



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN *PARTICLE FILTER*
UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR*
DI PT. INKA**

DINDA CAHYA FIRDAUSI
NRP. 023116 40000 043

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

**PARTICLE FILTER DESIGN
FOR SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR
IN PT. INKA**

**DINDA CAHYA FIRDAUSI
NRP. 023116 40000 043**

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 System Engineering
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dinda Cahya Firdausi
NRP : 023116 40000 43
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 *PARTICLE FILTER* UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR* DI PT. INKA adalah 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 surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Surabaya, 22 Januari 2020
Yang membuat pernyataan,



Dinda Cahya Firdausi
NRP. 02311640000043

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *PARTICLE FILTER* UNTUK *SPEED
SENSORLESS INDUCTION MOTOR* DI PT INKA**

Oleh:

Dinda Cahya Firdausi
NRP. 0231164000043

Surabaya, 22 Januari 2020
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 sengaja dikosongkan”

PERANCANGAN *PARTICLE FILTER*
UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR*
DI PT INKA

TUGAS AKHIR

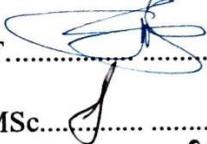
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Dinda Cahya Firdausi

NRP. 0231164000043

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..........(Ketua Penguji)
4. Dr. Ir. Syamsul Arifin, M.T.......... (Penguji I)
5. Detak Yan Pratama, S.T., MSc..........(Penguji III)
6. Moch. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC..........(Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERANCANGAN *PARTICLE FILTER*
UNTUK *SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR*
DI PT. INKA

Nama : Dinda Cahya Firdausi
NRP : 02311640000043
Departemen : Teknik Fisika FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Penggerak utama yang biasanya digunakan pada industri kereta listrik yaitu motor induksi. Pada penelitian ini dikembangkan suatu metode mengenai sistem kerja motor induksi tanpa sensor (*speed sensorless induction motor*) dengan menggunakan *particle filter* (PF) yang mampu mengestimasi kecepatan dan mengetahui performansi estimator kecepatan berbasis PF. Tahapan yang dilakukan adalah pemodelan motor induksi, perancangan dan pengujian PF. Parameter PF yang dibutuhkan antara lain jumlah partikel (N), *initial guess of state value* (x_0), kovarian awal (P_0), kovarian *noise* sistem (R), serta matriks kovarian *noise* pengukuran (R). Pada penelitian ini validasi model dilakukan dengan mengacu saat motor induksi beroperasi *open loop*. Berdasarkan hasil pemodelan, dimana dalam kondisi *steady* didapatkan nilai arus sebesar 4,41 A, nilai fluks sebesar 1,137 Wb, dan kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Sedangkan dari perancangan PF dengan jumlah partikel sebanyak 250 didapatkan nilai RMSE paling kecil, dimana dalam kondisi *steady* didapatkan nilai arus sebesar 4,7 A, nilai fluks sebesar 1,142 Wb, dan kecepatan sebesar 157,08 rad/s. Setelah itu dilakukan pengujian dengan variasi beban, dimana nilai RMSE kecepatan semakin meningkat ketika beban yang diberikan semakin besar. Perbandingan performansi estimasi kecepatan dengan PF maupun EKF didapatkan melalui nilai RMSE. Dalam keadaan motor induksi tanpa beban performansi PF lebih baik dibandingkan EKF. Namun, dalam keadaan motor induksi ada beban performansi EKF lebih baik dibandingkan PF. Selain itu,

kecepatan estimasi dari PF maupun EKF dapat menyesuaikan dengan perubahan tegangan yang ada.

Kata Kunci— Motor induksi, speed sensorless, particle filter

*PARTICLE FILTER DESIGN
FOR SPEED SENSORLESS INDUCTION MOTOR
IN PT. INKA*

Name : Dinda Cahya Firdausi
NRP : 0231164000043
Department : Teknik Fisika FTIRS-ITS
Supervisor : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T
Febry Pandu Wijaya, S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

The main driving force that is usually used in the electric train industry is induction motors. In this research, a method was developing called speed sensorless induction motor with particle filter (PF) that able to estimate the speed and determine the performance of the speed estimator based on the PF. The steps taken are induction motor modeling, design and testing of PF. The required PF parameters include the number of particles (N), initial guess of state value (x_0), initial covariance (P_0), process noise vector covariance (Q), and measurement noise vector covariance matrix (R). In this research, model validation is done by referring to the induction motor operating open loop. Based on the results of modeling, wherein steady conditions are obtained a current value of 4.41 A, a flux value of 1.137 Wb, and a speed of 157.07 rad /s. While from the estimated PF with 250 particles obtained the smallest RMSE value, wherein steady conditions a current value of 4.7 A, flux value of 1.142 Wb, and speed of 157.08 rad/s. After that, the test is done with a variation of the load, where RMSE of speed increases when the load is greater. A comparison of speed estimation performance with PF and EKF is obtained through RMSE values. In a state of induction motor without load, the performance of PF is better than EKF. However, in the state of an induction motor when there is a load of the performance of EKF better than PF. Furthermore, the estimated speed of the PF and EKF can adjust to changes in the existing voltage.

Keywords — Induction motor, speed sensorless, particle filter

“Halaman ini sengaja 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 *Particle Filter* untuk *Speed Sensorless Induction Motor* di PT. INKA”

Ucapan terima kasih juga 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. Bapak Hendra Cordova, S.T., M.T. 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 Joes Hartanto dan Ibu Anis Sadiyah) dan kakak (Mas M. Adhitya Pratama dan Mbak Rafika Suci Mudyanti) serta segenap keluarga atas kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
6. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang minat Rekayasa Instrumentasi.
7. Kepada Anindya Ayu Pangesti, Barakatul Khairat, Nor Indayu, Yoanne Ayuningtyas Sania, dan Yunita Puspita Rini yang telah memberikan dukungan dan semangat tanpa henti
8. Teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa.
9. Seluruh teman-teman angkatan 2016 yang turut memberikan dukungannya
10. 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, 22 Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL.....	xxiii
DAFTAR SIMBOL.....	xxv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Motor Induksi.....	5
2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi.....	8
2.3 Transformasi Clarke.....	9
2.4 Pemodelan Motor Induksi.....	10
2.5 <i>Particle Filter</i>	13
BAB III METODE PENELITIAN.....	17
3.1 Pemodelan Motor Induksi.....	18
3.2 Perancangan <i>Particle Filter</i>	21
3.3 Membandingkan Performansi <i>Particle Filter</i> (PF) dengan <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF).....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Pemodelan Motor Induksi.....	27
4.2 Hasil Perancangan <i>Particle Filter</i> (PF).....	31
4.3 Pengujian Performansi <i>Particle Filter</i> (PF).....	38
4.4 Hasil Pemodelan dengan Perubahan Tegangan.....	43
4.5 Hasil Uji Beban.....	46
4.6 Perbandingan Performansi <i>Particle Filter</i> (PF) dengan <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF).....	56

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN A.....	65
LAMPIRAN B	71
LAMPIRAN C	77
LAMPIRAN D.....	79
BIODATA PENULIS.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Motor Induksi	5
Gambar 2. 2	Bagian - bagian Motor Induksi	6
Gambar 2. 3	Stator Motor Induksi	7
Gambar 2. 4	Rotor Motor Induksi	8
Gambar 2. 5	Transformasi Clarke	9
Gambar 2. 6	Rangkaian Ekivalen Motor Induksi	10
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3. 2	Diagram Blok Sistem	20
Gambar 3. 3	Diagram Blok <i>Particle Filter</i>	23
Gambar 4. 1	Respon Arus Motor Induksi	27
Gambar 4. 2	Respon Fluks Motor Induksi	28
Gambar 4. 3	Respon Kecepatan Motor Induksi	29
Gambar 4. 4	Validasi Bentuk Kontinyu dan Diskrit	30
Gambar 4. 5	Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=100	31
Gambar 4. 6	Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=100	32
Gambar 4. 7	Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=100	32
Gambar 4. 8	Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=250	33
Gambar 4. 9	Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=250	34
Gambar 4. 10	Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=250	35
Gambar 4. 11	Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=500	36
Gambar 4. 12	Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=500	36
Gambar 4. 13	Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat N=500	37
Gambar 4. 14	Autokorelasi Arus saat N=100	39
Gambar 4. 15	Autokorelasi Fluks saat N=100	39
Gambar 4. 16	Autokorelasi Kecepatan saat N=100	40

Gambar 4. 17 Autokorelasi Arus saat $N=250$	40
Gambar 4. 18 Autokorelasi Fluks saat $N=250$	41
Gambar 4. 19 Autokorelasi Kecepatan saat $N=250$	41
Gambar 4. 20 Autokorelasi Arus saat $N=500$	42
Gambar 4. 21 Autokorelasi Fluks saat $N=500$	42
Gambar 4. 22 Autokorelasi Kecepatan saat $N=500$	42
Gambar 4. 23 Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat Terjadi Perubahan Tegangan	43
Gambar 4. 24 Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat Terjadi Perubahan Tegangan	44
Gambar 4. 25 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat Terjadi Perubahan Tegangan.....	45
Gambar 4. 26 Respon Arus Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 1 Nm.....	46
Gambar 4. 27 Respon Fluks Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 1 Nm.....	47
Gambar 4. 28 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 1 Nm.....	48
Gambar 4. 29 Respon Arus Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 3 Nm.....	49
Gambar 4. 30 Respon Fluks riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 3 Nm.....	49
Gambar 4. 31 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 3 Nm.....	50
Gambar 4. 32 Respon Arus Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 6 Nm.....	51
Gambar 4. 33 Respon Fluks Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 6 Nm.....	52
Gambar 4. 34 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 6 Nm.....	52
Gambar 4. 35 Respon Arus Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 10 Nm.....	53
Gambar 4. 36 Respon Fluks Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 10 Nm.....	54
Gambar 4. 37 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 10 Nm.....	55

Gambar 4. 38 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi EKF	56
Gambar 4. 39 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF saat Terjadi Perubahan Tegangan	57
Gambar 4. 40 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 1 Nm.....	58
Gambar 4. 41 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 3 Nm.....	58
Gambar 4. 42 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 6 Nm.....	58
Gambar 4. 43 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 10 Nm.....	59

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Motor Induksi	19
Tabel 3. 2 Parameter <i>Particle Filter</i>	21
Tabel 4. 1 Data Kecepatan Motor <i>Plant</i> dan Pengukuran.....	29
Tabel 4. 2 Data Performansi <i>Particle Filter</i>	38
Tabel 4. 3 Data Kecepatan Motor Estimasi dan Pengukuran.....	39
Tabel 4. 4 Data Performansi <i>Particle Filter</i> Saat Diberi Beban..	56
Tabel 4. 5 Perbandingan RMSE Kecepatan <i>Particle Filter</i> (PF) dengan <i>Extended Kalman Filter</i> (EKF)	59

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL

A_d	= Matriks A dalam bentuk diskrit
B_d	= Matriks B dalam bentuk diskrit
C_d	= Matriks C dalam bentuk diskrit
cs	= <i>Cumulative sum</i> dari w
$i_{\alpha s}$	= Arus stator pada sumbu α
$i_{\beta s}$	= Arus stator pada sumbu β
I	= Matriks identitas
J	= Inersia rotor
L_r	= Induktansi rotor
L_s	= Induktansi stator
L_m	= Induktansi mutual
M	= Panjang vector w
N	= Jumlah partikel
P	= Jumlah pole
P_0	= Kovarian awal
Q	= Kovarian <i>noise</i> sistem
R	= Matriks kovarian <i>noise</i> pengukuran
R_r	= Resistansi rotor
R_s	= Resistansi stator
T_e	= Torsi elektromagnetik
T_l	= Torsi beban
T_s	= <i>Sampling time</i>
u	= Input
$u(j)$	= Sampel acak dari resampling
v	= <i>Noise</i> sistem
V_a	= Tegangan pada sumbu A
V_b	= Tegangan pada sumbu B
V_c	= Tegangan pada sumbu C
V_r	= Tegangan rotor
$V_{\alpha s}$	= Tegangan stator pada sumbu α
$V_{\beta s}$	= Tegangan stator pada sumbu β
w	= <i>Noise</i> pengukuran
x	= <i>State</i>

x_0	= <i>Initial guess of state value</i>
x_{p0}	= Partikel awal
x_p	= <i>Update state</i> x_{p0}
y	= Pengukuran
y_p	= <i>Update</i> pengukuran
$\lambda_{\alpha r}$	= Fluks rotor pada sumbu α
$\lambda_{\beta r}$	= Fluks rotor pada sumbu β
σ	= Koefisien <i>leakage</i>
ω_r	= Kecepatan motor
\tilde{w}	= Bobot
w	= Normalisasi bobot

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor transportasi merupakan salah satu sektor yang penting bagi kegiatan ekonomi masyarakat, hal tersebut karena memberikan dukungan terhadap hampir semua sektor lainnya. Di sisi lain, sektor ini merupakan sektor yang mengkonsumsi bahan bakar minyak (BBM) sangat besar dan secara signifikan memberikan kontribusi terhadap pencemaran udara di kota-kota besar. Saat ini dan ke depan transportasi diarahkan pada moda-moda yang ramah lingkungan. Kereta api merupakan moda dengan konsumsi energi yang efisien per satuan penumpang dan mempunyai gas buang atau polutan yang rendah. Dalam penyelenggaraan perkeretaapian nasional di masa depan harus diwujudkan menjadi *leading transportation mode* khususnya sebagai pembentuk kerangka atau lintas utama transportasi nasional yang mampu menjamin pergerakan orang dan barang di seluruh wilayah Indonesia [1]. Oleh sebab itu perkembangan kereta api ke depan mempunyai prospek yang sangat cerah. Penggunaan energi listrik sebagai pengganti BBM pada teknologi perkeretaapian memberikan terobosan penting dalam mengurangi polusi udara akibat transportasi dan penghematan energi. Penggerak utama yang biasanya digunakan pada industri kereta listrik yaitu motor induksi.

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor listrik, dimana motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dinamakan motor induksi karena adanya arus motor yang terinduksi sebagai akibat dari adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang disebut slip. Motor induksi ini memiliki banyak kelebihan baik dari segi teknis maupun ekonomis, karena itu motor induksi terutama jenis motor induksi tiga fasa banyak digunakan dalam dunia industri seperti industri transportasi. Hal ini dikarenakan motor induksi memiliki

konstruksi sederhana, kokoh, lebih handal, harganya relatif murah, perawatannya mudah, memiliki efisiensi yang tinggi serta dapat diproduksi dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan industri [2].

Pada pengaplikasiannya, motor induksi dituntut beroperasi pada kecepatan tertentu dengan beban yang bervariasi. Untuk keperluan ini, maka digunakan sistem pengendalian kecepatan dengan struktur *feedback*. Dalam hal ini, informasi kecepatan yang akurat diperlukan untuk mewujudkan kinerja tinggi dan kontrol kecepatan presisi tinggi. Secara konvensional, sensor kecepatan langsung, seperti *encoder*, biasanya dipasang ke poros motor untuk mengukur kecepatannya. Penggunaan sensor seperti itu membutuhkan elektronik tambahan, ruang ekstra, perawatan yang sering, pemasangan yang hati-hati yang mengurangi kekuatan dan keandalan *drive* yang melekat serta harganya mahal [3]. Untuk alasan ini, pengembangan metode alternatif tidak langsung menjadi topik penelitian penting. Oleh karena itu, saat ini mulai dikembangkan penelitian tentang motor induksi yang tidak memerlukan sensor kecepatan langsung untuk operasinya atau dikenal sebagai *speed sensorless induction motor*.

Saat motor induksi beroperasi menggunakan teknik *speed sensorless*, sensor kecepatan ditiadakan dan informasi kecepatan didapatkan dari estimasi berdasarkan arus dan tegangan masukan. Estimasi dapat dilakukan dengan menggunakan algoritma yang mampu mengestimasi variabel keadaan sebuah sistem. Salah satu jenis algoritma yang dapat digunakan adalah *particle filter* (PF). *Particle filter* dikenal sebagai *sequential Monte Carlo* yang telah digunakan khususnya dalam beberapa tahun terakhir untuk memperkirakan variabel keadaan sistem nonlinier [4].

Particle filter memperkirakan *posterior probability distribution* oleh set sampel berbobot (partikel). Permasalahan di dunia nyata biasanya melibatkan variabel acak dimensi tinggi dengan ketidakpastian kompleks, estimasi ketidakpastian berbasis non parametrik dan sampel (disediakan oleh PF) dengan demikian menjadi cukup populer mewakili distribusi kompleks di lingkungan non-linear dan mampu bekerja pada saat keadaan

ber-noise [5]. PF memiliki kemampuan untuk mengakomodasi dinamika nonlinier dan multi modal [6]. Oleh karena motor induksi merupakan sistem nonlinier, maka pada penelitian tugas akhir ini dilakukan perancangan *particle filter* untuk *speed sensorless induction motor* yang mampu mengestimasi kecepatan dan mengetahui performansi estimator kecepatan berbasis PF. Adapun performansi estimator kecepatan berbasis *Particle Filter* yang telah dirancang dibandingkan dengan performansi estimator kecepatan berbasis *Extended Kalman Filter* yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [7].

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat diambil permasalahan sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang *particle filter* untuk aplikasi *speed sensorless induction motor* ?
- b. Bagaimana perbandingan performansi *particle filter* dengan *extended kalman filter* saat digunakan sebagai estimator kecepatan?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Merancang sistem *speed sensorless induction motor* dengan metode *particle filter* yang mampu mengestimasi kecepatan dengan menggunakan informasi arus dan tegangan masukan motor induksi
- b. Membandingkan performansi estimator kecepatan berbasis *particle filter* dan *extended kalman filter*

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, yaitu motor induksi 3 fasa jenis AEEBKB dengan kapasitas 1,5 kW dengan empat *pole*.

- b. Validasi model dilakukan dengan mengacu pada hasil pengukuran saat motor induksi beroperasi *open loop*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik (AC) yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Prinsip dari motor induksi adalah mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dinamakan motor induksi karena pada kenyataannya arus motor ini bukan diperoleh dari suatu sumber listrik, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat dari adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang disebut slip. Motor induksi sendiri secara umum dibagi menjadi dua jenis yaitu motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa.

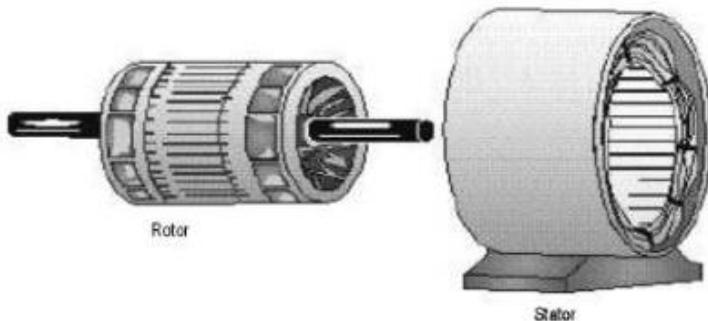


Gambar 2. 1 Motor Induksi [8]

Motor induksi mempunyai banyak kelebihan baik dari segi teknis maupun ekonomis, karena itu motor induksi terutama jenis motor induksi tiga fasa banyak digunakan dalam dunia industri. Kelebihan dari motor induksi antara lain memiliki konstruksi sederhana, kokoh, lebih handal, harganya relatif murah, perawatannya mudah, memiliki efisiensi yang tinggi serta dapat

diproduksi dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan industri. Namun, motor induksi juga memiliki kelemahan yaitu pengaturan motor induksi lebih rumit dari motor DC. Hal ini disebabkan motor induksi memiliki beberapa parameter yang bersifat non-linier, terutama resistansi rotor, yang memiliki nilai bervariasi untuk kondisi operasi yang berbeda. Selain itu, pada motor induksi pengaturan kecepatannya berpengaruh pada efisiensinya dan penambahan beban akan menyebabkan kecepatannya berkurang.

Motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian yang diam, dan rotor sebagai bagian yang berputar sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2.2. Antara bagian stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak yang hanya berkisar dari 0,4 mm sampai 4 mm (disesuaikan dengan daya motor) .



Gambar 2. 2 Bagian - bagian Motor Induksi [9]

2.1.1 Stator

Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lempengan besi (Gambar 2.3.a)). Tiap lempengan besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.3.b)).

Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fasa dimana untuk motor tiga 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 (Gambar 2.3.c)). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa.

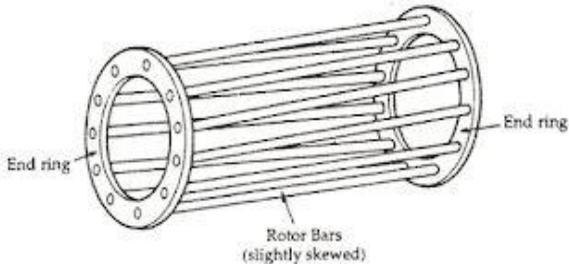


a) Lempengan Inti b) Lempengan Inti dan Kertas Isolasi c) Lempengan Inti dan Belitan stator

Gambar 2. 3 Stator Motor Induksi [10]

2.1.2 Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator yang diinduksikan kepada kumparan rotor. Rotor terdiri dari inti silinder laminasi. Rotor terdiri dari dua macam, yaitu rotor belitan (*wound*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage*), Rotor belitan mempunyai gulungan rotor seperti gulungan stator yang digulung pada silinder inti yang dilaminasi dengan ruang slot yang sama. Terminal dari gulungan tersebut dapat dibawa keluar melalui slip dan brushes. Sedangkan rotor sangkar tupai, rotornya menyerupai sangkar tupai yang tersusun dari batang konduktor yang ujung-ujungnya terhubung dengan cincin penghubung (*shorting rings*). Pada ujung-ujung rotor, konduktor mengalami hubung pendek oleh cincin tembaga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Rotor Motor Induksi [11]

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi

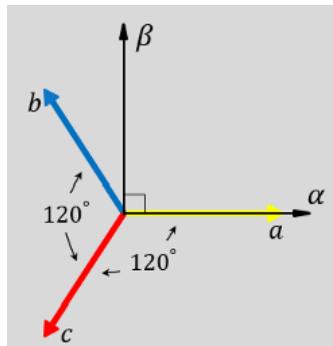
Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Ketika kumparan stator motor induksi tiga fasa dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. Medan putar tersebut kemudian memotong konduktor pada rotor sehingga akan menimbulkan tegangan induksi. Tegangan induksi yang timbul pada kumparan rotor akan menghasilkan arus. Hal ini karena pada rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup. Arus rotor ini berada dalam medan magnet dari stator menurut hukum Lorentz akibatnya timbul torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator.

Tegangan induksi hanya akan terbangkitkan jika terjadi perpotongan antar medan putar dengan konduktor rotor maka kecepatan rotor tidak dapat menyamai kecepatan medan putar stator, harus ada selisih dimana kecepatan rotor (n_r) harus lebih rendah dari kecepatan medan putar (kecepatan sinkron n_s). 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

kutup tertentu. Jumlah kutup ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutup akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putar medan stator dan sebaliknya [7].

2.3 Transformasi Clarke

Pada tugas akhir ini, motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa. Sumber tegangan dapat dimisalkan dengan simbol A-B-C untuk merepresentasikan tiap fasanya. Sistem tiga fasa adalah sistem listrik AC yang menggunakan 3 penghantar yang mempunyai tegangan yang sama namun berbeda dalam sudut fasa sebesar 120° . Namun, untuk merepresentasikan tegangan pada motor induksi, dibutuhkan tegangan yang terpisah oleh sudut fasa sebesar 90° atau yang biasa disebut dengan tegangan ($\alpha\beta$). Oleh karena itu, maka dibutuhkan suatu transformasi untuk mengubah analisis fasor dari bentuk 3D menjadi 2D.



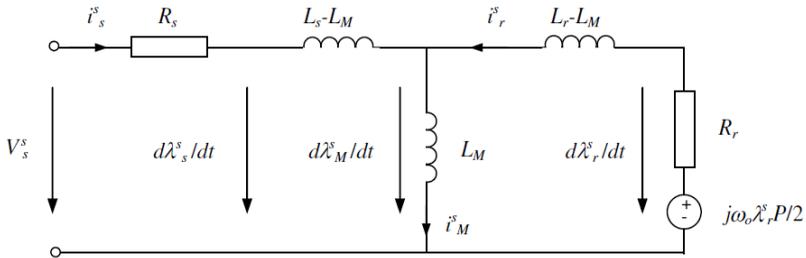
Gambar 2.5 Transformasi Clarke [12]

Untuk mengubah sistem koordinat stasioner tiga fasa (a,b,c) menjadi sistem koordinat dua fasa (α,β), maka diperlukan adanya transformasi Clarke. Sumbu α seperti terlihat pada Gambar 2.5 berhimpitan dengan sumbu a dan sumbu β tertinggal dari sumbu a sebesar $\pi/2$. Sehingga resultan vektor (R) dari transformasi tersebut dapat diperoleh. Adapun persamaan transformasi Clarke ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2.4 Pemodelan Motor Induksi

Pemodelan motor induksi dapat ditinjau dari kerangka acuan stator atau kerangka acuan rotor dan parameter yang digunakan dalam pemodelan bisa berupa arus stator atau arus rotor serta fluks stator dan fluks rotor. Pada tugas akhir ini digunakan pemodelan motor ditinjau dari kerangka acuan stator.



Gambar 2. 6 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi [13]

Pada Gambar 2.6 menunjukkan gambar rangkaian ekivalen dari motor induksi, dimana rangkaian tersebut berguna untuk mendapatkan persamaan yang akan dijadikan pemodelan motor induksi. Untuk mendapatkan persamaan umum dari motor induksi dalam kerangka acuan stator dapat dilihat pada persamaan (2.2) hingga (2.6) persamaan berikut:

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

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

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

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

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

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \lambda_{s\alpha} \quad (2.6)$$

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \lambda_{s\beta} \quad (2.7)$$

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

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

Jika dinyatakan dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\omega_e = 0$) maka persamaan (2.8) menjadi :

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

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

Persamaan (2.4) 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 (2.5) 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 :

$$\frac{d}{dt} \lambda_{r\alpha} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\alpha} - L_m i_{s\alpha}) \right) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.17)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{r\beta} = -R_r \left(\frac{1}{L_r} (\lambda_{r\beta} - L_m i_{s\beta}) \right) - \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.18)$$

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

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} (L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}) \quad (2.19)$$

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\alpha} \quad (2.20)$$

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

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{r\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{s\alpha} \quad (2.21)$$

Lalu persamaan (2.17) disubstitusikan ke persamaan (2.21), maka akan didapatkan persamaan berikut:

$$V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\alpha} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.22)$$

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

$$\frac{d}{dt} i_{s\alpha} = \frac{V_{s\alpha}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r} \right) i_s + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} \omega_r \lambda_{r\beta} \quad (2.23)$$

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

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} (L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}) \quad (2.24)$$

Persamaan (2.26) disubstitusikan pada persamaan (2.24) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\beta} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d}{dt} \lambda_{r\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \frac{d}{dt} i_{s\beta} \quad (2.25)$$

Setelah itu pada persamaan (2.10) disubstitusikan pada persamaan (2.25) sehingga didapatkan persamaan:

$$V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{s\beta} - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{r\beta} - \frac{L_m}{L_r} \frac{P}{2} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.26)$$

Yang terakhir disubstitusikan ke persamaan (2.26) maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{d}{dt} i_{s\beta} = \frac{V_{s\beta}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_s T_r} \right) i_{s\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s T_r} \lambda_{r\beta} + \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} \omega_r \lambda_{r\alpha} \quad (2.27)$$

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 dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{Te - Tl}{J} \quad (2.30)$$

$$Te = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{L_m}{L_r}\right) (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}) \quad (2.31)$$

Sehingga akan didapat nilai berikut:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{L_m}{JL_r}\right) (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}) - \frac{Tl}{J} \quad (2.32)$$

Dari penjabaran di atas, maka akan didapatkan persamaan motor induksi berikut:

$$\frac{d}{dt} i_{s\alpha} = \frac{V_{s\alpha}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{(1-\sigma)}{\sigma T_r}\right) i_{s\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s T_r} \lambda_{r\alpha} + \frac{P L_m \omega_r}{2 \sigma L_r L_s} \lambda_{r\beta} \quad (2.33)$$

$$\frac{d}{dt} i_{s\beta} = \frac{V_{s\beta}}{\sigma L_s} + \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{L_m^2}{\sigma L_r L_s T_r}\right) i_{s\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_r L_s T_r} \lambda_{r\beta} + \frac{P L_m \omega_r}{2 \sigma L_r L_s} \lambda_{r\alpha} \quad (2.34)$$

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

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

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{L_m}{JL_r}\right) (\lambda_{ar} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{as}) - \frac{Tl}{J} \quad (2.37)$$

2.5 Particle Filter

Particle filter merupakan salah satu bagian dari *Bayesian filtering* yang nilai estimasinya berdasarkan metode *Monte Carlo*. Gagasan utamanya adalah mendekati perkiraan distribusi probabilitas *posterior*. Sampel \tilde{x}_t^i disebut juga sebagai partikel. Sehingga partikel menunjukkan kemungkinan nilai \tilde{x}_t^i . Setiap partikel mewakili satu keadaan hipotetis objek, dengan sampling diskrit yang sesuai dengan probabilitas. Beberapa sampel (partikel) dari *state* yang dihasilkan, masing-masing terkait dengan bobot yang mencirikan kualitas suatu partikel tertentu. Estimasi variabel didapatkan dengan menjumlahkan dari semua partikel. Adapun kunci utama dari *particle filter* yaitu merepresentasikan fungsi *posterior density* dari partikel acak untuk menghitung nilai bobot yang akan menentukan nilai dari rata-rata (*mean*) posisi [14].

Terdapat beberapa algoritma untuk menunjukkan *particle filter* dan filter yang sering digunakan adalah *Sequential Importance Resampling* (SIR). Algoritma ini dapat dilakukan secara rekursif dan akan memberikan estimasi optimal dari keadaan saat ini secara berurutan. Filter SIR akan diadopsi sebagai

algoritma dasar untuk melakukan pemfilteran nonlinier [15]. Secara rinci, dapat memperkirakan sistem *state vector* menggunakan algoritma ini pada waktu nT . Adapun langkah – langkah pada *particle filter* adalah sebagai berikut [16]:

1. Inisialisasi

Pada tahap ini dilakukan inisialisasi parameter *particle filter*. Selain itu, pada awal iterasi terdapat sekelompok sampel (partikel) yang akan di distribusikan secara acak dan ditentukan bobotnya berdasarkan distribusi tertentu. Dimana diasumsikan terdapat partikel acak $\{x_{p0}^i\}_{i=1}^N \sim p(x_0)$, $i = 1, \dots, N$, dimana N menunjukkan jumlah partikel dengan $t: = 1$.

2. Update partikel

Update partikel dilakukan untuk membuat set partikel transisi baru. Nilai partikel selanjutnya didapatkan dengan cara mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai partikel sebelumnya. Sejumlah N partikel baru dibangkitkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$x_p^i \sim p(x_t | x_{t-1}^i), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.38)$$

Kemudian untuk $i = 1, \dots, N$, evaluasi bobot partikel berdasarkan persamaan berikut:

$$\tilde{w}_t^i = p(y_t | x_p^i) \quad (2.39)$$

Selanjutnya, nilai bobot yang baru dinormalisasikan berdasarkan total seluruh bobot saat ini. Bobot dinormalisasi oleh persamaan berikut:

$$w_t^i = \frac{\tilde{w}_t^i}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}_t^i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.40)$$

3. Resampling partikel

Setelah dilakukan pembobotan maka dilakukan resampling untuk menghindari degenerasi partikel yang tidak terpakai. Resampling dilakukan dengan membangkitkan sekumpulan partikel baru berdasarkan bobotnya. Pada proses resampling,

partikel dengan bobot yang besar ada kemungkinan terpilih beberapa kali sehingga ada beberapa partikel yang berbeda menempati posisi yang sama. Sedangkan, partikel yang memiliki bobot yang relatif rendah akan hilang dengan sendirinya. Untuk setiap $i = 1, \dots, N$, resampling partikel baru x_t^i sesuai dengan bobot partikel, dimana:

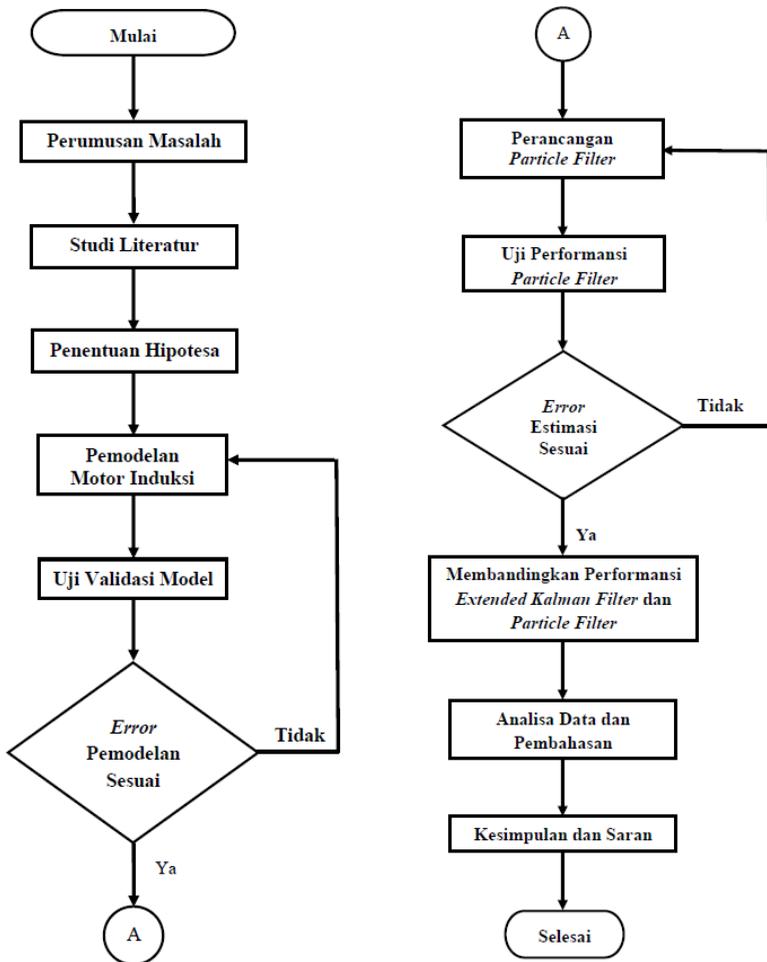
$$P(x_t^i = x_t^k) = w_t^k, \quad k = 1, \dots, N \quad (2.41)$$

Kemudian kembali ke langkah 2.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

Secara keseluruhan metode penelitian Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Pemodelan Motor Induksi

Setelah perumusan masalah, studi literatur, dan penentuan hipotesa, maka langkah selanjutnya adalah pemodelan motor induksi. Untuk memudahkan pemodelan pada simulasi MATLAB, maka persamaan differensial pada bab 2 diubah menjadi persamaan *state space*. Adapun bentuk umum dari persamaan *state space* adalah sebagai berikut:

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

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

Motor induksi adalah *plant* nonlinier, dimana persamaan motor induksi dari (2.33) sampai (2.37) apabila diubah menjadi bentuk matriks *state space* akan berubah menjadi sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -A_{11} & 0 & A_{13} & A_{14} & 0 \\ 0 & -A_{22} & -A_{23} & A_{24} & 0 \\ A_{31} & 0 & -A_{33} & -P * \omega_r / 2 & 0 \\ 0 & A_{42} & -P * \omega_r / 2 & -A_{44} & 0 \\ -A_{51} * \lambda_{\beta r} & A_{52} * \lambda_{\alpha r} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ 0 & B_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$D = [0] \quad (3.6)$$

Sehingga didapatkan matriks $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{m \times n}$, $x \in R^{n \times o}$ serta $u \in R^{m \times o}$ dengan n adalah 5, m adalah 2, dan o adalah 1.

Dimana:

$$x = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \\ \omega_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_{11} = A_{22} = \frac{Lm^2 Rr + Lr^2 Rs}{\sigma Lr^2 Ls} \quad (3.9)$$

$$A_{13} = A_{24} = \frac{LmRr}{\sigma Lr^2 Ls} \quad (3.10)$$

$$A_{14} = A_{23} = \frac{P Lm \omega r}{2\sigma Lr Ls} \quad (3.11)$$

$$A_{31} = A_{42} = \frac{LmRr}{Lr} \quad (3.12)$$

$$A_{33} = A_{44} = \frac{Rr}{Lr} \quad (3.13)$$

$$A_{51} = A_{52} = \frac{2 P Lm}{3 2 J Lr} \quad (3.14)$$

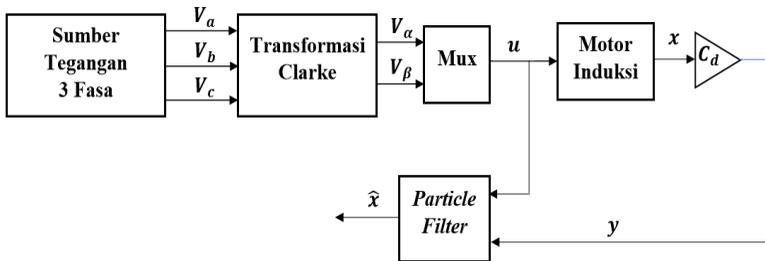
$$\sigma = 1 - \frac{Lm^2}{Lr Ls} \quad (3.15)$$

$$B_{11} = B_{22} = \frac{1}{\sigma Ls} \quad (3.16)$$

Dari persamaan *state space* di atas diketahui bahwa variabel *state* dari motor induksi ini terdiri dari 5 yaitu $i_{\alpha s}$, $i_{\beta s}$, $\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$, dan ω_r serta tegangan $\alpha\beta$ sebagai masukan. Sedangkan *state* yang akan dibandingkan dengan *plant* motor induksi hanya *state* $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ saja. Dari pemodelan motor induksi ini akan dihasilkan respon kontinyu. Adapun penggunaan parameter seperti pada Tabel 3.1 dikarenakan parameter pada jurnal [17] mempunyai empat *pole*, kapasitas sebesar 1.5kW, dan frekuensi 50 Hz dimana sama dengan motor induksi yang digunakan di PT.INKA. Adapun parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Parameter Motor Induksi

No	Nama	Nilai
1.	Induktansi Mutuall (L_m)	0,258 H
2.	Induktansi Stator (L_s)	0,274 H
3.	Induktansi Rotor (L_r)	0,274 H
4.	Resistansi Stator (R_s)	4,85 Ω
5.	Resistansi Rotor (R_r)	3,805 Ω
6.	Inersia (J)	0,031
7.	<i>Pole</i> (P)	4
8.	<i>Sampling Time</i> (T_s)	10^{-6} s



Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem

Dari Gambar 3.2 dapat dilihat bahwa sumber tegangan yang diberikan pada statornya merupakan sumber tegangan tiga fasa bolak-balik yang berbeda fasa 120° dan akan menghasilkan tegangan tiga fasa (V_a, V_b , dan V_c). Untuk mempermudah analisa dan perhitungan maka digunakan suatu metode yang akan mengubah tegangan tiga fasa menjadi dua fasa yaitu transformasi Clarke. Transformasi Clarke mengubah tegangan tiga fasa (V_a, V_b , dan V_c) ke dalam dua fasa diam yaitu sumbu $\alpha\beta$. Tegangan $\alpha\beta$ sebagai input u bagi motor induksi. Dari pemodelan motor induksi menghasilkan 5 variabel *state* x yaitu $i_{\alpha s}$, $i_{\beta s}$, $\lambda_{\alpha r}$, $\lambda_{\beta r}$, dan ω_r . *Output state* x dihubungkan dengan gain matriks keluaran C_d , sehingga menghasilkan y . Selanjutnya tegangan $\alpha\beta$ (u) dan y menjadi masukan bagi *particle filter*. Dari *particle filter* menghasilkan estimasi \hat{x} .

Pada *particle filter* diperlukan *input* dalam bentuk diskrit, sehingga perlu dilakukan pendiskritan dari pemodelan motor induksi. Setelah diubah dalam bentuk diskrit, maka selanjutnya dilakukan uji validasi. Pengujian validasi model dilakukan dengan membandingkan respon motor induksi sebagai *plant* yang kontinyu dengan respon dari persamaan yang telah diubah menjadi diskrit. Apabila perbandingan respon $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ dari motor induksi sebagai *plant* yang kontinyu dan respon dari persamaan yang diskrit memiliki *error* yang kecil maka dapat dikatakan bahwa validasi sudah menunjukkan hasil yang benar. Hal tersebut menandakan bahwa *tracking* arus antar keduanya sudah sesuai. Sehingga dapat dilanjutkan dengan perancangan *particle filter*.

3.2 Perancangan *Particle Filter*

Perancangan *particle filter* digunakan untuk mengestimasi kecepatan pada motor induksi, dengan input berupa arus dan tegangan. Pada algoritma *particle filter* akan terjadi perubahan bentuk domain kontinyu menjadi bentuk domain diskrit. Dengan menggunakan bentuk diskrit tersebut, maka selanjutnya langkah-langkah dari algoritma PF (*Particle Filter*) adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi partikel

Pada tahap ini dilakukan inisialisasi variabel – variabel seperti ditunjukkan pada pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Parameter *Particle Filter*

No	Nama	Nilai
1.	Jumlah Partikel (N)	100; 250; 500
2.	<i>Initial guess of state value</i> (x_0)	[0; 0; 0; 0; 0]
3.	Kovarian awal (P_0)	I_5
4.	Kovarian <i>noise</i> sistem (Q)	0.0000001
5.	Matriks kovarian <i>noise</i> pengukuran (R)	[0,5 ² 0; 0 0,5 ²]

Selain itu, partikel diinisialisasi secara acak berdasarkan distribusi normal atau distribusi gaussian dengan bobot merata. Inisialisasi partikel awal dilakukan dengan cara membangkitkan sejumlah N partikel. Untuk $i = 1, \dots, N$:

$$x_{p0}(i) = x_0(i) + p, \quad p \sim \mathcal{N}(0, P_0) \quad (3.17)$$

2. Update partikel

Particle filter merupakan persamaan stokastik yang memiliki input probabilistik (*random*) dan menghasilkan *output* yang *random* pula. Update partikel dilakukan untuk membuat set partikel transisi baru dengan cara mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai partikel sebelumnya, dimana update dilakukan pada state x , pengukuran y , dan bobot. Untuk $i = 1, \dots, N$, maka:

$$x_p(i) = A_d x(i) + B_d \cdot u \cdot w, \quad w \sim \mathcal{N}(0, Q) \quad (3.18)$$

$$y_p(i) = C_d x_p(i) \quad (3.19)$$

Kemudian update bobot partikel, bobot didasarkan pada probabilitas pengamatan yang diberikan untuk suatu partikel. Hal tersebut menunjukkan *error* antara hasil pengukuran aktual (y) dengan y_p dengan persamaan sebagai berikut:

$$\tilde{w}(i) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - y_p(i)}{R} \right)^2} \quad (3.20)$$

Dimana:

$$y = C_d x + v, \quad v \sim \mathcal{N}(0, R) \quad (3.21)$$

Selanjutnya bobot dinormalisasi berdasarkan total seluruh bobot saat ini dengan menggunakan persamaan berikut:

$$w(i) = \frac{\tilde{w}(i)}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}(i)} \quad (3.22)$$

Setelah itu dilakukan estimasi, dimana estimasi pada *particle filter* merupakan nilai rata – rata dari nilai seluruh partikel berdasarkan setiap bobotnya. Nilai estimasi tersebut didapatkan pada saat proses resampling berhenti. Oleh karena itu, nilai estimasi didapatkan dengan menjumlahkan semua perkalian partikel dengan bobotnya masing – masing dengan persamaan berikut:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^N w(i) \cdot x_p(i) \quad (3.23)$$

3. Resampling partikel

Proses resampling bertujuan untuk menghilangkan partikel dengan bobot yang rendah. Resampling partikel baru sesuai dengan bobot partikel. Jika mengambil sampel secara acak dari distribusi ini, maka dapat memilih nilai berdasarkan probabilitas statistik yang ada, dan dengan demikian, secara rata-rata, memilih nilai dengan bobot yang lebih (probabilitas lebih tinggi). Resampling dilakukan dengan membandingkan nilai $cs(k)$ dengan sampel acak $u(j)$. Nilai $cs(k)$ merupakan *cumulative sum* w pada indeks ke- k dan didapatkan melalui persamaan berikut:

$$cs(k) = cs(k - 1) + (k) \quad (3.24)$$

Sedangkan sampel acak $u(j)$ dengan distribusi uniform diketahui melalui persamaan berikut:

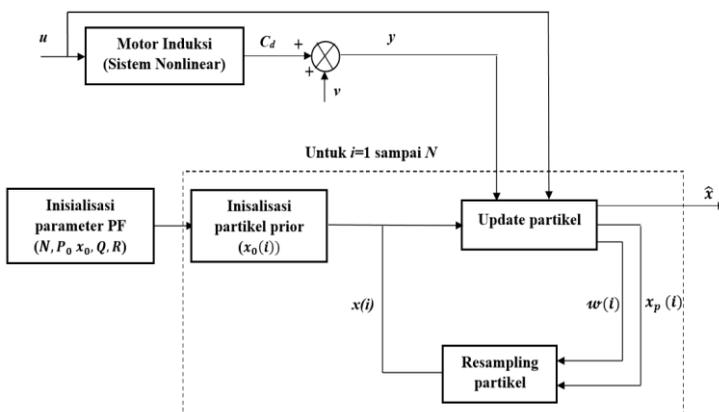
$$u(j) = \frac{(j-1) + \tilde{u}}{M}, \quad \tilde{u} \sim \mathcal{U}(0,1) \quad (3.25)$$

Dengan M merupakan panjang vektor w . Apabila nilai $cs(k)$ kurang dari sampel acak $u(j)$ maka akan *looping* ke persamaan (3.24) dengan nilai k selanjutnya. Namun, apabila nilai $cs(k)$ lebih besar dari sampel acak $u(j)$ maka menghasilkan output berupa suatu indeks k . Indeks tersebut digunakan untuk memilih partikel yang akan diestimasi. Apabila indeks j kurang dari M , maka akan kembali ke persamaan (3.25) dengan nilai j selanjutnya. Proses resampling akan berhenti saat indeks j sama dengan M . Sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$x(i) = x_p(k) \quad (3.26)$$

Dari persamaan (3.26) diketahui bahwa partikel $x(i)$ merupakan partikel x_p pada indeks ke- k . Kemudian kembali ke langkah 2 untuk setiap iterasi, dimana $x(i)$ menjadi masukan untuk proses update partikel.

Adapun diagram blok dari *particle filter* dapat dilihat pada gambar sebagaimana berikut:



Gambar 3. 3 Diagram Blok *Particle Filter*

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja atau performansi dari *speed sensorless induction motor* dengan *particle filter*. Pengujian pada *particle filter* dilakukan dengan cara membandingkan *output* motor induksi yang telah didapatkan dari hasil pemodelan dengan hasil estimasi motor induksi menggunakan *particle filter*. Adapun perbandingan antar keduanya dianalisa dengan menggunakan RMSE (*root mean square error*). RMSE adalah akar rata – rata total kuadrat *error* yang terjadi antara output model dan output estimasi. Output estimasi PF akan semakin baik apabila mempunyai nilai RMSE yang kecil. Selain itu, performansi dari *particle filter* dianalisa dengan menggunakan autokorelasi. Autokorelasi dimaksudkan untuk mengetahui ada tidaknya hubungan antara hasil pemodelan *plant* dengan hasil estimasi *particle filter* berdasarkan *error* yang ada.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang *speed sensorless induction motor*. Sehingga, analisa terhadap estimasi kecepatan menjadi fokus utama. Semakin kecil nilai RMSE, maka model estimasi yang dipakai memiliki akurasi yang semakin baik. Jumlah partikel dengan RMSE terkecil selanjutnya akan digunakan untuk pengujian dengan perubahan tegangan dan penambahan beban. Perubahan tegangan ini dilakukan dengan *switch* input tegangan yang masuk, dimana pada awalnya diberikan tegangan sebesar 163 volt kemudian setelah waktu tertentu diberikan tegangan sebesar 380 volt. Sedangkan variasi beban yang digunakan dalam uji penambahan beban adalah 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm, dan 10 Nm.

3.3 Membandingkan Performansi *Particle Filter* (PF) dengan *Extended Kalman Filter* (EKF)

Setelah dilakukan pengujian, maka selanjutnya analisa perbandingan performansi kecepatan hasil estimasi *particle filter* dengan *extended kalman filter*. Adapun performansi dari *extended kalman filter* didapatkan dari hasil penelitian sebelumnya. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan tegangan masukan sebesar 380 volt. Pengujian dilakukan berdasarkan keadaan motor induksi tanpa beban dan ada beban. Perbandingan performansi

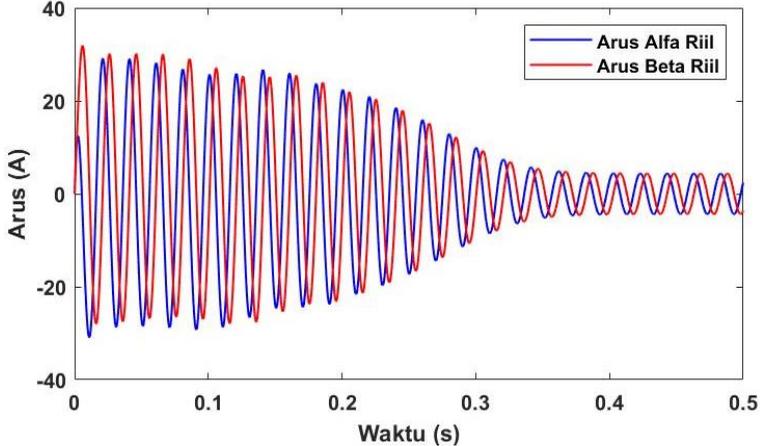
dalam keadaan normal dilakukan pada saat motor induksi tanpa beban. Selain itu, juga membandingkan performansinya ketika diberikan perubahan tegangan dari 163 volt menjadi 380 volt. Kemudian dilakukan perbandingan dengan uji variasi beban dan beban yang digunakan adalah 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm, dan 10 Nm. Perbandingan tersebut dilakukan dengan membandingkan nilai RMSE (*root mean square error*) antar keduanya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pemodelan Motor Induksi

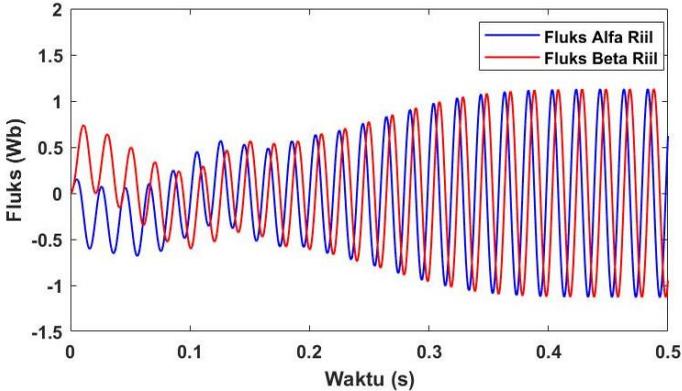
Dari hasil pemodelan motor induksi yang telah dilakukan pada *software* MATLAB 2019a, maka didapatkan nilai arus, fluks dan kecepatan. Adapun dari pemodelan ini, maka didapatkan respon sebagaimana berikut:



Gambar 4. 1 Respon Arus Motor Induksi

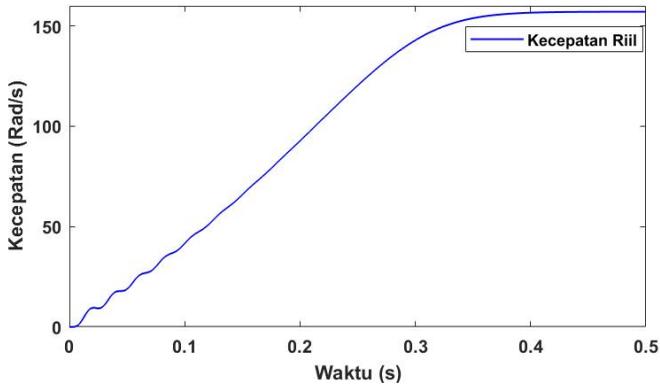
Berdasarkan pemodelan motor induksi yang telah dilakukan, maka diketahui bahwa output dari motor induksi berada pada sumbu $\alpha\beta$. Adapun keluaran *plant* motor induksi dari *state* pertama dan kedua adalah nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$). Dari Gambar 4.1 didapatkan hasil bahwa pada awalnya arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Perubahan nilai terjadi pada waktu 0 detik hingga 0,35 detik, setelah 0,35 detik perlahan arus mulai mencapai keadaan *steady*. Dapat dilihat pada Gambar 4.1 bahwa arus $i_{\alpha s}$ mengalami penurunan arus dari sebesar 29 A menjadi 5 A selama 0,35 detik, kemudian respon dalam keadaan *steady* pada nilai *peak* sebesar 4,41 A. Sedangkan arus $i_{\beta s}$ mengalami kondisi *transien* dari 32 A

menjadi 5 A selama 0,35 detik dan kemudian respon dalam keadaan *steady* pada nilai *peak* sebesar 4,41 A.



Gambar 4. 2 Respon Fluks Motor Induksi

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap keluaran *plant* motor induksi dari *state* ketiga dan keempat yaitu nilai fluks dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$). Sama halnya dengan nilai arus, dari Gambar 4.2 juga didapatkan hasil bahwa pada awalnya fluks mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai $\lambda_{\alpha r}$ mengalami kenaikan hingga mencapai nilai 0,575 Wb pada saat 0,125 detik. Kemudian turun hingga 0,493 Wb pada saat 0,165 detik dan perlahan naik hingga mencapai keadaan *steady* setelah 0,35 detik dengan nilai *peak* sebesar 1,1369 Wb. Sedangkan $\lambda_{\beta r}$ mengalami kenaikan dari kondisi 0 menuju ke 0,74 Wb pada 0,01 detik, kemudian turun hingga 0,3 Wb pada saat 0,11 detik. Kemudian mengalami kenaikan dan setelah 0,35 detik perlahan mulai mencapai keadaan *steady* pada nilai *peak* sebesar 1,137 Wb. Pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, ditunjukkan bahwa baik respon arus maupun respon fluks mengalami kondisi transien hingga 0,35 detik. Saat respon arus mulai dalam keadaan *steady*, respon fluks juga menunjukkan kondisi *steady*. Hal ini tersebut menunjukkan bahwa arus dan fluks saling berhubungan satu sama lain.



Gambar 4. 3 Respon Kecepatan Motor Induksi

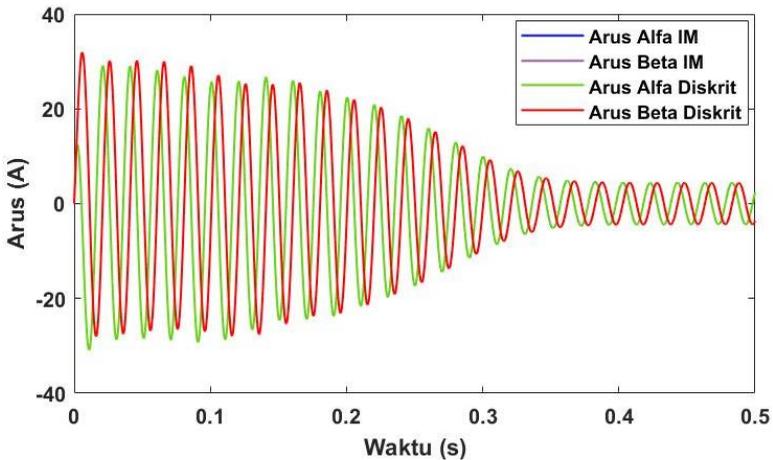
Selain itu, didapatkan keluaran motor induksi berupa nilai kecepatan. Pada gambar 4.3 ditunjukkan bahwa pada awalnya kecepatan mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Kecepatan motor induksi mengalami kenaikan mulai dari 0 detik hingga 0.35 detik dan setelah itu kecepatan mulai berada pada keadaan *steady*. Dimana kecepatan putar motor induksi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s.

Kemudian dilakukan variasi tegangan pada kecepatan motor induksi (ω_r) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Setelah diketahui kecepatan motor (ω_r) dari *plant*, nilai kecepatan motor (ω_r) *plant* tersebut akan dibandingkan dengan nilai kecepatan motor (ω_r) hasil pengukuran berdasarkan penelitian sebelumnya [18], dan diperoleh rata rata error sebesar 0,076% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Kecepatan Motor *Plant* dan Pengukuran

No	Tegangan (V)	ω_r Plant (rad/s)	ω_r Pengukuran (rad/s)	Error (%)
1	263	157,03	156,9	0,082
2	296	157,06	157,07	0,006
3	378	157,08	157,3	0,14
Rata – rata				0,076

Dari hasil pemodelan motor induksi didapatkan respon yang kontinu. Sedangkan dalam pemodelan *particle filter* dibutuhkan input berupa respon diskrit. Sehingga perlu dilakukan validasi dengan membandingkan respon motor induksi sebagai *plant* yang kontinu dengan respon dari persamaan yang telah diubah menjadi diskrit.



Gambar 4. 4 Validasi Bentuk Kontinu dan Diskrit

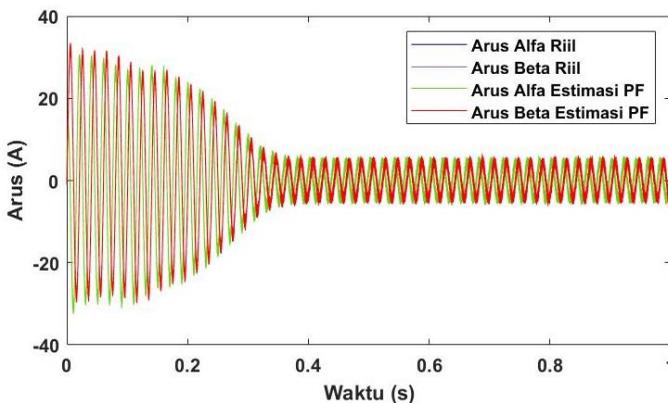
Validasi ini dilakukan dengan membandingkan respon kontinu dan diskrit dari $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$. Hal ini untuk mengetahui *tracking* arus motor induksi antar keduanya, dimana respon kontinu dapat sejalan dengan respon dari bentuk diskrit. Dari Gambar 4.4 diketahui bahwa $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ hasil pemodelan motor induksi yang kontinu sama besar respon dari persamaan yang diskrit. Dimana keduanya mengalami perubahan nilai pada waktu 0 detik hingga 0,35 detik dan setelah 0,35 detik perlahan arus mulai mencapai keadaan *steady*. Dalam keadaan *steady* didapatkan nilai arus *peak* sebesar 4,41 A. Sehingga validasi dinyatakan benar karena persamaan arus pada pemodelan motor induksi dan juga output dari diskrit berjalan satu fasa dan satu *amplitude*.

4.2 Hasil Perancangan *Particle Filter* (PF)

Pada tugas akhir ini dilakukan variasi terhadap jumlah partikel yaitu 100, 250, dan 500.

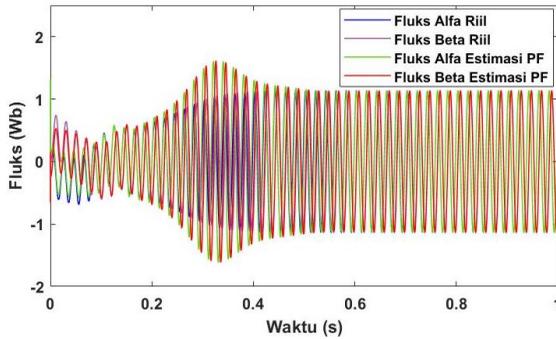
4.2.1 *Particle Filter* dengan Jumlah Partikel 100

Adapun dari perancangan *particle filter* dengan jumlah partikel 100, maka didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.5 sampai Gambar 4.7 berikut:



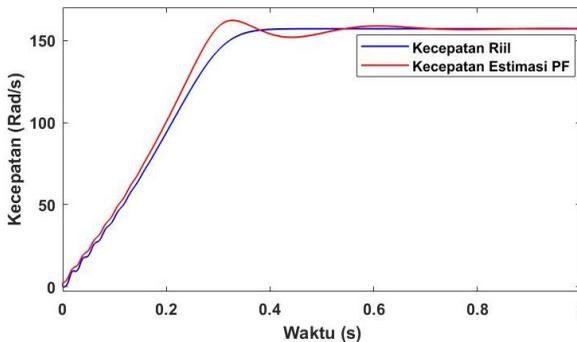
Gambar 4.5 Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=100$

Adapun keluaran *plant* motor induksi dari *state* pertama dan kedua adalah nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$). Dari Gambar 4.5 diketahui bahwa respon arus hasil pemodelan (riil) maupun hasil estimasi saling berhimpitan. Pada awalnya respon arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) sebelum mencapai keadaan *steady*. Perubahan nilai tersebut terjadi hingga 0,35 detik, setelah 0,35 detik perlahan arus mulai berada pada kondisi *steady*. Secara lebih detail, terdapat perbedaan nilai antara arus riil dengan hasil estimasi. Dimana nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,41 A. Sedangkan nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 5,03 A.



Gambar 4. 6 Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=100$

Adapun keluaran *plant* motor induksi dari *state* ketiga dan keempat yaitu nilai fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$). Dari Gambar 4.6 tampak perbandingan antara respon fluks hasil pemodelan dan estimasi, dimana keduanya sama - sama mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada awalnya terdapat perbedaan nilai diantara keduanya hingga 0,5 detik. Setelah itu respon fluks riil dan estimasi saling berhimpitan serta nilai fluks perlahan mulai mencapai keadaan *steady*. Dari gambar tersebut didapatkan nilai fluks riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb. Sedangkan nilai fluks hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,14 Wb.

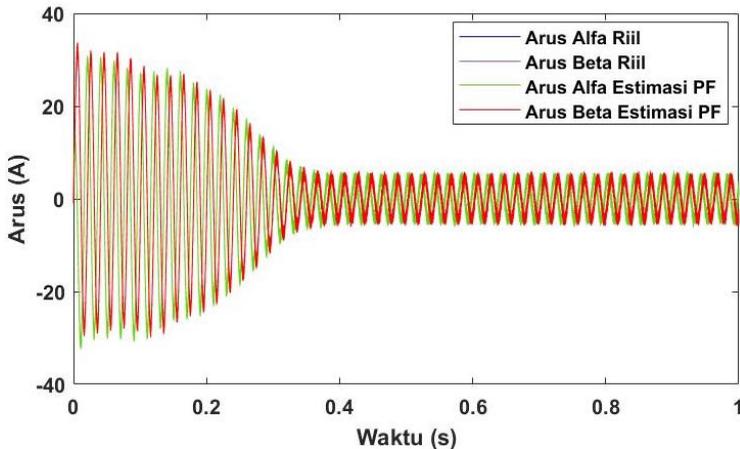


Gambar 4. 7 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=100$

Dari Gambar 4.7 dapat dilihat perbandingan nilai kecepatan hasil pemodelan motor induksi dan estimasi yang dihasilkan oleh *particle filter*. Pada awalnya keduanya mengalami kenaikan nilai kecepatan terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Respon kecepatan hasil pemodelan perlahan mencapai kondisi *steady* setelah 0,35 detik, sedangkan hasil estimasi menunjukkan adanya perbedaan dimana terdapat osilasi terlebih dahulu hingga 0,55 detik. Setelah itu respon keduanya saling berhimpitan. Dimana kecepatan motor induksi riil berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s, sedangkan kecepatan hasil estimasi *particle filter* berada dalam keadaan *steady* pada nilai 157,16 rad/s.

4.2.2 Particle Filter dengan Jumlah Partikel 250

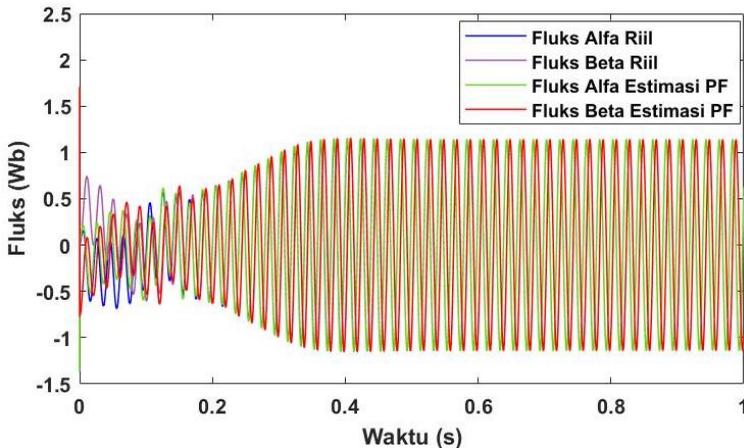
Adapun dari perancangan *particle filter* dengan jumlah partikel 250, maka didapatkan respon arus, fluks, dan kecepatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.8 sampai Gambar 4.10 berikut:



Gambar 4. 8 Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=250$

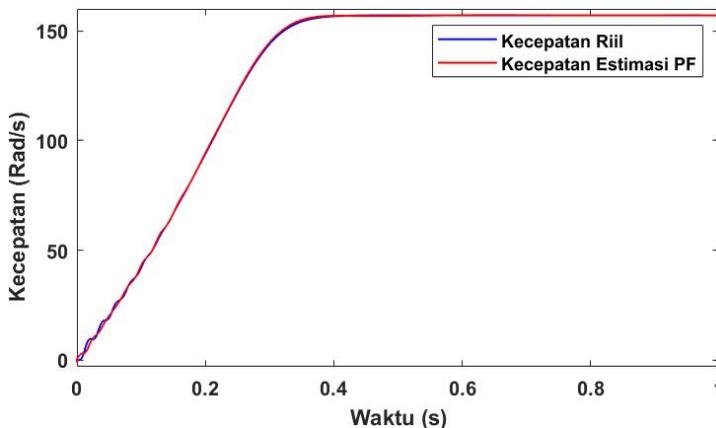
Pada Gambar 4.8 di atas dapat dilihat bahwa respon arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil maupun hasil estimasi saling berhimpitan. Pada

awalnya arus mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Setelah 0,35 detik perlahan arus mulai mencapai keadaan *steady*. Apabila diamati secara lebih detail, diketahui bahwa terdapat perbedaan nilai arus riil dan hasil estimasi. Dimana nilai arus riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,41 A. Sedangkan nilai arus hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,7 A.



Gambar 4. 9 Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=250$

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap keluaran *plant* motor induksi dari *state* ketiga dan keempat yaitu nilai fluks (λ_{ar} dan $\lambda_{\beta r}$). Pada Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa pada awalnya nilai fluks riil dan estimasi terdapat perbedaan hingga detik ke 0,2. Kemudian respon fluks hasil pemodelan maupun hasil estimasi saling berhimpitan, dimana keduanya sama-sama mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Setelah 0,35 detik perlahan fluks mulai mencapai keadaan *steady*. Secara detail didapatkan nilai fluks riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb. Sedangkan nilai fluks hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,142 Wb.

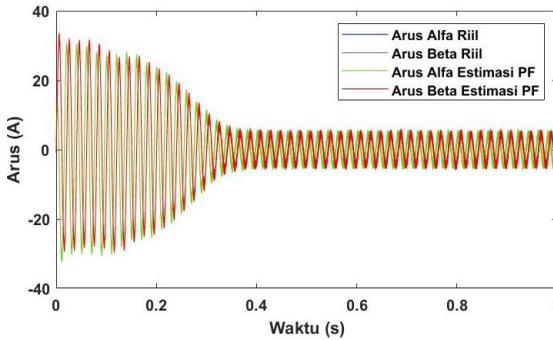


Gambar 4. 10 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=250$

Gambar 4.10 menunjukkan respon kecepatan motor induksi riil (hasil pemodelan) dan estimasi dengan menggunakan *particle filter* saat diberikan input tegangan sebesar 380 volt. Dari gambar tersebut diketahui bahwa perbandingan nilai antara *output* pemodelan motor induksi dan estimasi yang dihasilkan oleh *particle filter* sudah dalam keadaan yang sesuai. Pada awalnya keduanya mengalami perubahan nilai kecepatan terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Kecepatan motor induksi keduanya mengalami kenaikan mulai dari 0 detik hingga 0,35 detik dan setelah itu kecepatan mulai berada pada keadaan *steady*. Dimana kecepatan putar motor induksi hasil pemodelan berada dalam keadaan *steady* di nilai 157,07 rad/s, sedangkan hasil estimasi *particle filter* berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,08 rad/s.

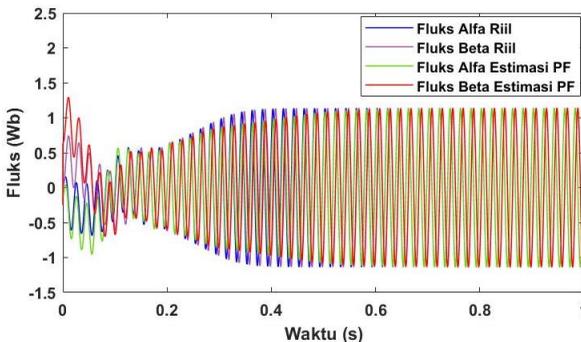
4.2.3 *Particle Filter* dengan Jumlah Partikel 500

Adapun dari perancangan *particle filter* dengan jumlah partikel 500, maka didapatkan respon arus, fluks, dan kecepatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.11 sampai Gambar 4.13 berikut:



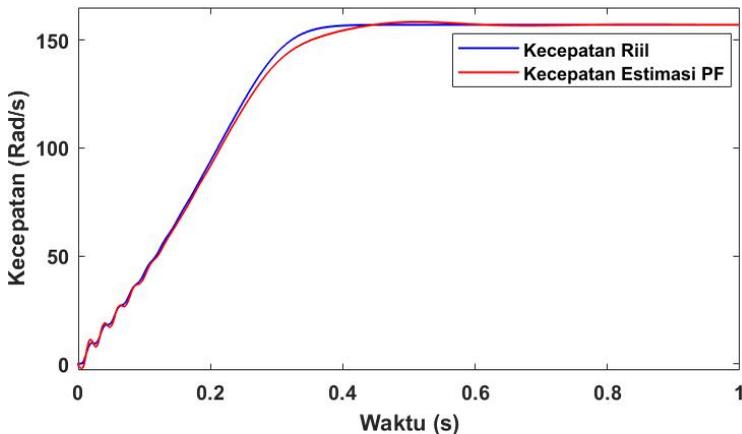
Gambar 4. 11 Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=500$

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa pada saat jumlah partikel 500, respon arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil maupun hasil estimasi saling berhimpitan. Pada awalnya keduanya mengalami perubahan nilai (kondisi *transien*) terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Arus motor induksi keduanya mengalami penurunan mulai dari 0 detik hingga 0,35 detik dan setelah itu arus mulai berada pada keadaan *steady*. Secara lebih detail, terdapat perbedaan antara nilai arus riil dengan hasil estimasi. Dimana nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,41 A. Sedangkan nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,5 A.



Gambar 4. 12 Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=500$

Adapun keluaran *plant* motor induksi dari *state* ketiga dan keempat adalah nilai fluks dalam sumbu $\alpha\beta$ ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$). Gambar 4.12 menunjukkan bahwa pada awalnya nilai fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) antara hasil pemodelan dan hasil estimasi terjadi perubahan nilai (kondisi *transien*) hingga 0,5 detik. Setelah itu respon fluks riil dan estimasi saling berhimpitan, dimana keduanya sama – sama mengalami perubahan nilai terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Nilai fluks perlahan mulai mencapai keadaan *steady* setelah 0,5 detik. Secara lebih detail, terdapat perbedaan antara nilai fluks riil dengan estimasi, dimana nilai fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb. Sedangkan nilai fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,2 Wb.



Gambar 4. 13 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat $N=500$

Dari Gambar 4.13 diketahui bahwa perbandingan nilai antara *output* pemodelan motor induksi dan estimasi yang dihasilkan oleh *particle filter* terdapat perbedaan hingga 0,45 detik. Pada awalnya keduanya mengalami kenaikan nilai kecepatan terlebih dahulu sebelum mencapai keadaan *steady*. Dimana kecepatan motor induksi hasil pemodelan berada dalam keadaan *steady* dengan nilai

kecepatan sebesar 157,07 rad/s, sedangkan nilai kecepatan hasil estimasi *particle filter* berada dalam keadaan *steady* pada nilai 157,04 rad/s.

4.3 Pengujian Performansi *Particle Filter* (PF)

4.3.1 Performansi *Particle Filter* (PF) dengan RMSE

Pengujian performansi *particle filter* ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan dan hasil estimasi menggunakan *particle filter* dengan variasi terhadap jumlah partikel. Performansi tersebut didapatkan melalui analisa RMSE (*root mean square error*) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data Performansi *Particle Filter*

No	Jumlah Partikel	RMSE				
		$i_{\alpha s}$	$i_{\beta s}$	$\lambda_{\alpha r}$	$\lambda_{\beta r}$	ω_r
1	100	0,4763	0,4767	0,2617	0,2632	4,9401
2	250	0,4644	0,4645	0,0683	0,1235	0,5343
3	500	0,4612	0,4611	0,1136	0,1387	1,8494

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah perancangan *speed sensorless induction motor*. Oleh karena itu, analisa terhadap estimasi kecepatan menjadi fokus utama. Berdasarkan Tabel 4.2 diketahui bahwa dengan jumlah partikel sebanyak 250 didapatkan nilai RMSE kecepatan paling kecil. Selain itu, pada jumlah partikel tersebut didapatkan respon antara hasil pemodelan dengan hasil estimasi sama dan saling berhimpitan. Sehingga dengan jumlah partikel 250, maka selanjutnya dilakukan pengujian dengan perubahan tegangan dan penambahan beban.

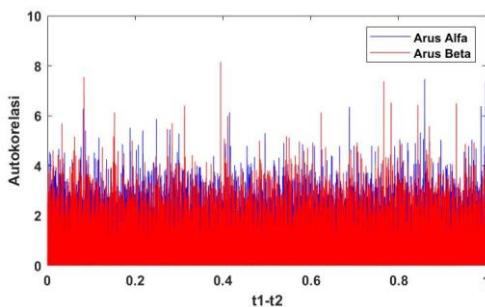
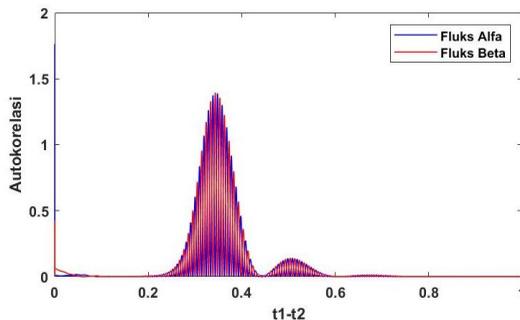
Kemudian dengan jumlah partikel 250, maka juga dilakukan variasi tegangan pada estimasi kecepatan motor induksi (ω_r) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3. Setelah diketahui estimasi kecepatan motor (ω_r), maka akan dibandingkan dengan nilai kecepatan motor (ω_r) hasil pengukuran dan diperoleh rata rata error sebesar 0,104% seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

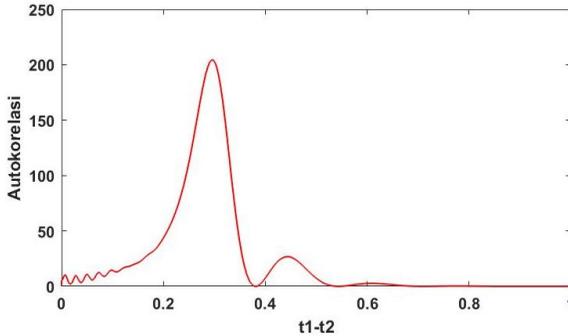
Tabel 4. 3 Data Kecepatan Motor Estimasi dan Pengukuran

No	Tegangan (V)	ω_r Estimasi (rad/s)	ω_r Pengukuran (rad/s)	Error (%)
1	263	156,66	156,9	0,153
2	296	157,12	157,07	0,032
3	378	157,10	157,3	0,127
Rata – rata				0,104

4.3.2 Performansi *Particle Filter* (PF) dengan Autokorelasi

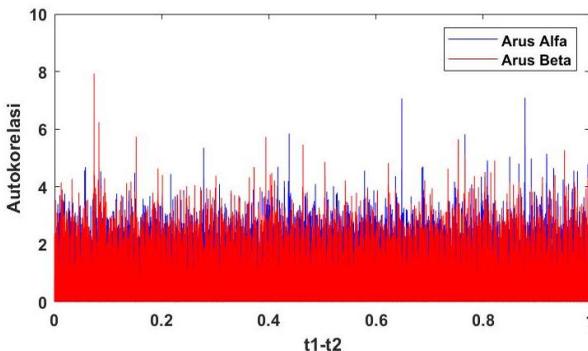
Performansi dari *particle filter* juga dianalisa dengan menggunakan autokorelasi. Autokorelasi dimaksudkan untuk mengetahui ada tidaknya hubungan antara hasil pemodelan *plant* dengan hasil estimasi *particle filter* berdasarkan *error* yang ada.

**Gambar 4. 14** Autokorelasi Arus saat N=100**Gambar 4. 15** Autokorelasi Fluks saat N=100

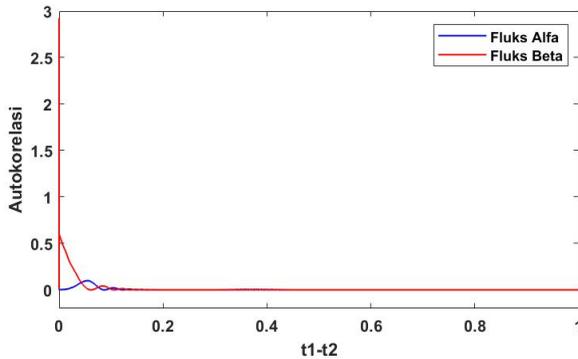


Gambar 4. 16 Autokorelasi Kecepatan saat $N=100$

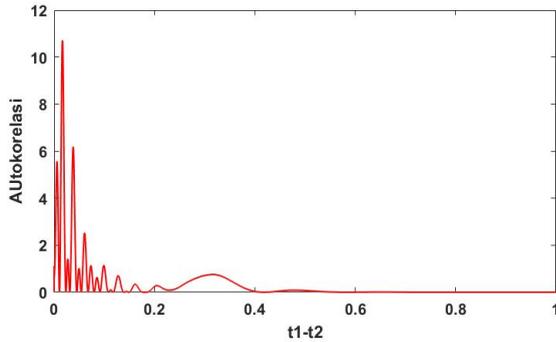
Gambar 4.14 hingga Gambar 4.16 menunjukkan autokorelasi saat jumlah partikel sebesar 100. Berdasarkan Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa autokorelasi pada arus seiring dengan perubahan waktu t_1-t_2 bernilai tidak tetap, dimana autokorelasi tertinggi saat 0,4 detik. Hal ini dikarenakan nilai arus sekarang bergantung pada nilai arus sebelumnya. Sedangkan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 berturut-turut menunjukkan autokorelasi pada fluks dan kecepatan, dimana keduanya memiliki tren kenaikan yang sama saat perubahan waktu t_1-t_2 berada pada 0,3 detik. Hal ini dikarenakan pada waktu tersebut terjadi osilasi pada hasil estimasi PF. Sehingga menghasilkan *error* yang cukup besar dan berdampak pada autokorelasi.



Gambar 4. 17 Autokorelasi Arus saat $N=250$

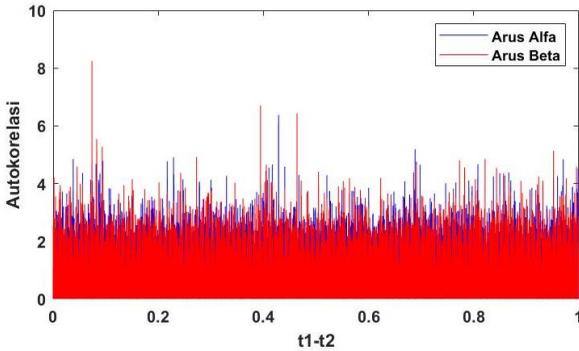


Gambar 4. 18 Autokorelasi Fluks saat N=250

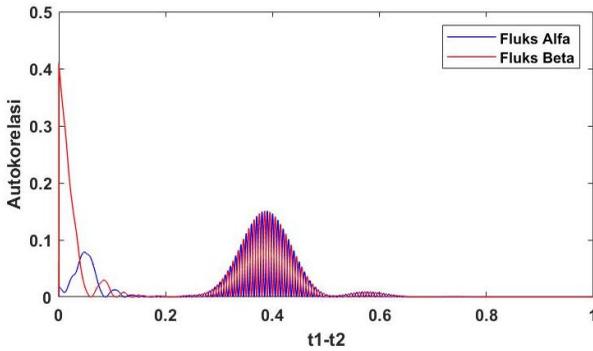


Gambar 4. 19 Autokorelasi Kecepatan saat N=250

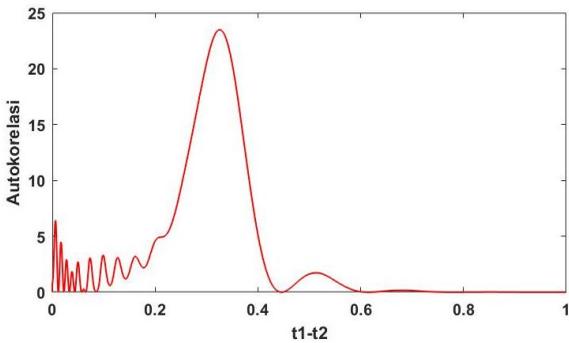
Gambar 4.17 hingga Gambar 4.19 menunjukkan autokorelasi saat jumlah partikel sebesar 250. Sama halnya saat jumlah partikel 100, berdasarkan Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa autokorelasi pada arus seiring dengan perubahan waktu t_1-t_2 bernilai tidak tetap (tidak stabil), dimana autokorelasi tertinggi saat 0,1 detik. Hal ini juga karena nilai arus sekarang bergantung pada nilai arus sebelumnya. Sedangkan pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 menunjukkan autokorelasi pada fluks dan kecepatan PF. Keduanya memiliki tren yang sama, dimana memiliki autokorelasi yang sangat tinggi atau perubahan waktu t_1-t_2 awal. Sehingga dapat diartikan bahwa nilai fluks dan kecepatan tidak bergantung pada perubahan waktu.



Gambar 4. 20 Autokorelasi Arus saat $N=500$



Gambar 4. 21 Autokorelasi Fluks saat $N=500$

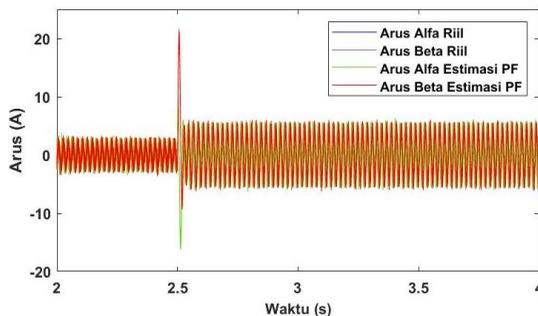


Gambar 4. 22 Autokorelasi Kecepatan saat $N=500$

Gambar 4.20 sampai Gambar 4.22 menunjukkan autokorelasi saat jumlah partikel sebesar 500. Berdasarkan Gambar 4.20 dapat dilihat bahwa autokorelasi pada arus seiring dengan perubahan waktu t_1-t_2 bernilai tidak tetap, dimana autokorelasi tertinggi saat perubahan waktu 0,1 detik. Hal ini dikarenakan nilai arus sekarang bergantung pada nilai arus sebelumnya. Sedangkan pada Gambar 4.21 menunjukkan autokorelasi pada fluks, dimana pada awalnya fluks memiliki autokorelasi yang tinggi di awal kemudian menurun. Namun, saat perubahan waktu t_1-t_2 berada pada 0,3 detik mengalami kenaikan kembali hingga 0,5 detik. Kemudian Gambar 4.22 menunjukkan autokorelasi pada kecepatan, dimana keduanya memiliki tren kenaikan yang sama saat perubahan waktu t_1-t_2 berada pada 0,3 detik. Hal ini dikarenakan pada waktu tersebut, baik estimasi fluks maupun kecepatan memiliki *error* yang cukup besar dengan hasil pemodelannya.

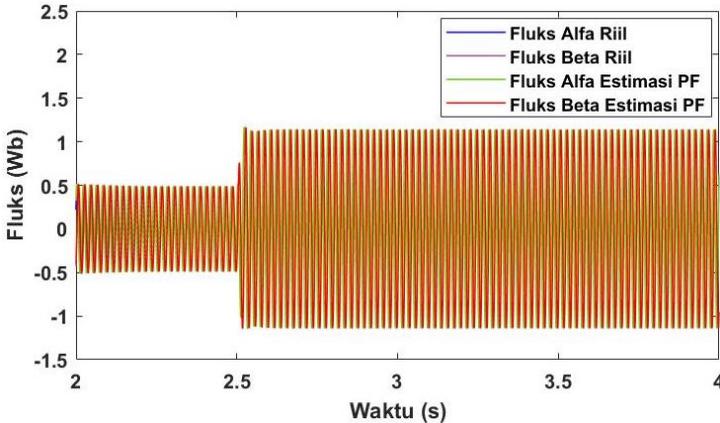
4.4 Hasil Pemodelan dengan Perubahan Tegangan

Pemodelan dengan perubahan tegangan dilakukan dengan *switch* tegangan yang masuk, dimana awalnya diberikan tegangan sebesar 163 volt kemudian diberikan tegangan sebesar 380 volt. Pemodelan dengan perubahan tegangan dilakukan berdasarkan kondisi motor induksi tanpa beban. Pengujian dengan perubahan tegangan dilakukan pada saat jumlah partikel sebanyak 250.



Gambar 4.23 Respon Arus Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat Terjadi Perubahan Tegangan

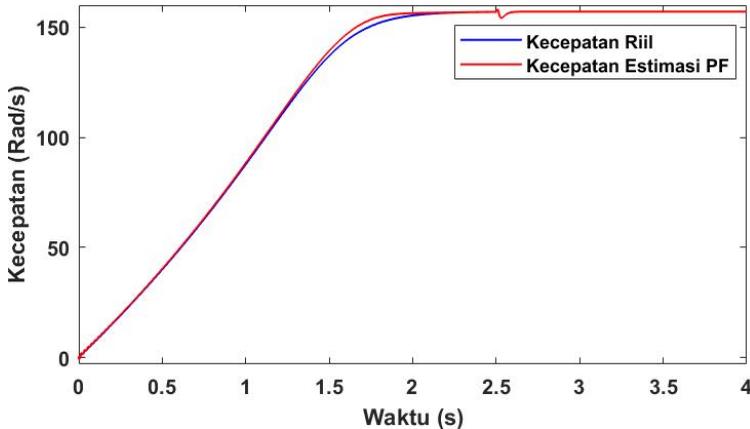
Dari Gambar 4.23 dapat dilihat respon arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil dan estimasi pada saat terjadi perubahan tegangan dimana terdapat perubahan arus seiring dengan perubahan tegangan. Pada saat diberikan tegangan sebesar 163 volt, nilai arus riil maupun estimasi berada *steady* dengan nilai *peak* sebesar 2,54 A. Sedangkan ketika tegangan diubah menjadi 380 volt, nilai arus riil maupun estimasi mengalami kenaikan, dimana terlebih dahulu naik hingga 21,61 A pada saat 2,5 detik dan setelah itu *steady* dengan nilai *peak* sebesar 4,42 A. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan tegangan pada sumber dapat memperbesar nilai arus pemodelan dan estimasi. Adapun nilai RMSE dari $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ adalah 0,4291.



Gambar 4. 24 Respon Fluks Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat Terjadi Perubahan Tegangan

Gambar 4.24 menunjukkan respon fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) riil dan estimasi pada saat terjadi perubahan tegangan. Sama halnya dengan arus, dapat dilihat bahwa terdapat perubahan fluks seiring dengan perubahan tegangan. Dimana pada saat diberikan tegangan sebesar 163 volt, nilai fluks riil maupun estimasi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai *peak* sebesar 0,51 Wb. Sedangkan ketika tegangan diubah menjadi 380 volt, fluks pemodelan maupun estimasi terlebih dahulu mengalami kondisi *transien* pada saat 2,5

detik dan kemudian dalam keadaan *steady* dengan nilai *peak* sebesar 1,137 Wb. Hal ini juga menunjukkan kenaikan tegangan pada sumber dapat memperbesar nilai pemodelan maupun estimasi. Adapun nilai RMSE dari $\lambda_{\alpha r}$ adalah 0,0424, sedangkan nilai RMSE untuk $\lambda_{\beta r}$ adalah 0,0459.



Gambar 4.25 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi PF saat Terjadi Perubahan Tegangan

Dari Gambar 4.25 dapat dilihat respon kecepatan hasil pemodelan dan estimasi dengan *particle filter* pada saat terjadi perubahan tegangan. Sama halnya dengan arus dan fluks, dapat dilihat bahwa terdapat perubahan kecepatan seiring dengan perubahan tegangan dari 163 volt menjadi 380 volt. Dimana pada saat diberikan tegangan sebesar 163 volt, didapatkan keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 156,9 rad/s. Sedangkan ketika tegangan diubah menjadi 380 volt pada detik ke-2,5, maka terjadi perubahan nilai (kondisi *transien*) dan kemudian perlahan dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Dari Gambar 4.16 diketahui bahwa kecepatan estimasi dari *particle filter* dapat menyesuaikan dengan perubahan tegangan yang ada. Perubahan kecepatan tidak terlihat signifikan karena pemodelan

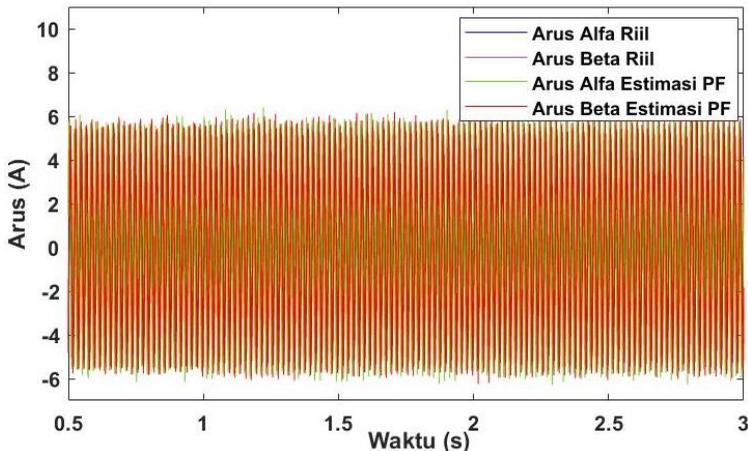
dilakukan berdasarkan keadaan motor induksi tanpa beban. Dari Gambar 4.16 didapatkan nilai RMSE kecepatan sebesar 1,0534.

4.5 Hasil Uji Beban

Selain dilakukan pengujian tanpa beban, pada penelitian ini juga dilakukan simulasi dengan menambahkan beban (*torsi load*). Adapun beban yang digunakan adalah 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm, dan 10 Nm.

4.5.1 Hasil Uji Beban 1 Nm

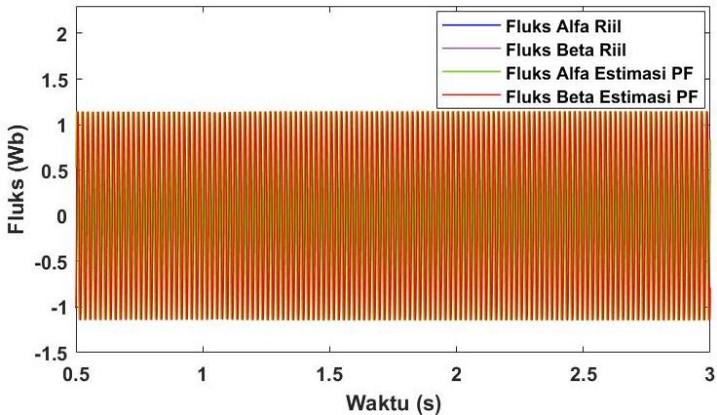
Adapun dari pengujian beban 1 Nm, maka didapatkan respon arus, fluks, dan kecepatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.26 sampai Gambar 4.28 berikut:



Gambar 4. 26 Respon Arus Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 1 Nm

Gambar 4.26 menunjukkan respon arus riil dan estimasi pada saat diberi beban atau *torsi load* sebesar 1 Nm. Beban 1 Nm diberikan pada saat detik ke satu. Pemberian beban ini menyebabkan perubahan nilai arus. Dimana sebelum diberi *torsi load*, nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil dalam keadaan *steady* dengan *peak*

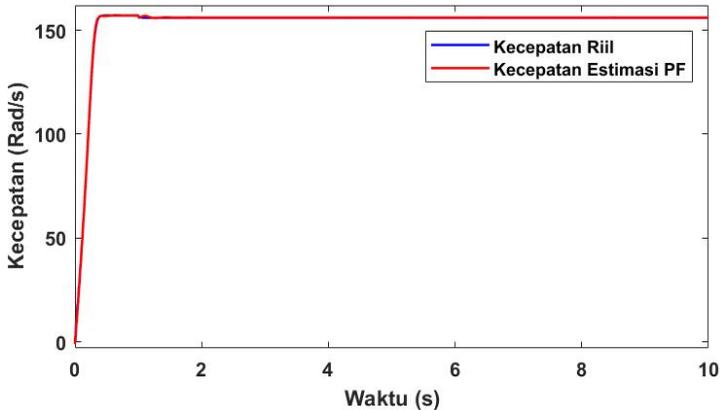
sebesar 4,41 A dan nilai arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,7 A. Keduanya *steady* setelah 0,35 detik. Setelah diberikan *torsi load*, pada kondisi *steady* arus mengalami kenaikan. Dimana arus *riil steady* pada nilai *peak* sebesar 4,5 A dan arus estimasi *steady* dengan nilai *peak* 4,9 A. Adapun nilai RMSE dari $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ adalah 0,4645.



Gambar 4. 27 Respon Fluks Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 1 Nm

Selanjutnya pemberian beban atau *torsi load* juga berpengaruh terhadap fluks riil dan estimasi. Dari Gambar 4.27 diketahui respon fluks riil dan estimasi saat diberi beban sebesar 1 Nm. Sama halnya dengan arus, pemberian beban dilakukan pada detik pertama. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebelum diberi *torsi load*, nilai fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb dan nilai fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,142 Wb. Kemudian diberikan beban sebesar 1 Nm setelah 1 detik. Setelah diberikan beban 1 Nm, tidak terjadi perubahan signifikan pada fluks. Dimana fluks *riil* berada pada kondisi *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb, sedangkan estimasi fluks *steady*

dengan nilai *peak* 1,141 Wb. Adapun nilai RMSE dari λ_{ar} adalah 0,1121, sedangkan nilai RMSE untuk $\lambda_{\beta r}$ adalah 0,1269.

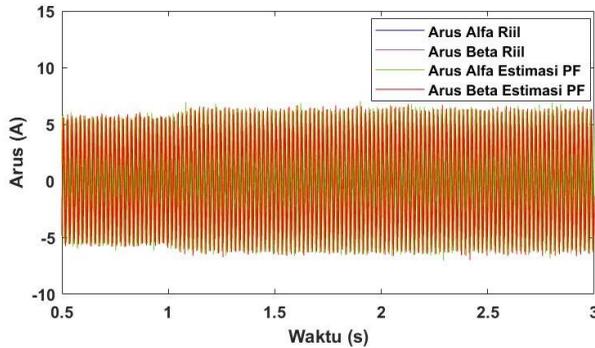


Gambar 4. 28 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 1 Nm

Dari Gambar 4.28 dapat dilihat respon kecepatan motor induksi riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 1 Nm. Dimana *torsi load* diberikan setelah 1 detik. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa penambahan *torsi load* menyebabkan penurunan kecepatan. Pada saat belum diberikan *torsi load* kecepatan motor induksi riil dan estimasi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Sedangkan setelah diberikan beban, kecepatan riil mencapai kondisi *steady* pada saat 155,96 rad/s. Sedangkan, kecepatan estimasi setelah diberi beban berada dalam kondisi *steady* dengan nilai 156,07 rad/s. Sehingga didapatkan *error* kecepatan sebesar 0,07%. Sedangkan nilai RMSE kecepatan adalah 0,3623.

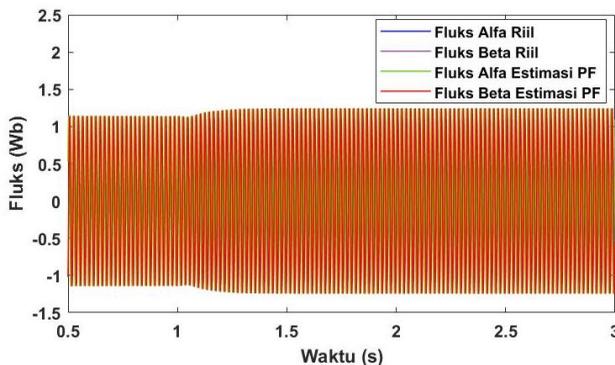
4.5.2 Hasil Uji Beban 3 Nm

Adapun dari pengujian beban 3 Nm, maka didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.29 sampai Gambar 4.31 berikut:



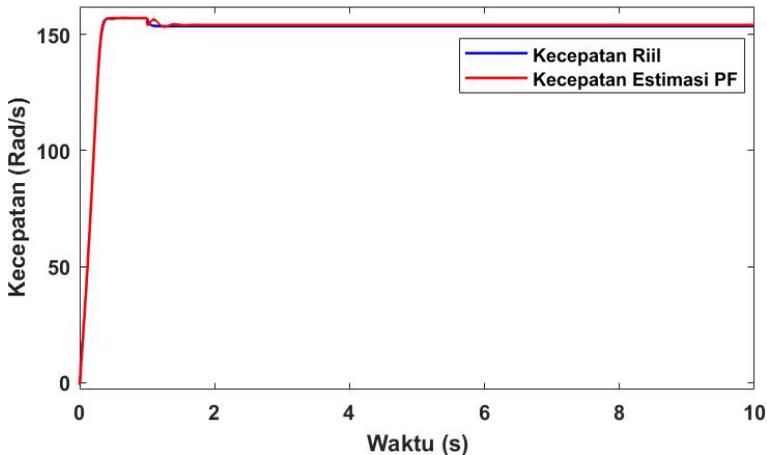
Gambar 4. 29 Respon Arus Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 3 Nm

Dari Gambar 4.29 dapat dilihat respon arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil dan estimasi ketika diberi beban sebesar 3 Nm pada saat 1 detik. Terdapat perubahan nilai arus yang mana sebelum diberi *torsi load*, nilai arus riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,41 A dan nilai arus estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,7 A. Setelah diberikan *torsi load* arus mengalami kenaikan, dimana arus *riil steady* pada nilai *peak* sebesar 4,8 A dan arus estimasi *steady* dengan nilai *peak* 5,3 A. Adapun nilai RMSE dari $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ adalah 0,4647.



Gambar 4. 30 Respon Fluks riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 3 Nm

Gambar 4.30 menunjukkan respon fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) riil dan estimasi saat diberi beban sebesar 3 Nm. Pemberian beban juga dilakukan pada detik pertama. Dari gambar tersebut diketahui bahwa sebelum diberi *torsi load*, nilai fluks riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb dan nilai fluks hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,142 Wb. Setelah diberikan beban 3 Nm, terjadi perubahan nilai (kondisi *transien*). Dimana nilai fluks *riil* dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,1 Wb, sedangkan nilai estimasi fluks berada dalam kondisi *steady* dengan nilai *peak* 1,17 Wb. Adapun nilai RMSE dari $\lambda_{\alpha r}$ adalah 0,3217, sedangkan nilai RMSE untuk $\lambda_{\beta r}$ adalah 0,3269.



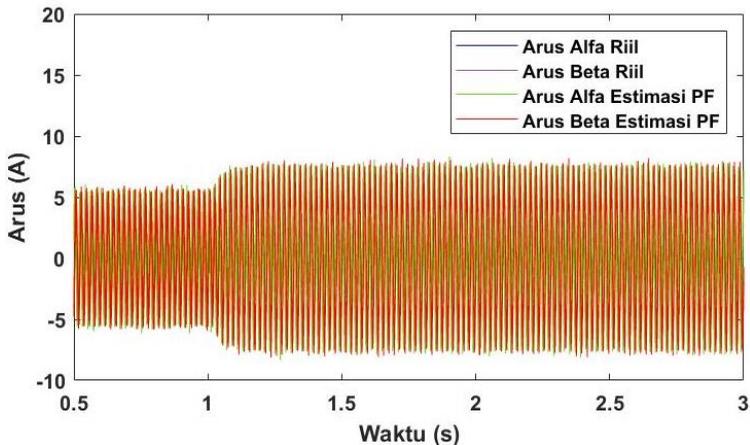
Gambar 4. 31 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 3 Nm

Gambar 4.31 menunjukkan respon kecepatan riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 3 Nm. Penambahan ini menyebabkan penurunan kecepatan. Sebelum diberikan *torsi load*, kecepatan motor induksi riil dan estimasi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Kemudian saat diberi beban, kecepatan riil mencapai kondisi *steady* pada saat 153,6 rad/s. Sedangkan, kecepatan estimasi setelah diberi beban

berada dalam kondisi *steady* dengan nilai 154,08 rad/s dan didapatkan *error* kecepatan sebesar 0,3%. Sedangkan nilai RMSE kecepatan adalah 0,6917.

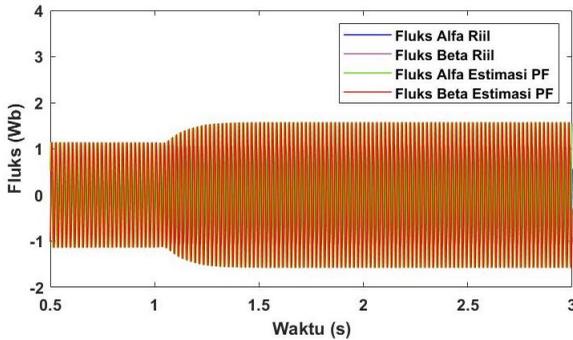
4.5.3 Hasil Uji Beban 6 Nm

Adapun dari pengujian beban 6 Nm, maka didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.32 sampai Gambar 4.34 berikut:



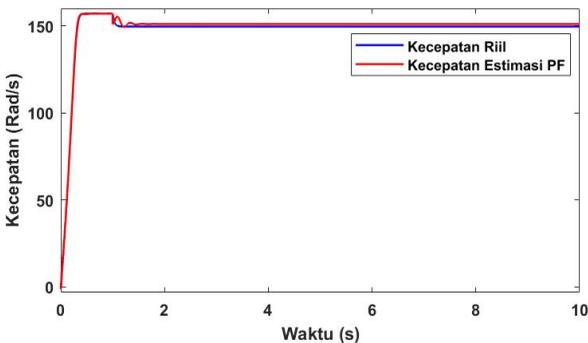
Gambar 4. 32 Respon Arus Riil dan Estimasi Ketika Diberi Beban 6 Nm

Gambar 4.32 menunjukkan respon arus riil dan estimasi pada saat diberi beban atau *torsi load* sebesar 6 Nm. Beban 6 Nm diberikan pada saat detik pertama. Sebelum diberi *torsi load*, nilai arus riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,41 A dan nilai arus hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 4,7 A. Keduanya *steady* setelah 0,35 detik. Namun setelah diberikan *torsi load*, pada kondisi *steady* arus mengalami kenaikan. Dimana arus *riil steady* pada nilai *peak* sebesar 6,09 A dan arus estimasi *steady* dengan nilai *peak* 6,3 A. Adapun nilai RMSE dari $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ adalah 0,4651.



Gambar 4. 33 Respon Fluks Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 6 Nm

Dari Gambar 4.33 diketahui respon fluks riil dan estimasi saat diberi beban sebesar 6 Nm. Gambar tersebut menunjukkan bahwa sebelum diberi *torsi load*, nilai fluks riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb dan nilai fluks hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,142 Wb. Setelah diberikan beban sebesar 6 Nm, terdapat perbedaan respon antara riil dan estimasi. Dimana fluks *riil* dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,07 Wb, sedangkan estimasi fluks *steady* dengan nilai *peak* 1,51 Wb. Adapun nilai RMSE dari $\lambda_{\alpha r}$ adalah 0,6534, sedangkan nilai RMSE untuk $\lambda_{\beta r}$ adalah 0,6557.

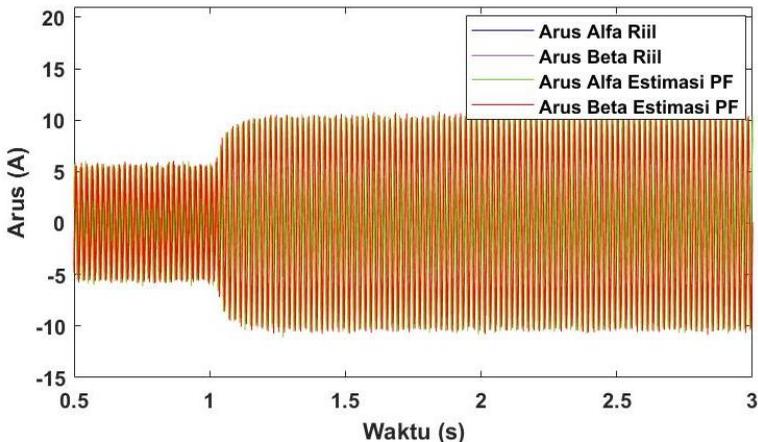


Gambar 4. 34 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 6 Nm

Dari Gambar 4.34 dapat dilihat respon kecepatan motor induksi riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 6 Nm. Dimana penambahan beban diberikan setelah 1 detik. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa penambahan *torsi load* menyebabkan penurunan kecepatan. Pada saat sebelum diberikan *torsi load* kecepatan motor induksi riil dan estimasi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s dan saling berhimpitan. Sedangkan setelah diberikan beban, antara kecepatan riil dan estimasi terdapat perbedaan. Dimana kecepatan riil mencapai kondisi *steady* pada saat 149,63 rad/s. Sedangkan, kecepatan estimasi setelah diberi beban berada dalam kondisi *steady* dengan nilai 151,07 rad/s. Sehingga didapatkan *error* kecepatan sebesar 0,96%. Sedangkan nilai RMSE kecepatan adalah 3,5202.

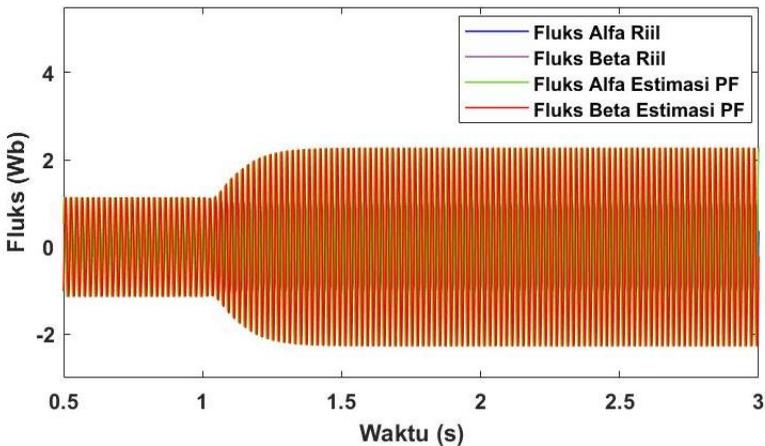
4.5.4 Hasil Uji Beban 10 Nm

Adapun dari pengujian beban 10 Nm, maka didapatkan respon sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.35 sampai Gambar 4.37 berikut:



Gambar 4. 35 Respon Arus Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 10 Nm

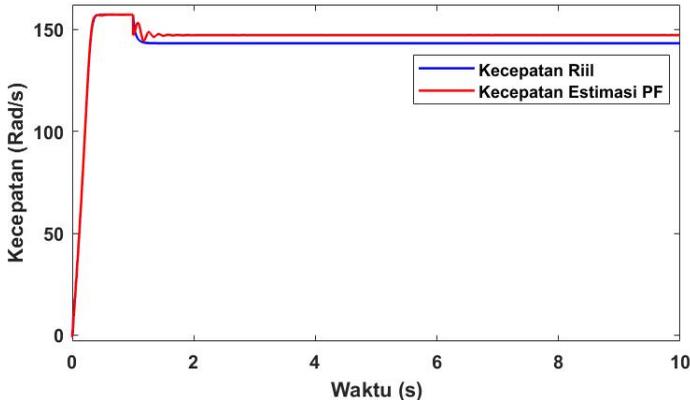
Dari Gambar 4.35 dapat dilihat respon arus ($i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$) riil dan estimasi ketika diberi beban sebesar 10 Nm pada saat 1 detik. Terdapat perubahan nilai arus yang mana sebelum diberi *torsi load*. Setelah diberikan *torsi load* arus mengalami kenaikan, dimana arus *riil steady* pada nilai *peak* sebesar 8,8 A dan arus estimasi *steady* dengan nilai *peak* 9,04 A. Adapun nilai RMSE dari $i_{\alpha s}$ dan $i_{\beta s}$ adalah 0,4666.



Gambar 4. 36 Respon Fluks Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 10 Nm

Gambar 4.36 menunjukkan respon fluks ($\lambda_{\alpha r}$ dan $\lambda_{\beta r}$) riil dan estimasi saat diberi beban sebesar 10 Nm. Pemberian beban juga dilakukan pada detik pertama. Dari gambar tersebut diketahui bahwa sebelum diberi *torsi load*, nilai fluks riil dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,137 Wb dan nilai fluks hasil estimasi dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,142 Wb. Sedangkan setelah diberikan beban 10 Nm, terjadi perubahan nilai (kondisi *transien*). Dimana nilai fluks *riil* dalam keadaan *steady* dengan *peak* sebesar 1,01 Wb, sedangkan nilai estimasi fluks berada dalam kondisi *steady* dengan nilai *peak* 2,27 Wb. Adapun nilai RMSE

dari λ_{ar} adalah 1,1405, sedangkan nilai RMSE untuk λ_{br} adalah 1,1414.



Gambar 4. 37 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi PF Ketika Diberi Beban 10 Nm

Gambar 4.37 menunjukkan respon kecepatan motor induksi riil dan estimasi saat diberikan *torsi load* sebesar 10 Nm setelah 1 detik. Penambahan *torsi load* ini menyebabkan penurunan kecepatan. Sebelum diberikan *torsi load*, kecepatan motor induksi riil dan estimasi berada dalam keadaan *steady* dengan nilai kecepatan sebesar 157,07 rad/s. Sedangkan saat diberikan beban sebesar 10 Nm, keduanya tidak saling berhimpitan. Ketika diberi beban, kecepatan riil mencapai kondisi *steady* pada saat 143,12 rad/s. Sedangkan, kecepatan estimasi setelah diberi beban beresilasi terlebih dahulu dan kemudian berada dalam kondisi *steady* dengan nilai 146,05 rad/s. Sehingga didapatkan *error* kecepatan sebesar 2,04%. Sedangkan nilai RMSE kecepatan adalah 3,3625.

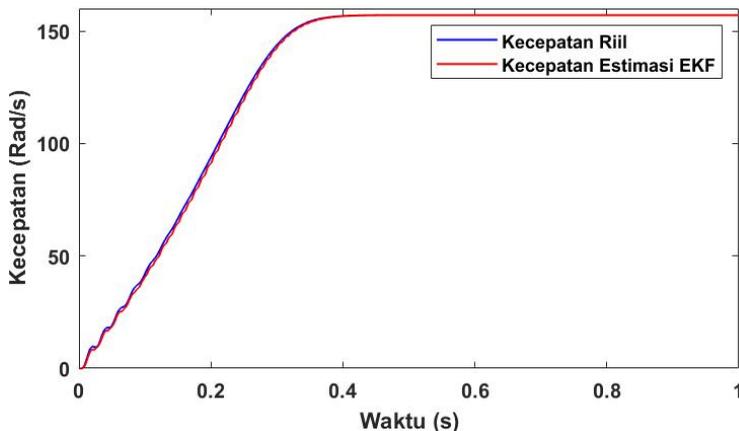
Pengujian performansi *particle filter* juga dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan dan hasil estimasi menggunakan *particle filter* dengan uji variasi beban. Performansi tersebut didapatkan melalui analisa RMSE (*root mean square error*) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Data Performansi *Particle Filter* Saat Diberi Beban

No	Beban (Nm)	RMSE				
		$i_{\alpha s}$	$i_{\beta s}$	$\lambda_{\alpha r}$	$\lambda_{\beta r}$	ω_r
1.	1	0,4645	0,4645	0,1121	0,1269	0,3623
2.	3	0,4647	0,4647	0,3217	0,3269	0,6917
3.	6	0,4651	0,4651	0,6534	0,6657	1,4716
4.	10	0,4666	0,4666	1,2229	1,2236	3,5202

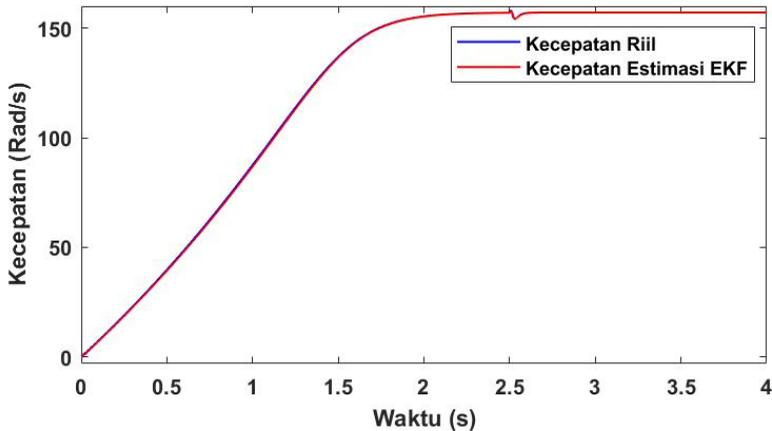
4.6 Perbandingan Performansi *Particle Filter* (PF) dengan *Extended Kalman Filter* (EKF)

Langkah selanjutnya adalah membandingkan performansi hasil estimasi kecepatan *particle filter* dengan *extended kalman filter*. Pengujian dilakukan dalam keadaan motor induksi tanpa beban maupun ada beban. Adapun performansi dari *extended kalman filter* ini didapatkan dari hasil penelitian sebelumnya. Perbandingan tersebut dilakukan dengan membandingkan error antar keduanya. Adapun respon kecepatan dari *extended kalman filter* saat motor induksi tanpa beban ditunjukkan sebagai berikut:



Gambar 4. 38 Respon Kecepatan Motor Induksi Riil dan Estimasi EKF

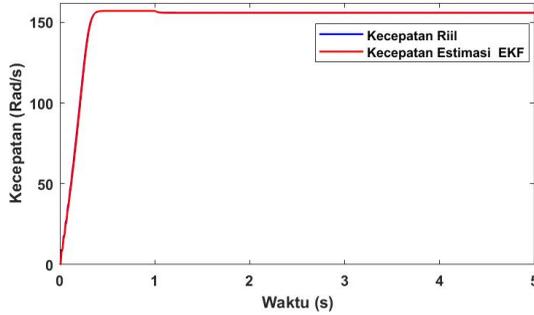
Performansi estimasi kecepatan dengan *particle filter* maupun *extended kalman filter* didapatkan melalui analisa RMSE (*root mean square error*). Dimana estimasi kecepatan *extended kalman filter* didapatkan nilai RMSE sebesar 0,9618, sedangkan estimasi kecepatan *particle filter* didapatkan nilai RMSE sebesar 0,5343. Hal ini menunjukkan bahwa dalam keadaan motor induksi tanpa beban performansi PF lebih baik dibandingkan EKF.



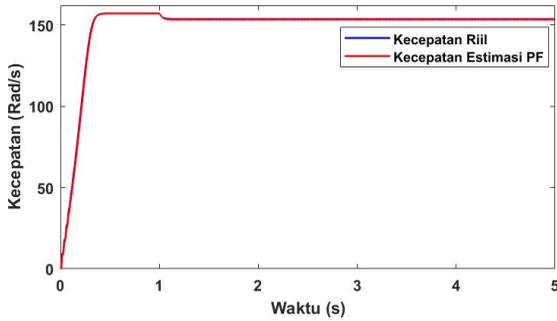
Gambar 4. 39 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF saat Terjadi Perubahan Tegangan

Setelah itu dilakukan pengujian dengan perubahan tegangan. Gambar 4.39 menunjukkan respon kecepatan motor induksi riil dan estimasi EKF saat terjadi perubahan tegangan. Apabila dibandingkan dengan Gambar 4.25, maka diketahui bahwa kecepatan estimasi dari *particle filter* maupun *extended kalman filter* dapat menyesuaikan dengan perubahan tegangan yang ada.

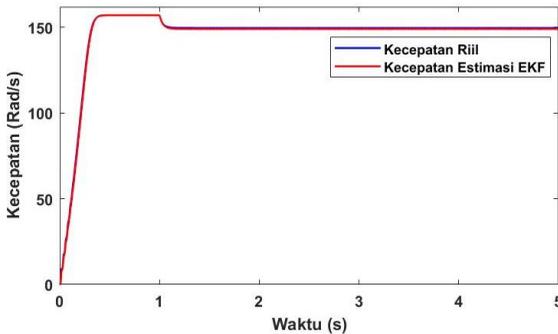
Selain itu, perbandingan performansi *particle filter* dan *extended kalman filter* juga dilakukan dalam keadaan motor induksi dengan beban. Beban yang digunakan adalah 1 Nm, 3 Nm, 6 Nm, dan 10 Nm. Adapun respon kecepatan EKF saat diberikan beban ditunjukkan pada Gambar 4.40 sampai 4.43 berikut:



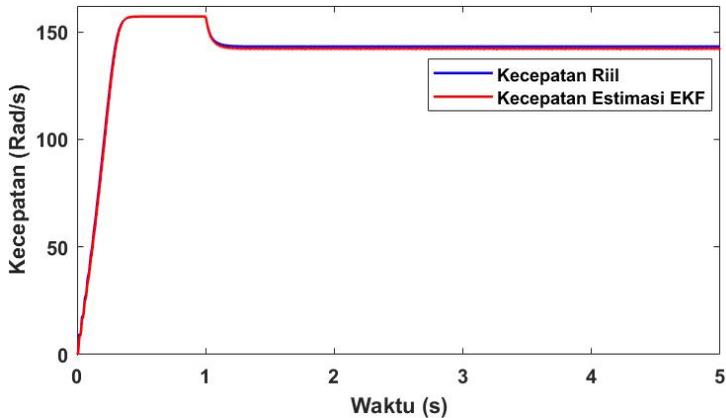
Gambar 4. 40 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 1 Nm



Gambar 4. 41 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 3 Nm



Gambar 4. 42 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 6 Nm



Gambar 4. 43 Respon Kecepatan Riil dan Estimasi EKF Ketika Diberi Beban 10 Nm

Dari respon kecepatan EKF ketika diberikan beban, maka selanjutnya dilakukan perbandingan performansi dengan PF. Performansi tersebut diketahui melalui nilai RMSE. Adapun perbandingan RMSE kecepatan PF dengan EKF ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut:

Tabel 4. 5 Perbandingan RMSE Kecepatan *Particle Filter* (PF) dengan *Extended Kalman Filter* (EKF)

No.	Uji Beban (Nm)	RMSE Kecepatan	
		PF	EKF
1.	1	0,3623	0,4384
2.	3	0,6917	0,5006
3.	6	1,4716	0,6754
4.	10	3,3625	0,9930

Berdasarkan Tabel 4.5 diketahui bahwa nilai RMSE kecepatan baik PF maupun EKF semakin meningkat ketika beban yang diberikan semakin besar. Apabila RMSE kecepatan PF dibandingkan dengan EKF, maka diketahui bahwa dalam keadaan motor induksi ada beban performansi EKF lebih baik dibandingkan PF.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

- a. Perancangan *speed sensorless induction motor* dengan metode *particle filter* yang mampu mengestimasi kecepatan membutuhkan informasi arus dan tegangan masukan motor induksi.
- b. Berdasarkan hasil pemodelan didapatkan kondisi *steady* dengan nilai arus sebesar 4,41 A, nilai fluks sebesar 1,137 Wb, dan kecepatan sebesar 157,07 rad/s.
- c. Dari perancangan *particle filter* dengan variasi jumlah partikel diketahui bahwa dengan jumlah partikel sebanyak 250 didapatkan nilai RMSE paling kecil. Dari hasil estimasi PF dengan jumlah partikel tersebut, diketahui dalam kondisi *steady* didapatkan nilai arus sebesar 4,7 A, nilai fluks sebesar 1,142 Wb, dan kecepatan sebesar 157,08 rad/s.
- d. Perbandingan performansi estimasi kecepatan dengan PF maupun EKF didapatkan melalui nilai RMSE. Dalam keadaan motor induksi tanpa beban performansi PF lebih baik dibandingkan EKF. Namun, dalam keadaan motor induksi ada beban performansi EKF lebih baik dibandingkan PF. Selain itu, kecepatan estimasi dari PF maupun EKF dapat menyesuaikan dengan perubahan tegangan yang ada.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil pengujian adalah pada penelitian ini membutuhkan waktu simulasi yang lama bergantung pada jumlah partikel, sehingga membutuhkan studi lebih lanjut untuk mengetahui jumlah partikel yang efektif.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

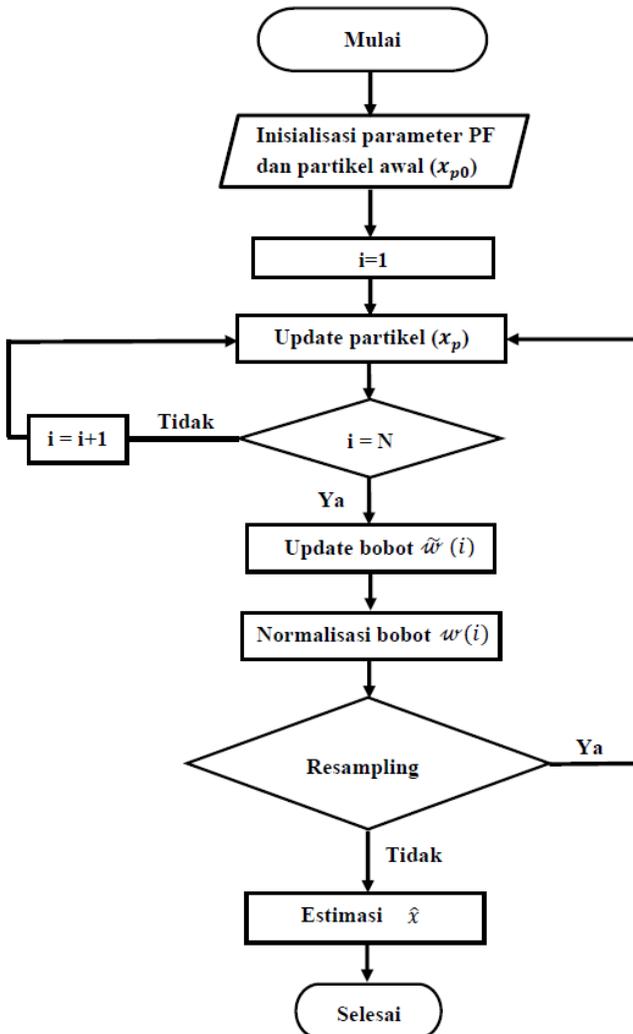
DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. J. Perkeretaapian, “Rencana Induk Perkeretaapian Nasional,” Kementerian Perhubungan, Jakarta, 2011.
- [2] V. Tiwari, S. Das, and A. Pal, “Sensorless Speed Control of Induction Motor Drive Using Extended Kalman Filter Observer,” dalam *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Bangalore, India, 2017.
- [3] J. Holtz, “Sensorless Control of Induction Motor Drives,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 8, pp. 1359-1394, 2002.
- [4] O. Aydogmus and M. F. Talu, “Comparison of Extended Kalman and Particle Filter Based Sensorless Speed Control,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 2, pp. 402-410, 2012.
- [5] M. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, “A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 2, pp. 174-188, 2002.
- [6] M. Mansouri, M. Mohamed-Seghir, H. Nounou, M. Nounou, and H. Abu-Rub, “States and Parameters Estimation in Induction Motor Using Bayesian Techniques,” dalam *10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13)*, Hammamet, Tunisia, 2013.
- [7] I. P. Anggraini, “Perancangan *Extended Kalman Filter* Untuk *Speed Sensorless Induction Motor* di Unit Penggerak Kereta Api PT. INKA,” Teknik Fisika, ITS, Surabaya, 2019.
- [8] L. A. Pereira, “Performance Estimation of Three-Phase Induction Motors From No-Load Startup Test Without Speed Acquisition,” *ISA Transactions*, 2019.
- [9] M. B. Payan, “Techno-Economic Optimal Power Rating of Induction Motor,” *Applied Energy*, vol. 240, pp. 1031-1048, 2019.

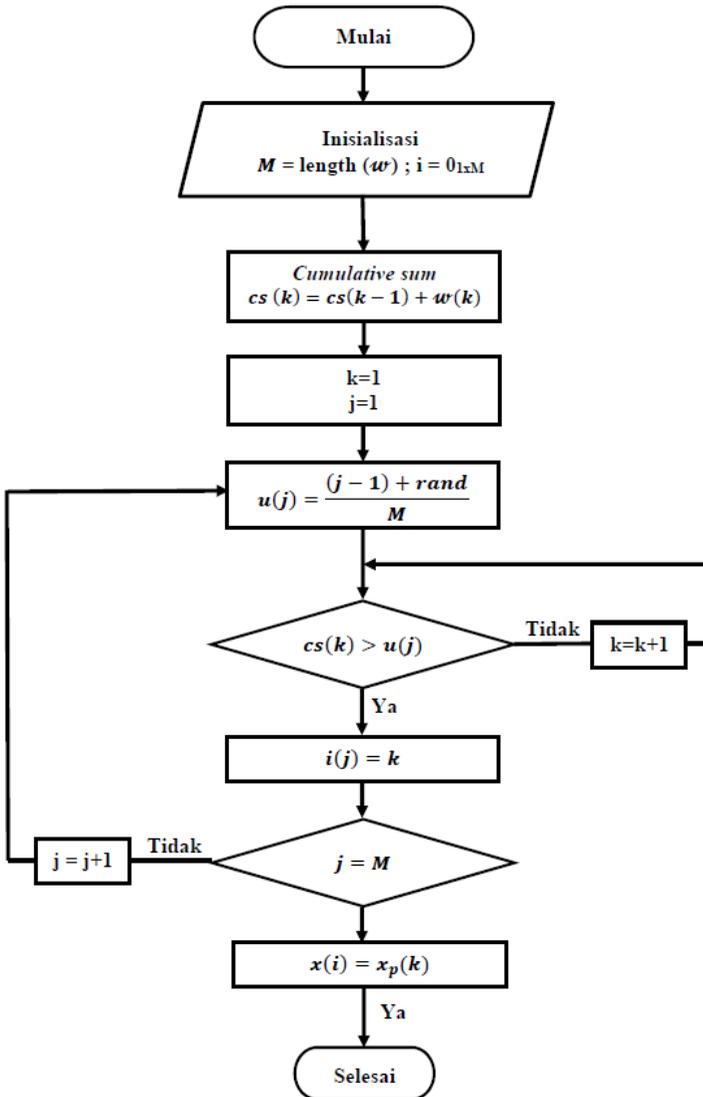
- [10] B. Muslim, "Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler Fuzzy-PID," Teknik Elektro, ITS, Surabaya, 2015.
- [11] A. Nikbakhsh, "Classification and Comparison of Rotor Temperature Estimation Methods of Squirrel Cage Induction Motors," *Measurement*, vol. 145, pp. 779-802, 2019.
- [12] P. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Piscataway, New Jersey: IEEE Press, 2013.
- [13] T. F. Chan and K. Shi, *Applied Intelligent Control Of Motor Induction Motor Drive*, IEEE Press, 2011.
- [14] N. K. Ki and E. J. Delp, "New Models For Real-Time Tracking Using Particle Filtering," US Department of Homeland Security Regional Visualization and Analytics Center, 2009.
- [15] N. Gordon, D. Salmond, and A. Smith, "Novel Approach to Non-Linear and Non-Gaussian Bayesian State Estimation," *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, vol. 140, no. 2, pp. 107-113, 1993.
- [16] T. B. Schon, "Solving Nonlinear State Estimation Problems Using Particle Filters - An Engineering Perspective," Linkoping, Sweden, 2010.
- [17] S. Allaoui, K. Chafaa, Y. Laamari, and B. Athamena, "Induction Motor State Estimation Using Tuned Extended Kalman Filter," dalam *2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Boumerdes, Algeria, 2016.
- [18] R. I. Ardini, "Perancangan *Luenberger Observer* untuk *Speed Sensorless Induction Motor* di Unit Penggerak Kereta Api PT. INKA," Teknik Fisika, ITS, Surabaya, 2019.

LAMPIRAN A KODE MATLAB

A.1 Diagram Alir Pemograman



A.2 Diagram Alir Resampling



A.3 M File

```

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));

```

%%BENTUK FUNCTION yang diasumsikan terdapat nilai

```

lamdaar=0;
lamdabr=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*lamdabr a6*lamdaar 0
0 0];

```

```

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];

```

```

D = zeros(2);

```

A.4 M File Inisialisasi Parameter *Particle Filter*

```

N=250; %Jumlah partikel
x0 = [0 0 0 0 0]'; %Initial guess of the
state value

```

```

P0 = 1*eye(5); % Initial covariance
Q = [0.0000001]; % Process noise
R = [0.5^2 0;0 0.5^2]; % Measurement noise
nx=size(P0,2);
xp0 = repmat(x0,1,N)+sqrt(P0)*randn(nx,N);
%Membangkitkan N partikel secara acak dari
initial prior gaussian distribution

```

A.5 M File Particle Filter/Updating

```

Function[xhat, xp, w]=updateparticle(y,x,Q,B,C
,R,u)
%#codegen
N=250;
n=size(x,1);
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);

xp=zeros(n,N);
for i=1:N

```

```

lamdaar =[0 0 1 0 0]*x(:,i);
lamdabr =[0 0 0 1 0]*x(:,i);
omegar =[0 0 0 0 1]*x(:,i);

Ad = eye(5) + Ts*[-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];

xp(:,i)=Ad*x(:,i)+B*u.*sqrt(Q).*randn(n,1);
end
e= repmat(y,1,N) - C*xp;
w=exp(-(1/2)*(sum(e.*(inv(R)*e))));
w=w/sum(w);
nx=size(Ad,2);
xhat=real(sum(repmat(w,nx,1).*xp,2));

```

A.6 M File Particle Filter/resampling

```

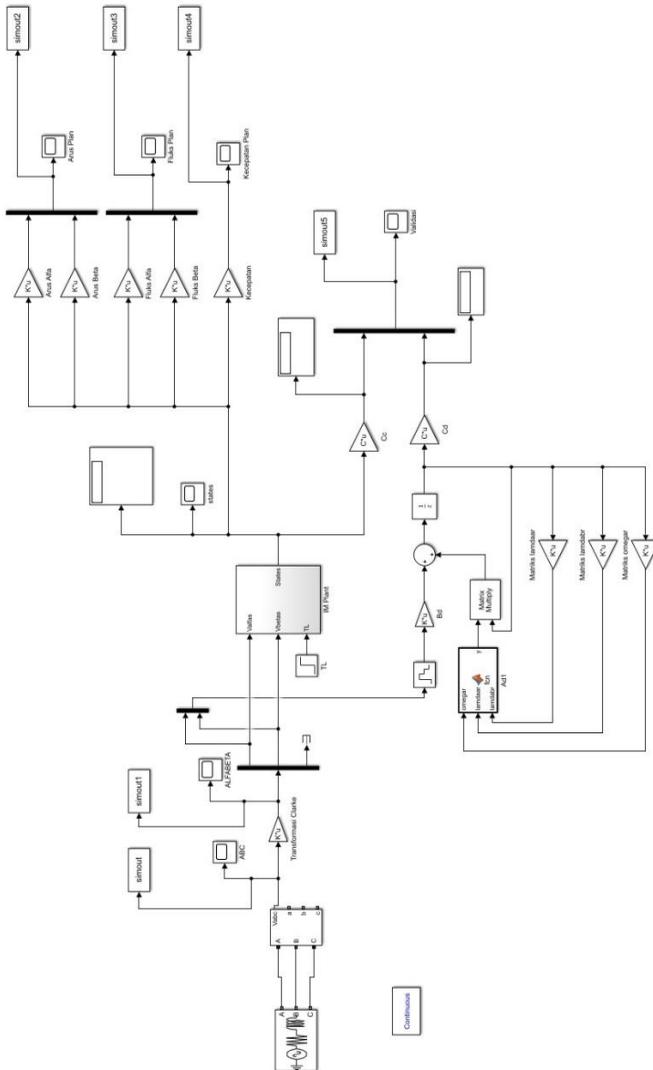
function x=resample(w,xp)
cs=cumsum(w);
M=length(w);
u = ((0:M-1)+rand(1))/M;
i=zeros(1,M);
k=1;
for j=1:M
    while (cs(k)<u(j))
        k=k+1;
    end
    i(j)=k;
end
x=real(xp(:,i));
end

```

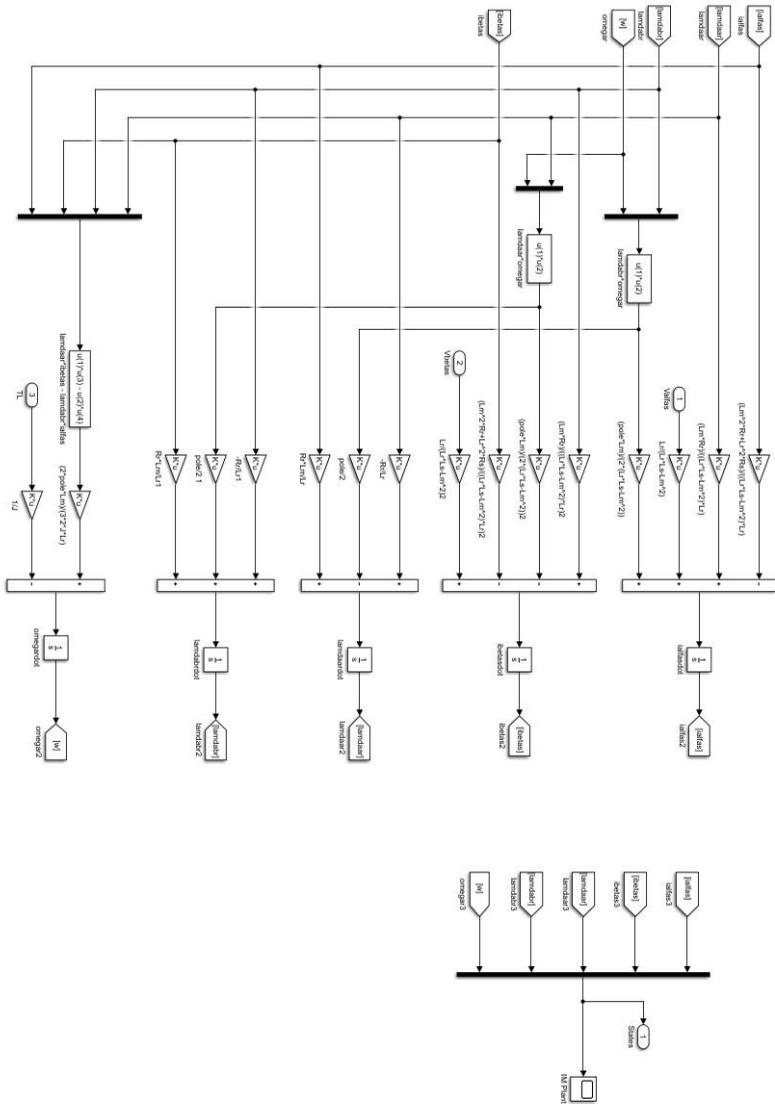
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN B SIMULINK PADA MATLAB R2019a

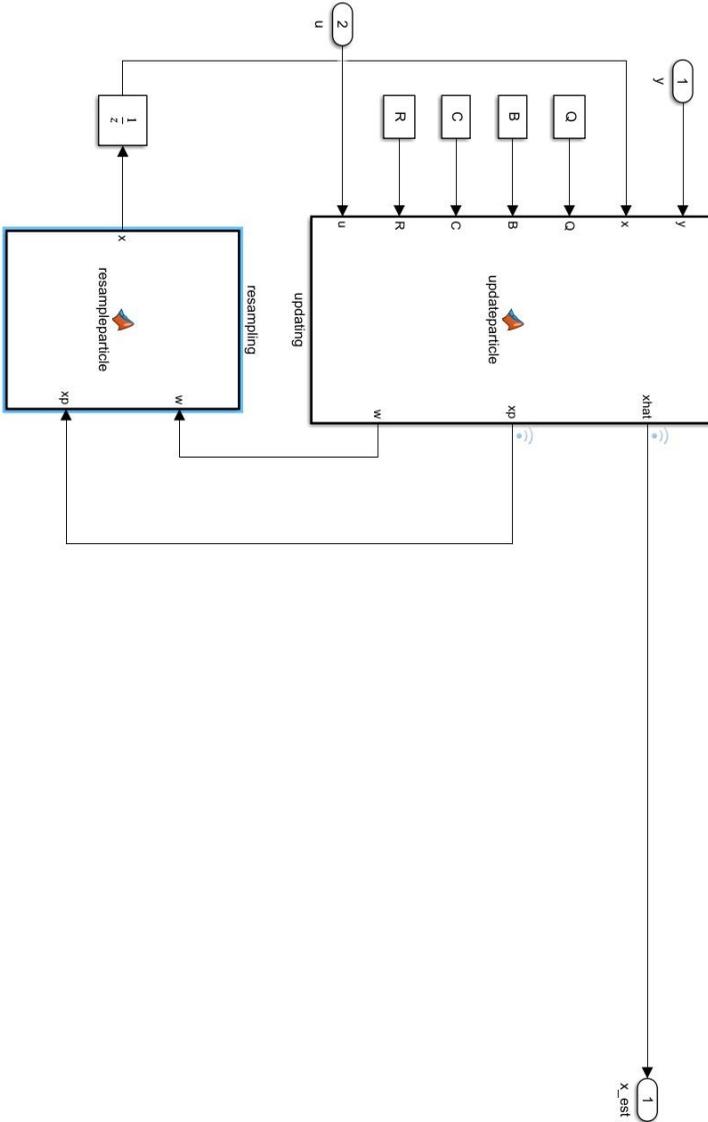
B.1 Plant Motor Induksi



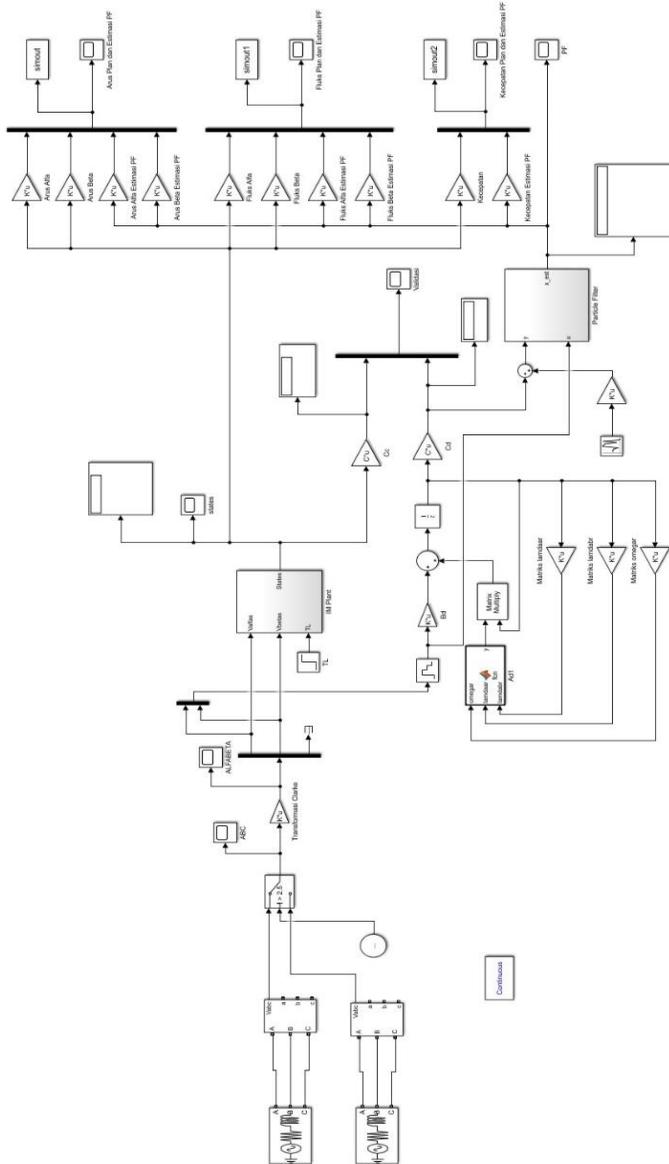
B.2 Pemodelan Motor Induksi



B.4 Subsystem *Particle Filter*



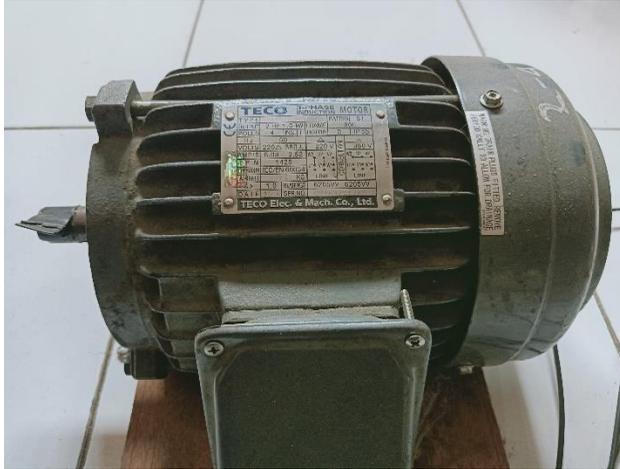
B.5 Plant dengan Dua Tegangan



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN C MOTOR INDUKSI DI PT. INKA

C.1 Motor Induksi 3 Fasa di PT. INKA



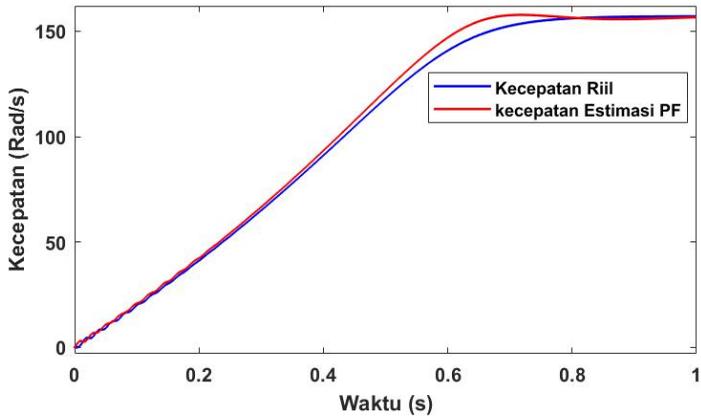
C.2 Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa di PT. INKA



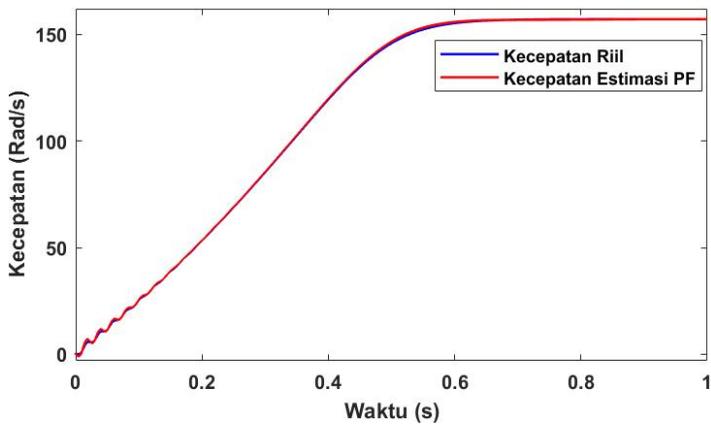
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN D RESPON KECEPATAN MOTOR INDUKSI DENGAN VARIASI TEGANGAN

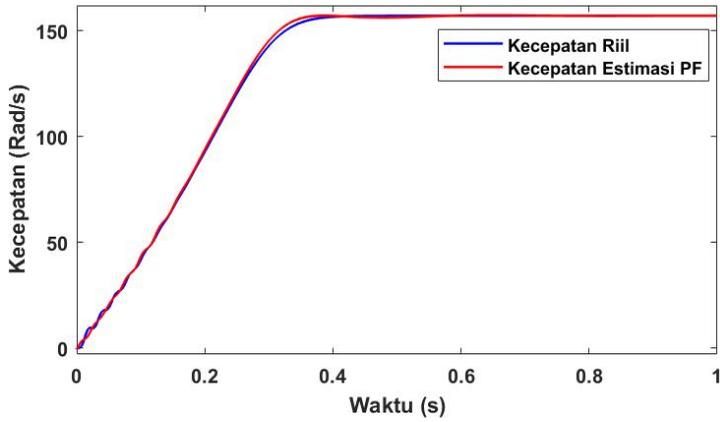
D.1 Hasil Kecepatan Motor (ω_r) Riil dan Estimasi saat Diberikan Tegangan 263 Volt



D.2 Hasil Kecepatan Motor (ω_r) Riil dan Estimasi saat Diberikan Tegangan 296 Volt



D.3 Hasil Kecepatan Motor (ω_r) Riil dan Estimasi saat Diberikan Tegangan 378 Volt



BIODATA PENULIS



Nama penulis Dinda Cahya Firdausi. Penulis dilahirkan di Lamongan, pada tanggal 10 November 1997 sebagai anak kedua dari dua bersaudara. Saat ini penulis tinggal di Lamongan, Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SDN Jetis IV Lamongan hingga tahun 2010, pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Lamongan hingga tahun 2013, pendidikan menengah atas di SMAN 2 Lamongan hingga tahun 2016, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini.

Pada bulan Januari 2020, penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan Particle Filter Untuk Speed Sensorless Induction Motor 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: dcfirdausi@gmail.com*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”