}_r \hat{\lambda} - \hat{d} \quad (3.22)$$



Gambar 3. 2 Blok Disturbance Observer

Persamaan observer dari (3.15) – (3.19) digambarkan dalam diagram blok pada Gambar 3.2. Berdasarkan gambar 3.2, untuk mendapatkan nilai kecepatan estimasi motor induksi ($\hat{\omega}_r$) diperlukan data masukan berupa tegangan masukan (u_s) dan arus stator i_s . Seperti pada definisi (3.11)-(3.12), state d yang disebut sebagai *disturbance* digunakan dalam perancangan estimator ($\hat{\omega}_r$). Pada Gambar 2.10 diamati bahwa selain estimasi arus dan fluks juga terdapat estimasi *disturbance* yang mempengaruhi hasil estimasi kecepatan motor induksi. Terdapat dua error yang digunakan yaitu error arus dengan error *disturbance* yang

didefinisikan pada (3.21)-(3.22). Error ini masing-masing dikalikan dengan gain..

Pada tugas akhir ini gain diperoleh melalui metode LQR serta *trial and error*. LQR merupakan metode kendali optimum dengan tujuan utama membawa state akhir ke titik nol dengan meminimalkan *cost function*, Jenis kendali ini bertujuan mencari nilai gain *state feedback* (K) [19]. Jika sebuah plant dengan state space pada persamaan (2.49) dengan *cost function* Persamaan berikut (3.23) [19]:

$$J = \int_0^t ((x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t))dt \quad (3.23)$$

Dimana x dan u menyatakan matriks yang menyatakan nilai *state* dan *state* input. Sedangkan Q dan R adalah matriks pembobotan yang bersifat simetris definit positif. Pemilihan matriks tersebut tergantung dari seberapa besar pengaruh x dan u yang diinginkan pada *cost function* dan dilakukan dengan *trial and error* dengan syarat Q dan R harus simetris dan *positive definite*.

Matriks simetris memiliki sifat definit positif jika dan hanya jika semua nilai *eigennya* positif,. Adapun matriks simetris Q berorde $n \times n$ disebut definit positif jika memiliki sifat berikut [20]:

- Jika $x^T Q x > 0$ untuk semua vector tidak nol dari x dalam R^n .
- Matriks Q bersifat taksingular.
- $\det(Q) > 0$

Gain k_1 , k_2 dan k_4 merupakan gain yang diperoleh dari metode LQR. Sedangkan gain k_3 dan k_5 diperoleh dari metode *trial and error*. Tabel 3.2 menampilkan uji coba pemilihan nilai matriks $Q \in R^{6 \times 6}$ dan $R \in R^{4 \times 4}$ yang digunakan dalam perancangan LQR. Berdasarkan uji coba matriks Q dan R pada tabel 3.2 maka dipilihlah matriks yang ketiga yang digunakan dalam mencari nilai gain dikarenakan memiliki *cost function* yang minimal dimana uji coba dilakukan pada nilai $t = 0.5$ detik.

Tabel 3. 2 Uji Coba Matriks Q dan R

Matriks Q	Matriks R	Cost Function
$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 10^{12}$	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 10^1$	$2,37 \times 10^{16}$
$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 10^9$	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 10^3$	3.17×10^{13}
$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 10^3$	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times 10^1$	3.42×10^7

Adapun diperoleh nilai gain k_1 , k_2 dan k_4 sebagai berikut:

$$k_1 = \begin{bmatrix} 9.3592 & 1.72 \times 10^{-14} \\ 1.72 \times 10^{-14} & 9.3592 \\ 5.7593 & 1.24 \times 10^{-14} \\ 4,80 \times 10^{-16} & 5.7593 \end{bmatrix}$$

$$k_2 = \begin{bmatrix} 0.7832 & -6,56 \times 10^{-16} \\ 1.41 \times 10^{-14} & -0.7832 \\ -0.9072 & -2.45 \times 10^{-16} \\ 3.96 \times 10^{-15} & 0.9072 \end{bmatrix}$$

$$k_4 = \begin{bmatrix} 0.7832 & -1.41 \times 10^{-13} \\ 6,5 \times 10^{-16} & -0.7832 \end{bmatrix}$$

Gain k_3 dan k_5 diperoleh dari metode *trial and error* dimana nilainya sebagai berikut:

$$k_3 = 2,5 \times 10^4$$

$$k_5 = 1 \times 10^{-5}$$

3.3 Perancangan Estimator ω_r

Tahap selanjutnya yang dilakukan perancangan estimator ω_r . Persamaan untuk mengestimasi nilai ω_r ditunjukkan pada (3.24) – (3.25) [17].

$$\widehat{\omega}_r = \widehat{S} \sqrt{\frac{\widehat{\xi}_\alpha + \widehat{\xi}_\beta}{\widehat{\lambda}_{\alpha r} + \widehat{\lambda}_{\beta r}}} \quad (3.24)$$

Dengan \widehat{S} merupakan fungsi signum yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\widehat{S} = \text{sign}(\widehat{\xi}_\alpha \widehat{\lambda}_{\alpha r} + \widehat{\xi}_\beta \widehat{\lambda}_{\beta r}) \quad (3.25)$$

Berdasarkan persamaan (3.20) dapat dilihat bahwa estimasi kecepatan dipengaruhi oleh nilai estimasi fluks dan estimasi *disturbance*.

3.4 Pengujian Estimator ω_r

Setelah dilakukan perancangan estimator ω_r lalu dilakukan pengujian estimator ω_r . Adapun pengujian estimator ω_r dilakukan dengan variasi perubahan tegangan dengan variasi penambahan torsi load. Pada pengujian perubahan tegangan dilakukan pengubahan nilai tegangan dari 163 Volt menjadi 380 Volt. Sedangkan pada pengujian penambahan *torsi load*, dilakukan penambahan torsi load sebesar 10,6,3 dan 1 Nm.

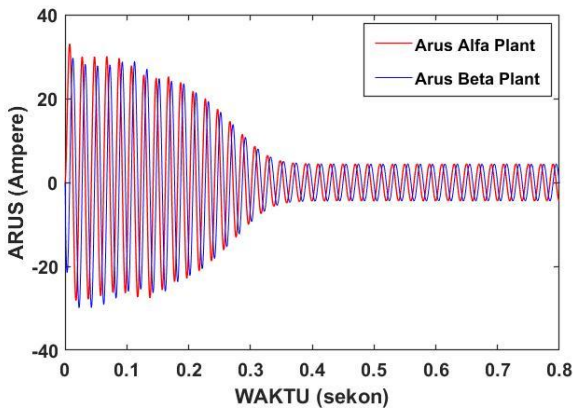
3.5 Perbandingan Estimator ω_r metode *Disturbance Observer* dengan Estimator ω_r metode *Extended Kalman Filter*.

Tahap selanjutnya yaitu membandingkan estimator kecepatan dengan *disturbance observer* yang telah dirancang dengan estimator kecepatan *Extended Kalman Filter*. Adapun estimator kecepatan *Extended Kalman Filter* ini berdasarkan pada penelitian sebelumnya [4]. Tujuan membandingkan estimator *disturbance observer* yang dirancang dengan estimator EKF yaitu untuk mengetahui apakah estimator *disturbance observer* telah mampu menghasilkan respon yang baik. Perbandingan dilakukan pada saat kondisi nominal, pengujian perubahan tegangan serta pengujian penabahan *torsi load*, dengan nilai error RMSE sebagai variabel pembanding.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Validasi Model

Simulasi dilakukan pada *software* Matlab R2014a menggunakan parameter yang terdapat pada Tabel 3.1 dan berdasarkan Gambar 3.2. Berikut merupakan hasil simulasi permodelan motor induksi yang telah dilakukan.

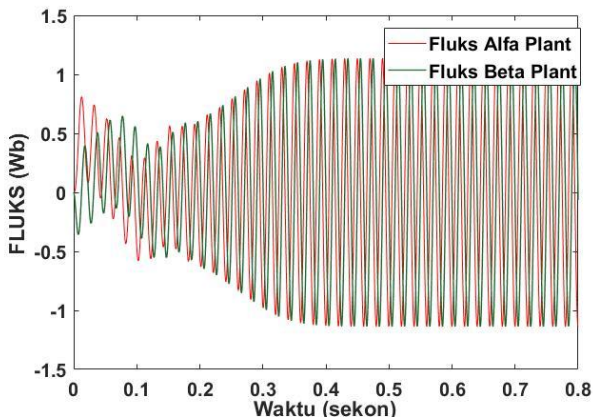


Gambar 4. 1 Respon arus *plant*

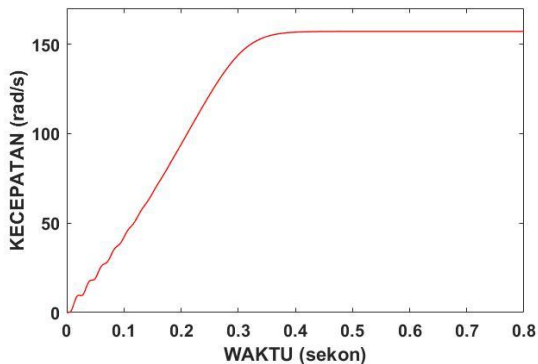
Gambar 4.1 menampilkan arus keluaran dari *plant* motor induksi. Garis merah dan biru menunjukkan respon nilai $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$. Respon arus $i_{\alpha s}$ mengalami keadaan transien selama 0,35 detik dari 33 A menjadi nilai konstan di 4,41 A. Sedangkan respon arus $i_{\beta s}$ mengalami transien selama 0,35 detik dari 30 A menjadi konstan 4,41 A. Setelah 0,35 detik baik nilai $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ konstan sebesar 4,41 A.

Gambar 4.2 menampilkan fluks keluaran dari *plant* motor induksi. Garis merah dan hijau menunjukkan respon fluks $\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$ dari kondisi awal. Fluks $\lambda_{\alpha r}$ naik dari 0 menuju 0,8 Wb lalu mengalami kondisi transien hingga mencapai nilai konstan di 0,35 detik dengan nilai 1,135 Wb. Sedangkan $\lambda_{\beta r}$ turun ke nilai -

0.38 pada detik 0,008 lalu mengalami kondisi transien hingga mencapai nilai konstan pada 0,35 detik dengan nilai 1,135 Wb. Berdasarkan respon arus dan fluks *plant* pada Gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa keduanya mencapai nilai konstan pada detik 0,35 sekon sehingga antara arus dan fluks saling berhubungan satu sama lain.



Gambar 4. 2 Respon fluks *plant*



Gambar 4. 3 Respon kecepatan *plant*

Gambar 4.3 menampilkan respon kecepatan *plant*. Respon kecepatan motor (ω_r) *plant* naik dari 0 rad/s menuju nilai konstan pada kecepatan 157.08 rad/s di 0,4 sekon. Setelah didapatkan hasil respon permodelan motor induksi, validasi model dilakukan dengan membandingkan kecepatan *plant* motor induksi hasil simulasi matlab dengan hasil pengukuran kecepatan motor induksi riil yang dilakukan pada PT.INKA pada penelitian sebelumnya [3]. Hasilnya ditampilkan pada tabel 4.2 dengan diperoleh rata-rata error permodelan sebesar 0.106%. Dimana error permodelan ini kurang dari 0,5% yaitu batas error permodelan yang ditetapkan. Saat error permodelan ini telah sesuai dengan batas error permodelan yang ditetapkan, maka dilanjutkan pada perancangan observer.

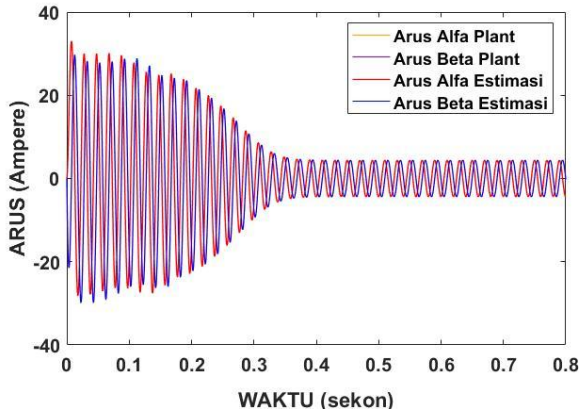
Tabel 4. 1 Data kecepatan motor *plant* dan pengukuran

No	Tegangan (V)	ω_r Pengukuran (rad/s)	ω_r <i>Plant</i> (rad/s)	Error (%)
1	263	156,9	156,96	0,038
2	296	157,07	156,84	0,14
3	378	157,3	157,08	0,14
Rata-rata				0,106

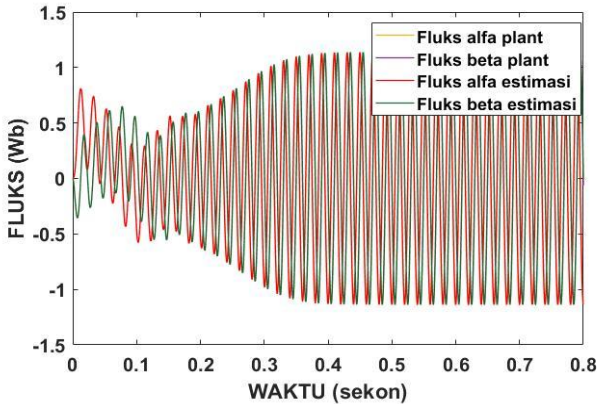
4.2 Hasil Simulasi Observer Kondisi Nominal

Setelah dilakukan uji validasi permodelan, dilakukan perancangan observer. *State* keluaran dari observer terdiri dari $i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$, $\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$. Hasil pengujian observer pada kondisi nominal (Tegangan 380 Volt) ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan 4.5 untuk respon arus dan fluks, dimana pada kondisi ini tidak ditambahkan *torsi load* serta tidak dilakukan perubahan nilai tegangan. Berdasarkan pada Gambar 4.5 respon arus estimasi menunjukan nilai yang berhimpitan dengan respon arus *plant*. Arus estimasi menunjukkan nilai konstan pada 4.41 A di 0,35 detik, nilai estimasi arus tersebut berhimpitan dengan arus *plant*.

Sedangkan pada Gambar 4.5 menunjukkan respon fluks estimasi, dapat dilihat bahwa fluks estimasi menunjukkan nilai konstan pada 1.135 Wb di 0.35 detik, dimana nilai estimasi fluks tersebut juga berhimpitan dengan fluks *plant*.



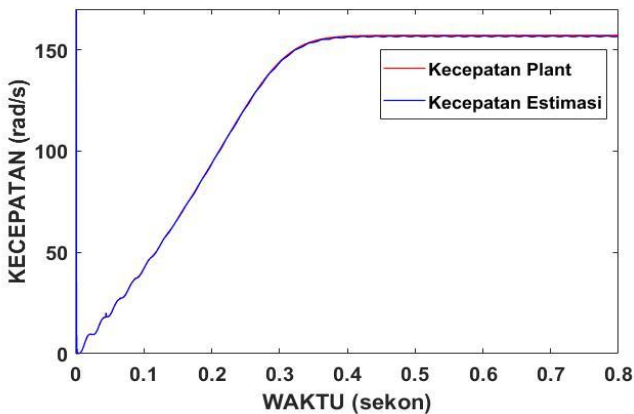
Gambar 4. 4 Respon arus *plant* dan estimasi



Gambar 4. 5 Respon fluks *plant* dan estimasi

Gambar 4.6 menunjukkan respon antara kecepatan *plant* dan kecepatan estimasi. Garis merah merupakan respon kecepatan

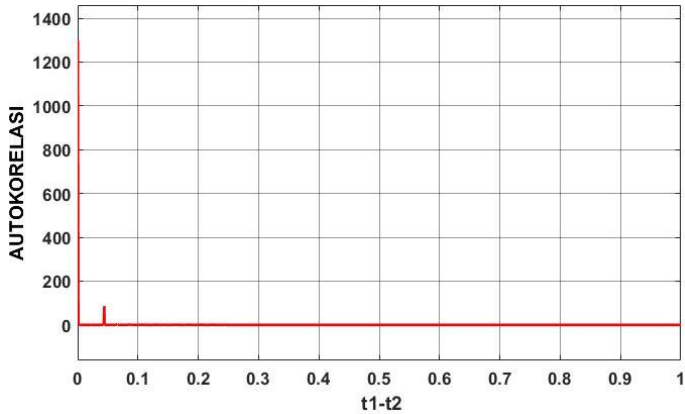
plant sedangkan garis biru merupakan respon kecepatan estimasi. Respon keduanya saling berhimpitan membuktikan bahwa hasil kecepatan estimasi mendekati nilai kecepatan *plant*. Gambar 4.6 kecepatan *plant* konstan pada nilai 157.08 rad/s sedangkan kecepatan estimasi *steady* pada 156,80 rad/s. Baik kecepatan *plant* maupun estimasi mencapai nilai mantap atau konstan pada 0,4 sekon. Error estimasi yang diperoleh antara kecepatan *plant* dan estimasi sebesar 0.18%. Adapun error RMSE untuk estimasi arus, fluks dan kecepatan sebesar 0,2770, 0,0135 dan sebesar 0,6995.



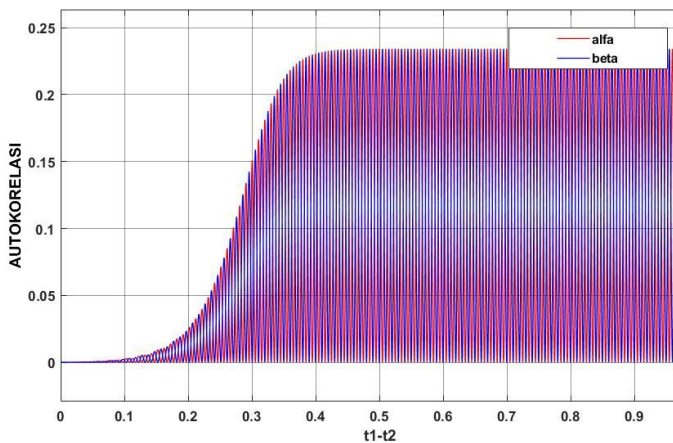
Gambar 4. 6 Respon kecepatan *plant* dan estimasi

Selain menggunakan error RMSE sebagai parameter performansi observer, juga dilakukan plot grafik autokorelasi antara error estimasi arus, fluks dan kecepatan. Uji autokorelasi dilakukan untuk mengetahui apakah ada korelasi variabel yang ada dalam observer terhadap perubahan waktu ($t_1 - t_2$). Uji autokorelasi yang dilakukan penambahan blok simulink ACF(*Autocorrelation*) pada software Matlab pada setiap keluaran error kecepatan, arus dan fluks. Adapun grafik

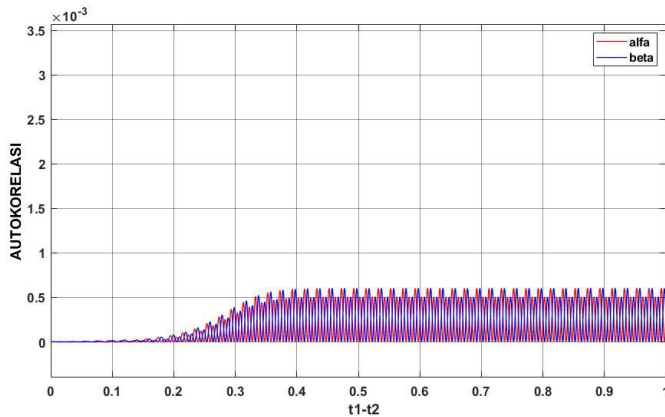
autokorelasi error kecepatan, arus dan fluks yang ditunjukkan pada gambar 4.7-4.9 berikut:



Gambar 4. 7 Plot Autokorelasi Error Kecepatan estimasi terhadap Kecepatan Plant



Gambar 4. 8 Plot Autokorelasi Error Arus estimasi terhadap Arus Plant



Gambar 4. 9 Plot Autokorelasi Error Fluks estimasi terhadap Fluks Plant

Berdasarkan gambar 4.7 dapat dilihat bahwa pada autokorelasi error kecepatan sangat tinggi pada perubahan waktu atau $t_1 - t_2$ awal, dapat diartikan bahwa nilai estimasi kecepatan tidak bergantung pada perubahan waktu. Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2 bahwa estimasi kecepatan dalam *Disturbance Observer* dipengaruhi nilai estimasi fluks dan estimasi *disturbance*. Berdasarkan gambar 4.8 dapat dilihat bahwa autokorelasi pada error arus semakin bertambah saat awal perubahan waktu $t_1 - t_2$ dan bernilai tetap hingga akhir, dari gambar tersebut diartikan bahwa nilai arus sekarang bergantung pada nilai arus sebelumnya. Begitu juga pada gambar 4.9 yang menunjukkan autokorelasi error fluks yang memiliki tren kenaikan sama dengan plot autokorelasi fluks, sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai fluks sekarang bergantung pada nilai fluks sebelumnya.

Setelah mendapatkan hasil kecepatan estimasi, dilakukan perbandingan nilai kecepatan estimasi dengan data hasil pengukuran kecepatan motor induksi riil yang dilakukan pada PT.INKA pada penelitian sebelumnya [3] dengan variasi nilai

tegangan. Berdasarkan tabel 4.2 tersebut diperoleh selisih error antara sebesar 0,25%. Adapun gambar respon kecepatan plant dan estimasi saat terjadi perubahan nilai tegangan dapat dilihat pada lampiran C untuk ketiga nilai tegangan yang digunakan yaitu 263 Volt, 296 Volt dan 378 Volt.

Tabel 4. 2 Data kecepatan motor pengukuran dan estimasi

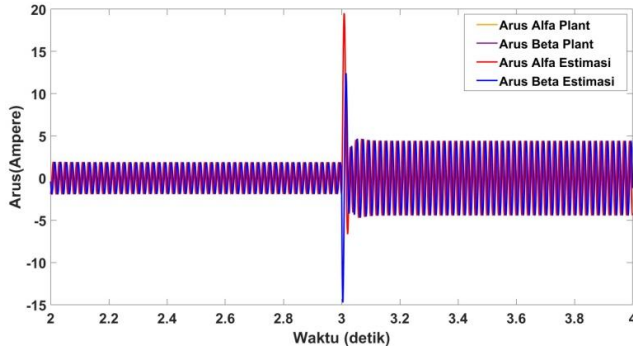
No	Tegangan (V)	ω_r Pengukuran (rad/s)	ω_r Estimasi (rad/s)	Error (%)
1	263	156,9	156,49	0,26
2	296	157,07	156,80	0,17
3	378	157,3	156,77	0,32
Rata-rata				0,25

4.3 Uji Perubahan Nilai Tegangan

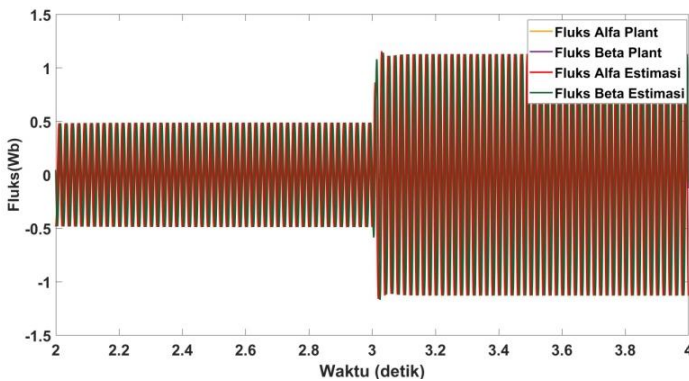
Pada uji perubahan tegangan dilakukan perubahan nilai tegangan dari 163 Volt menjadi 380 Volt pada detik ke 3 sekon. Gambar 4.10 menunjukkan respon arus *plant* dan estimasi saat terjadi perubahan tegangan. Mulai dari detik 0 hingga ke detik 3 sekon tegangan yang diberikan sebesar 163 Volt, selanjutnya tegangan berubah menjadi 380 Volt. Dapat dilihat pada gambar 4.10 saat tegangan 163 Volt, arus *plant* dan estimasi ($i_{\beta s}$, $i_{\alpha s}$) pada kondisi konstan 1,9 A sedangkan saat tegangan diubah menjadi 380 Volt arus *plant* dan estimasi mengalami kondisi transien selama selama 0,05 detik lalu mencapai nilai konstan kembali pada 4.41 A di 3,05 sekon. Sehingga dapat dilihat bahwa hubungan kenaikan tegangan akan menaikkan nilai arus baik arus *plant* maupun arus estimasi.

Gambar 4.11 menunjukkan respon fluks *plant* dan estimasi saat terjadi perubahan tegangan dari 163 Volt ke 380 Volt pada detik ke 3 sekon. Dapat dilihat pada gambar 4.8 saat tegangan 163 Volt, fluks *plant* dan estimasi ($\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$) pada kondisi konstan 0,48 Wb sedangkan saat tegangan diubah menjadi 380 Volt fluks *plant* dan estimasi mengalami kondisi

transien selama selama 0,5 detik hingga mencapai nilai konstan pada 1,13 Wb di 3,05 sekon. Sehingga dapat dilihat bahwa hubungan kenaikan tegangan akan menaikkan nilai fluks *plant* dan estimasi.



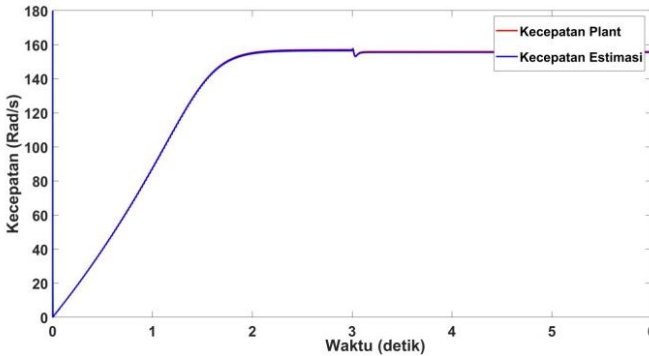
Gambar 4. 10 Perubahan respon arus *plant* dan estimasi saat perubahan tegangan



Gambar 4. 11 Perubahan respon fluks *plant* dan estimasi saat perubahan tegangan

Gambar 4.12 menunjukkan respon kecepatan *plant* dan estimasi ketika terjadi perubahan tegangan, kecepatan *plant* menjadi tidak stabil selama 0,1 sekon dikarenakan perubahan tegangan tersebut.

Setelah 0,1 sekon kecepatan kembali pada nilai konstan, baik respon kecepatan *plant* maupun kecepatan estimasi. Saat terjadi perubahan tegangan, kecepatan estimasi secara otomatis mengikuti perubahan kecepatan *plant*. Adapun perubahan kecepatan tidak menurun drastis dikarenakan pengujian dilakukan tanpa penambahan beban atau *torsi load*.



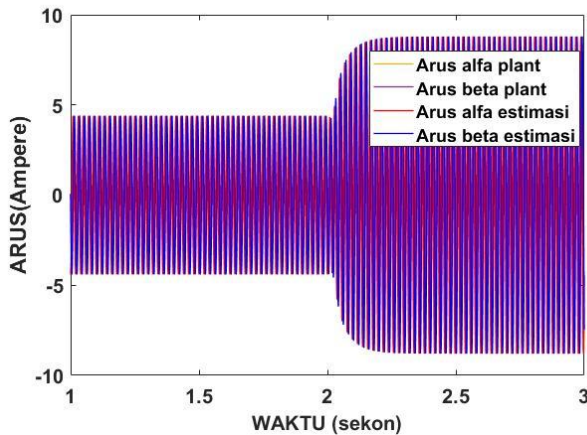
Gambar 4. 12 Perubahan respon kecepatan plant dan estimasi saat perubahan tegangan

4.4 Hasil Uji Beban/ *Torsi Load*

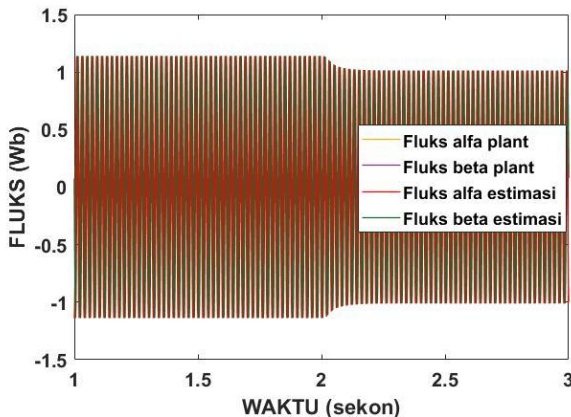
Setelah dilakukan uji perubahan tegangan dilakukan pengujian simulasi dengan penambahan beban atau *torsi load*. *Torsi Load* pada simulasi diberikan melalui sinyal step. Variasi beban yaitu sebesar 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm dan 10 Nm. Penambahan *torsi load* diberikan pada saat detik ke 2 sekon. Adapun pada hasil uji beban ditunjukkan sebagai berikut.

4.4.1 Uji *Torsi Load* 10 Nm

Gambar 4.12 menunjukkan respon arus plant dan estimasi ketika diberikan *torsi load* 10 Nm. *Torsi load* diberikan pada detik ke 2 sekon. Saat belum diberi beban arus menunjukkan nilai konstan sebesar 4,41 A, setelah penambahan *torsi load* pada detik 2 sekon, arus mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 8,80 A pada detik ke 2,2 sekon.



Gambar 4. 13 Respon arus plant dan estimasi saat penambahan torsi load 10 Nm pada detik 2 sekon

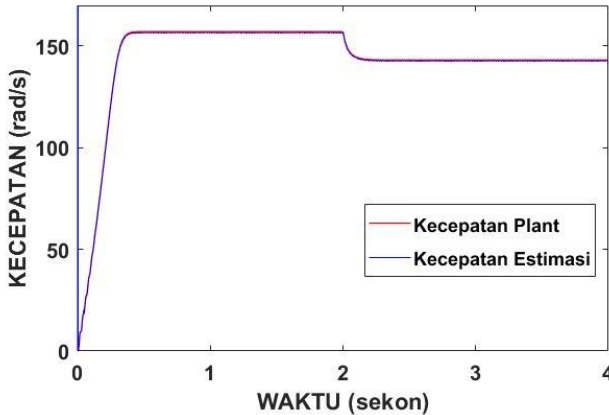


Gambar 4. 14 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 10 Nm pada detik 2 sekon

Gambar 4.13 menunjukkan respon fluks *plant* dan estimasi ketika diberi *torsi load* sebesar 10 Nm pada detik ke 2 sekon. Nilai fluks yang semula konstan pada 1.14 Wb berubah

menjadi 1,1016 Wb pada detik ke 2,2 sekon. Sehingga berdasarkan gambar 4.10 dan 4.11 dapat diamati bahwa penambahan *torsi load* akan menaikkan arus dan menurunkan nilai fluks.

Gambar 4.15 menunjukkan respon kecepatan *plant* dan estimasi dengan penambahan torsi load 10 Nm pada detik ke 2 sekon. Dapat dilihat bahwa nilai kecepatan *plant* dan estimasi masih berhimpitan setelah adanya penambahan torsi load. Respon kecepatan estimasi secara otomatis mengikuti respon kecepatan *plant*. Kecepatan *plant* semula 157.08 rad/s berubah menjadi sebesar 143.13 rad/s . Sedangkan kecepatan estimasi berubah menjadi 142.70 rad/s sehingga error kecepatan *plant* dan estimasi setelah penambahan beban sebesar 0.30%. Error RMSE yang dihasilkan sebesar 0,3473.



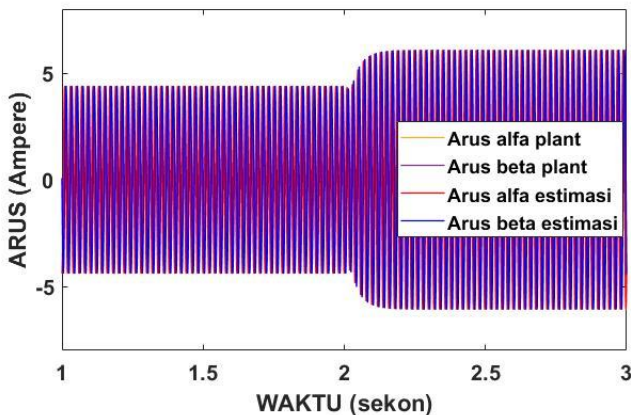
Gambar 4. 15 Respon kecepatan *plant* dan estimasi saat penambahan torsi load 10 Nm pada detik 3 sekon

4.4.2 Uji Torsi Load 6 Nm

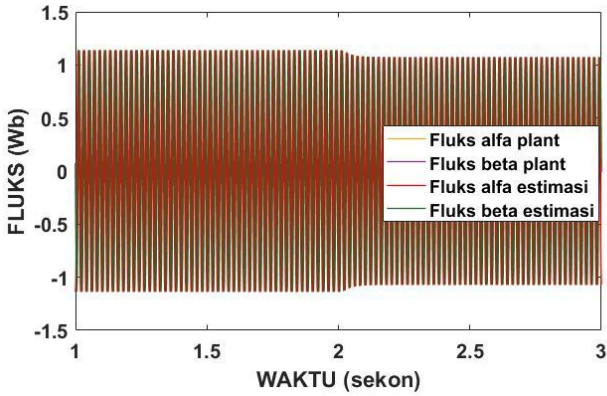
Gambar 4.15 menunjukkan respon arus *plant* dan estimasi ketika diberikan *torsi load* 6 Nm pada detik ke 2 sekon. Saat

belum diberi beban arus menunjukkan nilai konstan sebesar 4,40 A, setelah diberi beban pada detik 2 sekon arus mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 6,1 A pada detik ke 3,2 sekon. Sedangkan Gambar 4.17 menunjukkan respon fluks *plant* dan estimasi ketika diberi *torsi load* sebesar 6 Nm pada detik ke 2 sekon. Nilai fluks yang semula konstan pada 1.14 Wb menjadi 1,118 Wb pada detik ke 2,2 sekon.

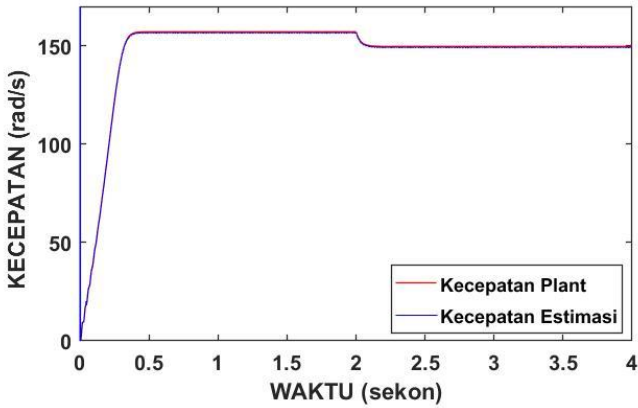
Gambar 4.18 menunjukkan respon kecepatan *plant* dan estimasi dengan penambahan torsi load 6 Nm pada detik ke 2 sekon. Dapat dilihat nilai kecepatan *plant* dan estimasi masih berhimpitan setelah adanya penambahan torsi load. Respon kecepatan estimasi secara otomatis mengikuti respon kecepatan *plant*. Kecepatan *plant* semula 157.08 rad/s berubah menjadi 149.62 rad/s. Sedangkan kecepatan estimasi berubah menjadi 149.37 rad/s sehingga error kecepatan *plant* dan estimasi setelah penambahan beban sebesar 0.16%. Sedangkan error RMSE yang dihasilkan sebesar 0,3424.



Gambar 4. 16 Respon arus *plant* dan estimasi saat penambahan torsi load 6 Nm pada detik 2 sekon

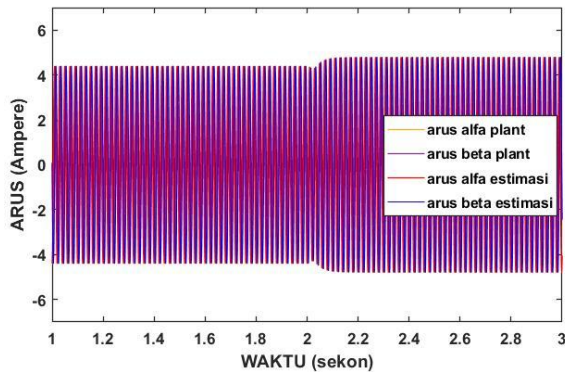


Gambar 4. 17 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 6 Nm pada detik 2 sekon



Gambar 4. 18 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 6 Nm pada detik 2 sekon

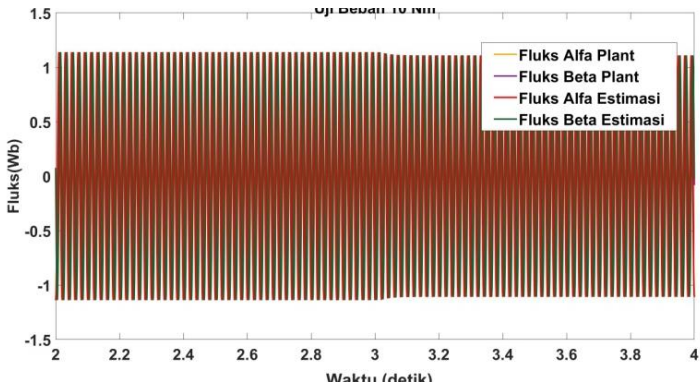
4.4.3 Uji Torsi Load 3 Nm



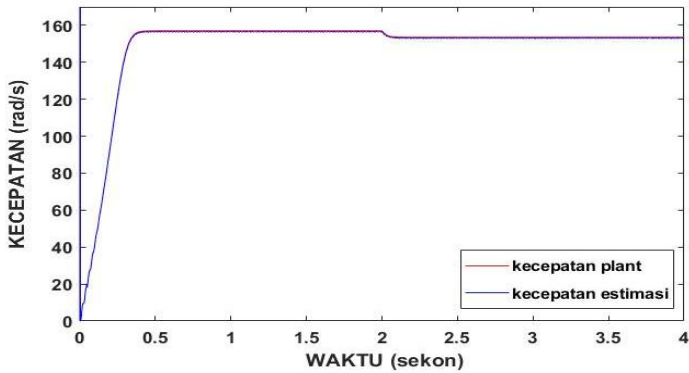
Gambar 4. 19 Respon arus plant dan estimasi saat penambahan torsi load 3 Nm pada detik 2 sekon

Gambar 4.19 menunjukkan respon arus plant dan estimasi setelah penambahan torsi load 3 Nm pada detik ke 2 sekon. Sebelum penambahan *torsi load*, arus menunjukkan nilai konstan sebesar 4,40 A, setelah diberi beban pada detik 2 sekon arus mengalami kenaikan hingga mencapai nilai konstan 4,8 A pada detik ke 2,2 sekon. Sedangkan gambar 4.20 menunjukkan respon fluks plant dan estimasi ketika diberi *torsi load* sebesar 3 Nm pada detik ke 2 sekon. Nilai fluks yang semula konstan pada 1.14 Wb menjadi 1,12 Wb pada detik ke 2,2 sekon.

Gambar 4.21 menunjukan respon kecepatan *plant* dan estimasi dengan penambahan torsi load 3 Nm pada detik ke 2 sekon. Dapat dilihat nilai kecepatan plant dan estimasi masih berhimpitan setelah adanya penambahan torsi load. Respon kecepatan estimasi secara otomatis mengikuti respon kecepatan *plant*. Kecepatan *plant* semula 157.08 rad/s berubah menjadi 153,60 rad/s. Sedangkan kecepatan estimasi berubah menjadi 153,30 rad/s sehingga error kecepatan plant dan estimasi setelah penambahan beban sebesar 0.19%. Dan error RMSE yang dihasilkan sebesar 0,3444.

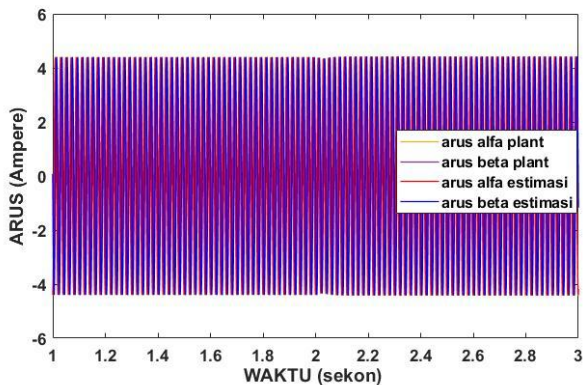


Gambar 4. 20 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 3 Nm pada detik 2 sekon



Gambar 4. 21 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 3 Nm pada detik 2 sekon

4.4.4 Uji Torsi Load 1 Nm

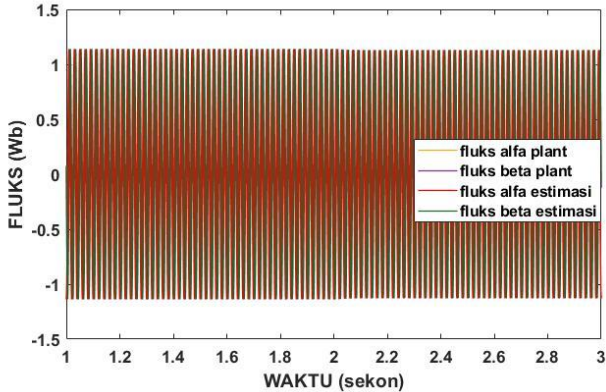


Gambar 4. 22 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 1 Nm pada detik 2 sekon

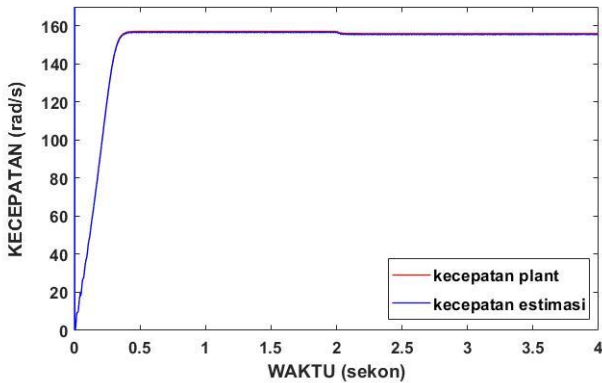
Gambar 4.22 menunjukkan respon arus plant dan estimasi setelah penambahan torsi load 1 Nm pada detik ke 2 sekon. Saat belum diberi beban arus menunjukkan nilai konstan sebesar 4,40 A, setelah diberi beban pada detik 3 sekon arus mengalami sedikit kenaikan. Pada gambar tidak begitu terlihat kenaikan arus plant dan estimasi namun jika dicermati arus berubah menjadi 4,50 A pada detik ke 2,2 sekon. Gambar 4.23 menunjukkan respon fluks plant dan estimasi ketika diberi torsi load sebesar 1 Nm pada detik ke 2 sekon. Secara sekilas tidak terlihat perubahan fluks, namun ketika dicermati nilai fluks yang semula konstan pada 1.14 Wb menjadi 1,124 Wb pada detik ke 3,2 sekon.

Gambar 4.24 menunjukkan respon kecepatan plant dan estimasi dengan penambahan torsi load 1 Nm pada detik ke 2 sekon. Dapat dilihat nilai kecepatan plant dan estimasi masih berhimpitan setelah adanya penambahan *torsi load*. Respon kecepatan estimasi secara otomatis mengikuti respon kecepatan plant. Kecepatan *plant* semula 157,08 rad/s berubah menjadi 155,90 rad/s. Sedangkan kecepatan estimasi berubah menjadi 155,60 rad/s sehingga error kecepatan plant dan estimasi setelah

penambahan beban sebesar 0.19%. Dan error RMSE yang dihasilkan sebesar 0,3478



Gambar 4. 23 Respon fluks plant dan estimasi saat penambahan torsi load 1 Nm pada detik 3 sekon



Gambar 4. 24 Respon kecepatan plant dan estimasi saat penambahan torsi load 1 Nm pada detik 3 sekon

Tabel 4.3 menunjukkan perubahan respon kecepatan setelah adanya penambahan torsi load. Dapat dilihat pada Tabel 4.3

bahwa semua error estimasi bernilai dibawah batas error estimasi yang ditetapkan yaitu 0,5%.

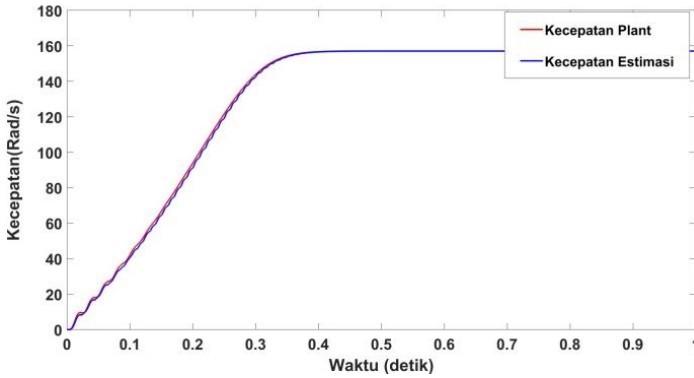
Tabel 4.3 Respon perubahan kecepatan setelah penambah torsi load

Torsi Load (Nm)	Kecepatan Plant (rad/s)	Kecepatan Estimasi (rad/s)	Error estimasi (%)
10	143,13	142,70	0,3
6	149,62	149,37	0,16
3	153,60	153,30	0,19
1	155,90	155,60	0,19

4.5 Perbandingan performansi Estimator *Disturbance Observer* dengan Estimator *Extended Kalman Filter*.

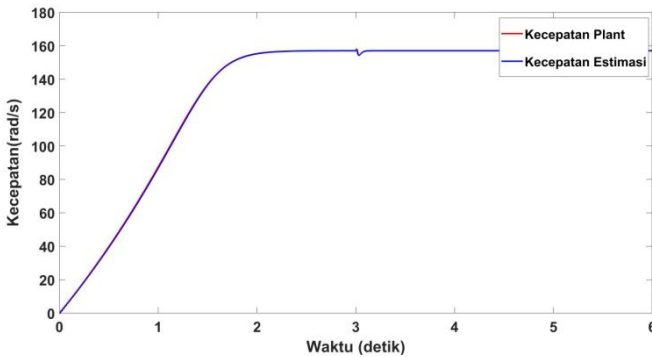
4.5.1 EKF Kondisi Nominal

Performansi estimator kecepatan metode *Disturbance Observer* yang telah dirancang dibandingkan dengan estimator kecepatan metode *Extended Kalman Filter* pada penelitian sebelumnya [4]. Gambar 4.25 menunjukkan respon estimasi kecepatan dengan menggunakan *Extended Kalman Filter*. Berdasarkan gambar 4.25 respon kecepatan estimasi dengan EKF mencapai nilai konstan pada detik 0,4 sekon, begitu juga dengan respon kecepatan estimasi menggunakan *disturbance observer* seperti pada gambar 4.6 dimana kecepatan estimasi juga mencapai nilai konstan pada detik 0,4 sekon. Adapun error RMSE estimator *Disturbance Observer* sebesar 0.6995 sedangkan error RMSE estimator EKF sebesar 0,9618. Sehingga dari segi error RMSE *Disturbance Observer* lebih kecil dibandingkan dengan EKF, dimana semakin kecil nilai RMSE maka menunjukkan bahwa variasi nilai yang dihasilkan oleh observer mendekati variasi nilai yang dihasilkan oleh model atau *plant*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa estimator kecepatan *Disturbance Observer* lebih baik dibandingkan dengan estimator kecepatan dengan metode *Extended Kalman Filter* atau EKF.



Gambar 4. 25 Respon kecepatan plant dan estimasi menggunakan EKF

4.5.2 EKF Uji Perubahan Tegangan



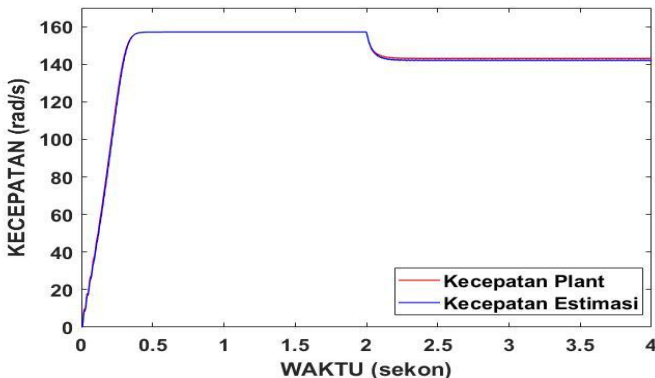
Gambar 4. 26 Respon estimator EKF saat terjadi perubahan tegangan

Selanjutnya dibandingkan respon kecepatan estimasi dengan *Disturbance Observer* dengan EKF ketika terjadi perubahan tegangan dari 163 Volt menjadi 380 Volt. Dimana gambar 4.26 memperlihatkan respon estimasi kecepatan saat pengujian perubahan tegangan dengan menggunakan EKF. Jika

dibandingkan dengan gambar 4.12 yang memperlihatkan respon estimasi kecepatan dengan *disturbance observer* saat terjadi perubahan tegangan, keduanya dapat secara otomatis menyesuaikan ketika terjadi perubahan tegangan. Yaitu kecepatan mengalami penurunan atau kondisi tidak stabil selama 0,1 sekon lalu kembali pada nilai konstan pada nilai kecepatan sebelumnya atau sebelum terjadinya perubahan tegangan.

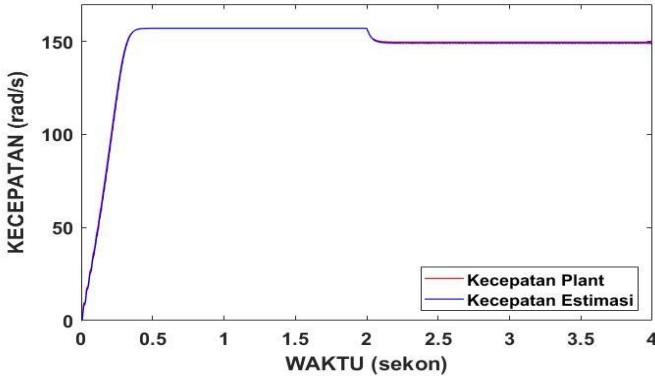
4.5.2 EKF Uji Penambahan *Torsi Load*.

Pada uji penamabahan *torsi load*, dilakukan penambahan torsi load sebesar 10, 6, 3, dan 1 N saat detik ke 2 sekon pada estimator EKF dimana hasilnya ditampilkan pada Gambar 4.27 - 4.30.



Gambar 4. 27 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 10 Nm

Gambar 4.27 menunjukkan respon kecepatan plant dan estimasi dengan menggunakan estimator EKF saat uji *torsi load* sebesar 10 Nm. Saat uji beban sebesar 10 Nm, error RMSE untuk estimasi arus sebesar 0,009, error RMSE untuk estimasi fluks alfa dan beta sebesar 0,0033 dan 0,0051. Sedangkan error RMSE untuk estimasi kecepatan diperoleh sebesar 0,8504.

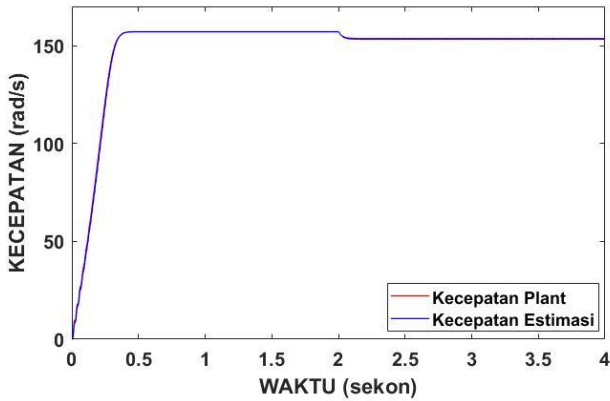


Gambar 4. 28 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 6 Nm

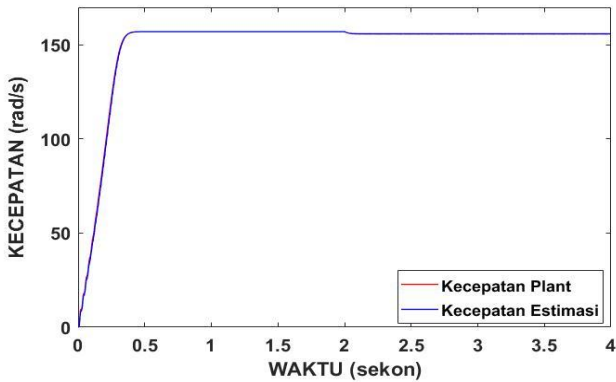
Gambar 4.28 menunjukkan respon kecepatan plant dan estimasi dengan menggunakan estimator EKF saat uji *torsi load* sebesar 6 Nm. Saat uji beban sebesar 6 Nm, error RMSE untuk estimasi arus sebesar 0,0093, error RMSE untuk estimasi fluks alfa dan beta sebesar 0,0025 dan 0,0041. Sedangkan error RMSE untuk estimasi kecepatan diperoleh sebesar 0,6310.

Gambar 4.29 menunjukkan respon kecepatan plant dan estimasi dengan menggunakan estimator EKF saat uji *torsi load* sebesar 3 Nm. Saat uji beban sebesar 3 Nm, error RMSE untuk estimasi arus sebesar 0,009, error RMSE untuk estimasi fluks alfa dan beta sebesar 0,0022 dan 0,0035. Sedangkan error RMSE untuk estimasi kecepatan diperoleh sebesar 0,5212.

Gambar 4.30 menunjukkan respon kecepatan plant dan estimasi dengan menggunakan estimator EKF saat uji *torsi load* sebesar 1 Nm. Saat uji beban sebesar 1 Nm, error RMSE untuk estimasi arus sebesar 0,0095, error RMSE untuk estimasi fluks alfa dan beta sebesar 0,0020 dan 0,0033. Sedangkan error RMSE untuk estimasi kecepatan diperoleh sebesar 0,4855



Gambar 4. 29 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 3 Nm



Gambar 4. 30 Respon estimator EKF saat penambahan Torsi Load sebesar 1 Nm

Berikut menampilkan perbandingan estimator Disturbance Observer dengan estimator EKF pada saat uji penambahan *torsi load*.

Tabel 4.4 Perbandingan nilai RMSE kecepatan

Uji beban (Nm)	Error RMSE Kecepatan	
	Disturbance Observer	EKF
10	0,3473	0,8504
6	0,3424	0,6310
3	0,3444	0,5212
1	0,3478	0,4855

Berdasarkan tabel 4.4 tersebut dapat dilihat bahwa error RMSE yang dihasilkan oleh estimator kecepatan dengan *Disturbance Observer* yang dirancang memiliki nilai error RMSE yang lebih kecil daripada error RMSE dengan estimator EKF.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

- a. Perancangan estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* menghasilkan kecepatan estimasi sebesar 156.80 rad/s pada kondisi nominal sehingga diperoleh error estimasi sebesar 0,18% dan error RMSE sebesar 0,6995.
- b. Pada pengujian perubahan nilai tegangan respon kecepatan estimasi mampu mengikuti perubahan kecepatan *plant*.
- c. Pada pengujian penambahan *torsi load* diperoleh nilai RMSE terkecil sebesar 0,3424 untuk *torsi load* sebesar 6 Nm.
- d. Estimator kecepatan berbasis *Disturbance Observer* menunjukkan performansi nilai RMSE yang lebih kecil daripada estimator kecepatan berbasis *Extended Kalman Filter*.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil pengujian adalah sebagai berikut:

- a. Untuk penelitian selanjutnya selain dilakukan perancangan estimator kecepatan perlu dikembangkan perancangan kontrol kecepatan rotor motor induksi berdasarkan hasil estimator *Disturbance Observer*.

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Leonhard, "Control of Electrical Drives," Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1996.
- [2] T. F. Chan dan K. Shi, Applied Intelligent Control Of Induction Motor Drives, IEEE Press, 2011.
- [3] R. I. Ardini, "Perancangan Luenberger Observer Untuk Speed Sensorless Induction Motor Di Unit Penggerak Kereta PT.INKA," ITS, Surabaya, 2019.
- [4] I. P. Anggraini, "Perancangan Extended Kalman Filter untuk Speed Sensorless Induction Motor di Unit Penggerak Kereta Api PT.INKA," ITS, Surabaya, 2019.
- [5] U. A. Bakshi dan A. V. Bakshi, Electrical Machines and Instruments, Technical Publication Pune, 2006.
- [6] Y. Liklikwatil, Mesin-Mesin Listrik, Yogyakarta : Deepublish, 2014.
- [7] A. Nikbakhsh, H. R. Izadfar dan M. Jazaeri, "Classification and Comparison of Rotor Temperature Estimation Methods of squirrel cage induction motors," *Measurement*, vol. 145, pp. 779-802, 2019.
- [8] T. Sukmadi, "PERANCANGAN PARAMETER PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA TIPE ROTOR BELITAN UNTUK PENINGKATAN UNJUK KERJA," *Momentum*, vol. 10, pp. 62-68, 2014.
- [9] B. Muslim, "Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroller Fuzzy-PID," Teknik Elektro,ITS,

Surabaya, 2015.

- [10] T. Masuzawa, M. Osa dan M. Mapley, “Motor Design and Impeller Suspension,” dalam *Mechanical Circulatory and Respiratory Support*, Academic Press, 2018, pp. 335-377.
- [11] H. A. Toliyat dan S. G. Campbell, *DSP-Based Electromechanical Motion Control*, CRC Press, 2004.
- [12] MathWorks, [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/clarktransform.html>. [Diakses 14 Januari 2020].
- [13] K. Rajashekara, Kawamura dan K. Matsuke, 1996, IEEE Press, *Speed Sensorless Control of AC Motor Drives*.
- [14] Z. Horvath dan G. Molnarka, “Design Luenberger Observer for an Electromechanical Actuator,” *Acta Technica Jauriness*, pp. 328-343 , 2014.
- [15] A. Savoia, M. Mengoni, L. Zarri dan D. Casadei, “A Nonlinear Luenberger Observer for Sensorless Vector Control of Induction Motor,” dalam *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference*, 2011.
- [16] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 2010.
- [17] M. Adamowicz, “Observer Induction Motor Speed Based on Simplified Dynamical Equation of Disturbance Model,” no. Energy and Geotechnology, 2006.
- [18] S. Allaoui dan K. Chafaa, “Induction Motor State Estimation using Tuned Extended Kalman Filter,” dalam *4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*,

2015.

- [19] Fahmizal, M. Arrofiq, R. Adrian dan A. Mayub, “Robot Inverted Pendulum Beroda Dua dengan Kendali LQR,” *ELKOMIKA*, vol. 7, pp. 224-237, 2019.
- [20] S. J. Leon, *Aljabar Linear dan Aplikasinya*, Jakarta: Penerbit Erlangga, 1999.

“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN A KODE MATLAB

```
Lm = 0.258;
Ls = 0.274 ;
Lr = 0.274;
Rr = 3.805 ;
Rs = 4.85;
P = 4;
J = 0.031;
Ts = 1e-6;

a1 = -(Lm^2*Rr+Lr^2*Rs) / ((Ls*Lr-Lm^2)*Lr) ;
a2 = Lm*Rr / ((Ls*Lr-Lm^2)*Lr);
a3 = P/2*Lm / (Ls*Lr-Lm^2);
a4 = Lr / (Ls*Lr-Lm^2);
a5 = Rr*Lm/Lr;
a6 = -Rr/Lr;

A = [a1*eye(2) a2*eye(2); a5*eye(2) a6*eye(2)];
B = [a4*eye(2); zeros(2)];
C = [eye(2) zeros(2)];
D = [a3*[1 0;0 -1]; P/2*[-1 0;0 1]];

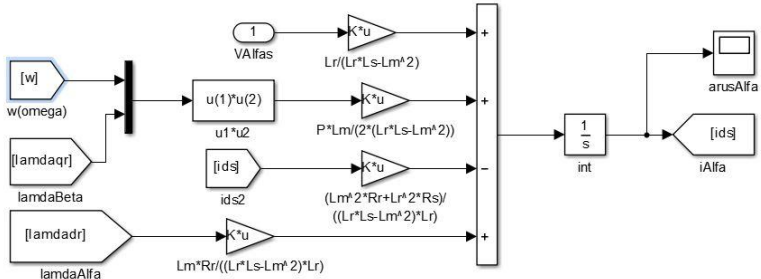
Aa = [A D; zeros(2,4) zeros(2)];
Ba = [B; zeros(2)];
Ca = [C zeros(2); zeros(2,4) eye(2)];
Q = 1e9*eye(6);
R = 1e3*eye(4);
Kp = lqr(Aa',Ca',Q,R);
K = Kp';

K1 = K(1:4,1:2);
K2 = K(1:4,3:4);
K3 = 1;
K4 = K(5:6,1:2);
K5 = 1;
```

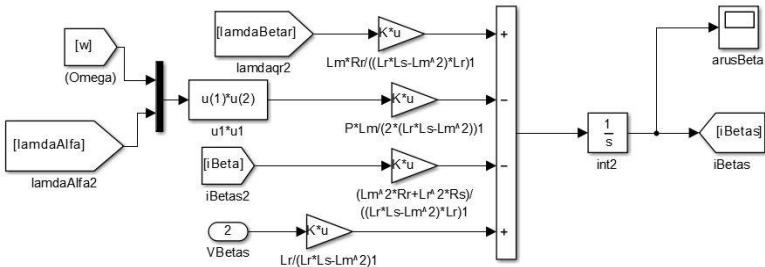
“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN B SIMULINK MATLAB

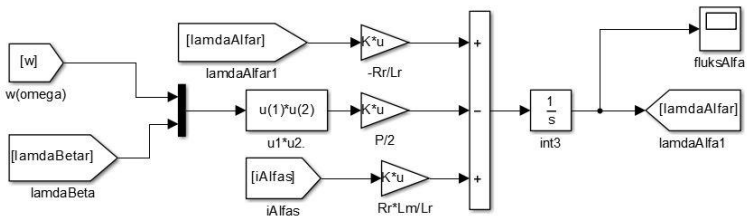
B.1 State Plant Motor Induksi



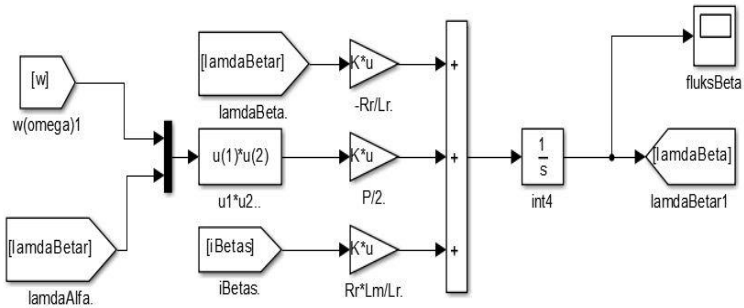
Gambar.1 State Space Arus Alfa



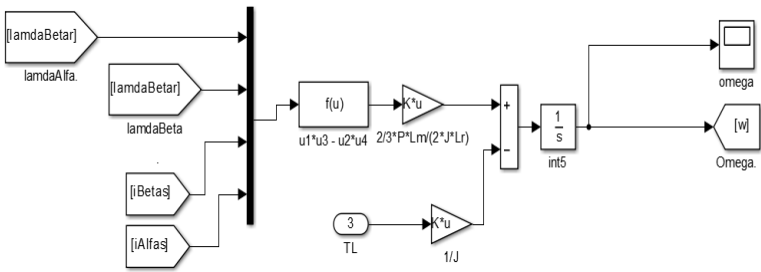
Gambar.2 State Space Arus Beta



Gambar.3 State Space Fluks Alfa

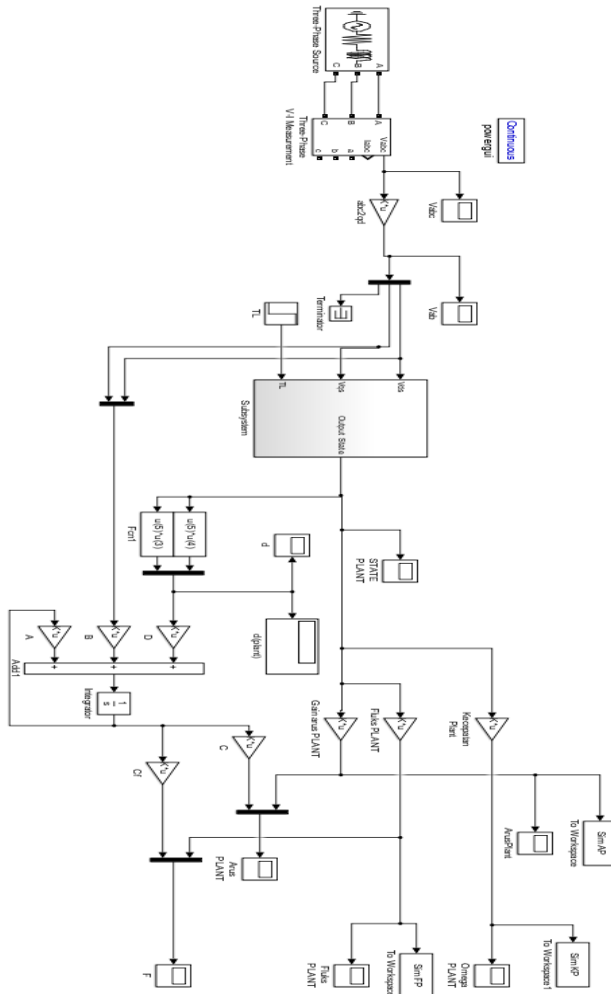


Gambar.4 State Space Fluxes Beta

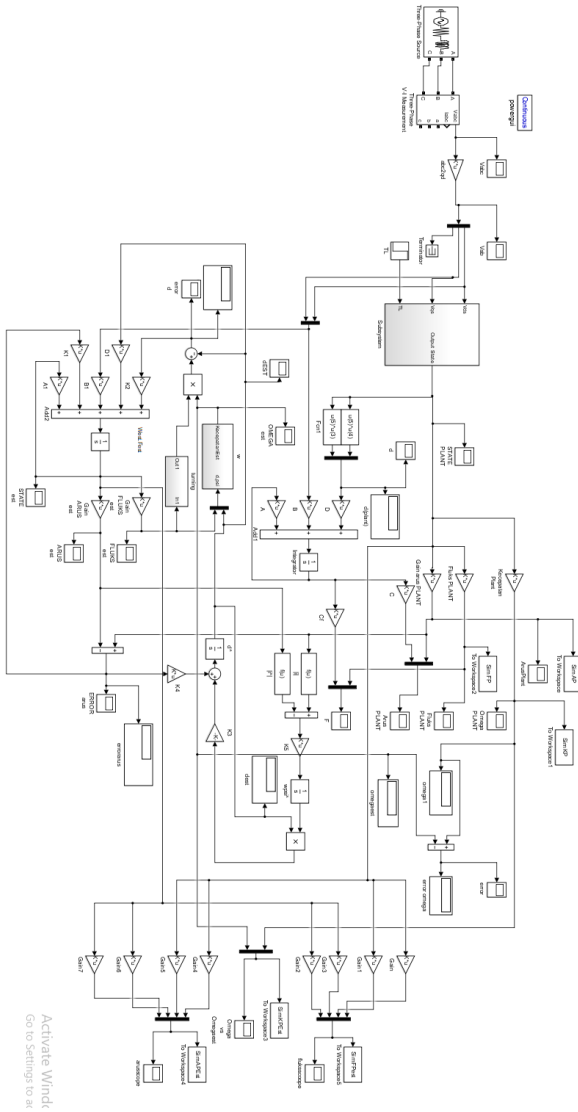


Gambar.4 State Space Omega

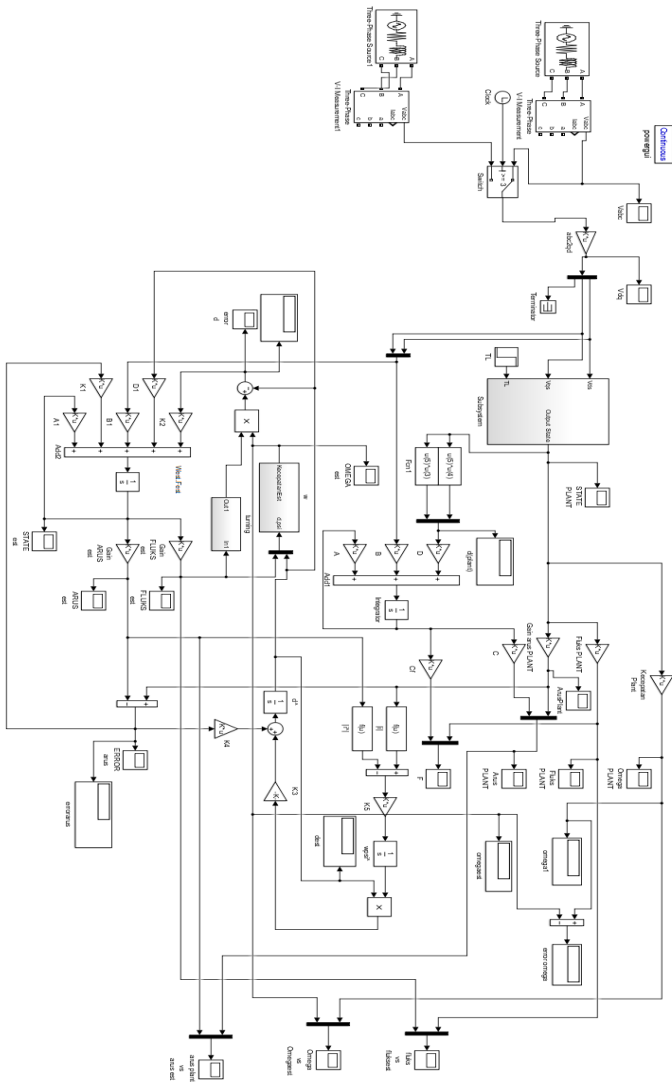
B.2 Plant Motor Induksi yang telah di modifikasi



B.3 Plant Motor Induksi dan Disturbance Observer



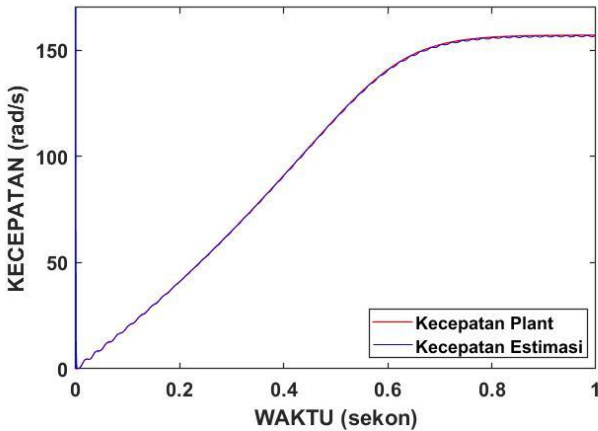
B.4 Pengujian Perubahan Tegangan



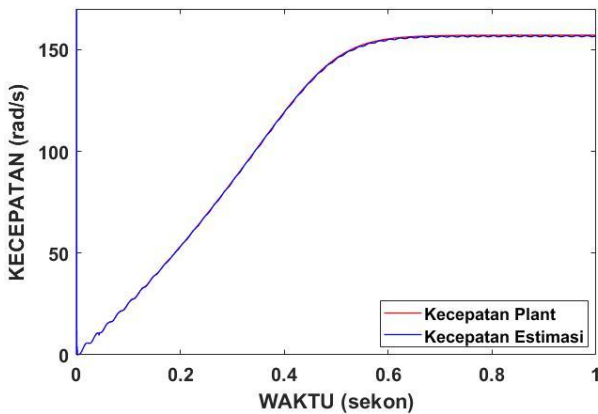
“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN C
RESPON ESTIMASI KECEPATAN MOTOR INDUKSI
***DISTURBANCE OBSERVER* DENGAN VARIASI**
TEGANGAN

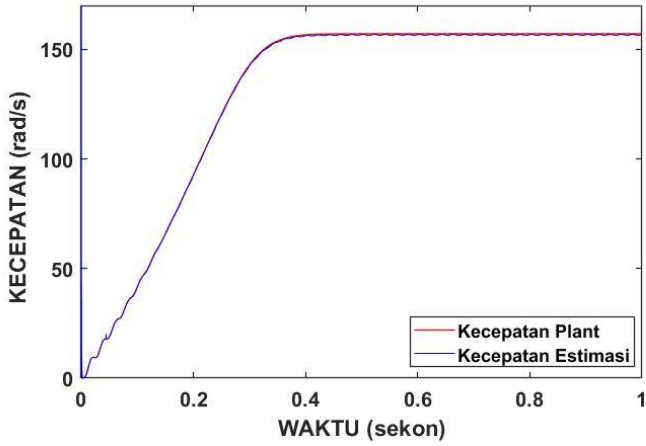
C.1 Hasil Kecepatan estimasi (ω_r) plant dan Estimasi saat Tegangan 263 V



C.2 Hasil Kecepatan estimasi (ω_r) plant dan Estimasi saat Tegangan 296 V



C.3 Hasil Kecepatan estimasi (ω_r) plant dan Estimasi saat Tegangan 378 V



BIODATA PENULIS



Anindya Ayu Pangesti dilahirkan di Madiun, pada tanggal 22 April 1998 sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Palur 01 hingga tahun 2010, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Kebonsari hingga tahun 2013, pendidikan menengah atas di SMAN 1 Geger hingga tahun 2016, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh

Nopember Surabaya hingga saat ini.

Saat ini penulis sedang menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan Estimator Kecepatan Berbasis *Disturbance Observer* Untuk *Speed Sensorless Motor* Induksi Di PT.INKA.** Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: ayupangesti00@gmail.com.

