



**TUGAS AKHIR - TF 181801**

## **PERANCANGAN PARTICLE FILTERING SEBAGAI ESTIMATOR KECEPATAN PADA MOTOR DC**

**RICKY GIOVANNI PRATAMA**  
**NRP. 02311640000146**

Dosen Pembimbing:  
Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

***PARTICLE FILTERING DESIGN AS SPEED ESTIMATOR IN DC MOTOR***

**RICKY GIOVANNI PRATAMA**  
**NRP. 02311640000146**

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

*Department Of Engineering Physics*  
*Faculty of Industrial Technology and System Engineering*  
*Institut Teknologi Sepuluh Nopember*  
*Surabaya*  
**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Ricky Giovanni Pratama  
NRP : 02311640000146  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**PERANCANGAN *PARTICLE FILTERING* SEBAGAI ESTIMATOR KECEPATAN PADA MOTOR DC**" 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 sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,



Ricky Giovanni Pratama

NRP. 02311640000146

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN *PARTICLE FILTERING* SEBAGAI ESTIMATOR  
KECEPATAN PADA MOTOR DC**

Oleh:

**Ricky Giovanni Pratama**

**NRP. 02311640000146**

Surabaya,

Menyetujui,  
Pembimbing



**Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**  
**NIP. 19760523 200012 2001**

Mengetahui,

Kepala Departemen  
Teknik Fisika FT-IRS ITS



**Dr. Suvanto S.T., M.T.**  
**NIP. 19711113 199512 1002**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# LEMBAR PENGESAHAN

## PERANCANGAN *PARTICLE FILTERING* SEBAGAI ESTIMATOR KECEPATAN PADA MOTOR DC

### TUGAS AKHIR


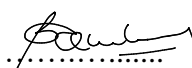

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**RICKY GIOVANNI PRATAMA**

**NRP. 02311640000146**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.  (Pembimbing)
2. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T  (Ketua Penguji)
3. Moh. Kamalul Wafi, S.T., M.Sc.DIC  (Penguji I)

**SURABAYA**

**2020**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# PERANCANGAN *PARTICLE FILTERING* SEBAGAI ESTIMATOR KECEPATAN PADA MOTOR DC

Nama : Ricky Giovanni Pratama  
NRP : 02311640000146  
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

## ABSTRAK

Proyeksi kebutuhan akan motor elektrik, motor DC dan motor induksi, meningkat 6,5% setiap tahunnya. Pada penelitian ini dikembangkan sebuah estimator yang dapat mengestimasi nilai kecepatan motor DC menggunakan informasi arus dan tegangan yang bernama *particle filtering* (PF). Bentuk pemodelan yang digunakan pada penelitian ini adalah *close loop*. Terdapat beberapa parameter yang dibutuhkan dalam perancangan PF yaitu jumlah partikel ( $N$ ), *initial guess of state value* ( $x_0$ ), kovarian awal ( $P_0$ ), kovarian *noise* sistem ( $Z$ ). Langkah yang digunakan dalam perancangan PF adalah inisiasi, *update* partikel, dan *resampling* partikel. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan nilai kecepatan dan arus antara nilai pemodelan (riil) dan nilai estimasi dengan menggunakan beberapa variasi jumlah partikel. Setiap respon yang dihasilkan dilakukan analisa pada saat kondisi *transien* dan kondisi *steady*. Nilai kecepatan riil yang dihasilkan saat kondisi *transien* dan *steady* secara berturut-turut adalah 1,902979448 rad/s dan 1,65431913233382 rad/s. Nilai arus riil yang dihasilkan saat kondisi *transien* dan *steady* secara berturut-turut adalah 19,2200768857066 A dan 16,8192574413653 A. Berdasarkan respon yang dihasilkan diketahui bahwa semakin besar jumlah partikel akan menghasilkan error yang semakin kecil.

**Kata Kunci:** Motor DC, *Particle Filtering*, *Steady*, *Transien*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## ***PARTICLE FILTERING DESIGN AS SPEED ESTIMATOR IN DC MOTOR***

***Name*** : Ricky Giovanni Pratama  
***NRP*** : 02311640000146  
***Department*** : Engineering Physics FTIRS - ITS  
***Supervisors*** : Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

### **ABSTRACT**

Projected demand for electric motors, DC motors and induction motors, an increase of 6.5% every year. In this study an estimator was developed that can estimate the value of the speed of a DC motor using current and voltage information called particle filtering (PF). The form of modeling used in this study is the close loop. There are several parameters needed in the design of PF, namely the number of particles (N), initial guess of state value ( $x_0$ ), initial covariance ( $P_0$ ), system noise covariance (Z). The steps used in the design of PF are initiation, particle update, and particle resampling. In this study a comparison of velocity and current value between the modeling value (real) and the estimated value using several variations in the number of particles. Each response produced is analyzed during transient and steady conditions. The real velocity values generated during transient and steady conditions are 1.902979448 rad / s and 1.65431913233382 rad / s, respectively. The real current value generated during transient and steady conditions are 19.222768857066 A and 16.8192574413653 A. Based on the response produced, it is known that the greater the number of particles will produce a smaller error.

***Keywords: DC Motor, Particle Filtering, Steady, Transien***

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan kasih-Nya sehingga dapat terselesaikannya Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Particle Filtering* Sebagai Estimator Kecepatan Pada Motor DC”

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 yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah dengan sabar memberikan ilmu serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D 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 Edward Sitorus dan Ibu Tarulibasa Sitompul) serta segenap keluarga atas kasih sayang dan dukungan dalam segala bentuk.
6. Kepada Syahrur Munir yang telah membantu dan membimbing penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.
7. Teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang minat Rekayasa Instrumentasi.
8. Kepada Reyner Erickson, David Anggoh, Raihan Nugroho, Michael Perwira, Fairuz Meidiana, Kholifah Nur, yang telah memberikan dukungan dan semangat tanpa henti
9. Teman-teman asisten Laboratorium Fisika Rekayasa.
10. Seluruh teman-teman angkatan 2016 yang turut memberikan dukungannya
11. Semua pihak yang terlibat dalam pengerjaan tugas akhir ini.

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

Surabaya, 21 Juni 2020

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

|  |      |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL.....                                       | i    |
| COVER PAGE.....  | iii  |
| LEMBAR PENGESAHAN .....                                  | vii  |
| LEMBAR PENGESAHAN .....                                  | ix   |
| ABSTRAK.....   | xi   |
| ABSTRACT.....  | xiii |
| KATA PENGANTAR .....                                     | xv   |
| DAFTAR ISI.....  | xvii |
| DAFTAR GAMBAR .....                                      | xix  |
| DAFTAR TABEL.....  | xx   |
| BAB I PENDAHULUAN.....                                   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang .....                                 | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                                | 2    |
| 1.3 Tujuan.....  | 2    |
| 1.4 Batasan Masalah.....                                 | 2    |
| 1.5 Sistematika Laporan .....                            | 2    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....            | 5    |
| 2.1 Motor DC .....                                       | 5    |
| 2.2 Prinsip Kerja Motor DC .....                         | 7    |
| 2.3 Model Matematik Motor DC.....                        | 8    |
| 2.4 <i>State Feedback</i> Dengan <i>Integrator</i> ..... | 11   |
| 2.5 Particle Filtering .....                             | 12   |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....                      | 15   |
| 3.1 Pemodelan Sistem Kontrol Motor DC .....              | 16   |

|                                   |   |    |
|-----------------------------------|---|----|
| 3.2                               | Perancangan Sistem Kontrol <i>State Feedback</i> .....                | 18 |
| 3.3                               | Perancangan Particle Filtering.....                                   | 19 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN ..... |   | 23 |
| 4.1                               | Hasil Pemodelan Motor DC .....  | 23 |
| 4.2                               | Hasil Perancangan <i>Particle Filtering</i> .....                     | 24 |
| 4.3                               | Pengujian Performansi <i>Particle Filtering</i> (PF) dengan RMSE..... | 30 |
| 4.4                               | Hasil Pemodelan Dengan Perubahan Tegangan.....                        | 31 |
| 4.5                               | Hasil Pemodelan Dengan Perubahan Matrik Kovarian.....                 | 36 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....  |   | 41 |
| 5.1                               | Kesimpulan.....   | 41 |
| 5.2                               | Saran.....  | 41 |
| DAFTAR PUSTAKA .....              |   | 43 |
| LAMPIRAN.....                     |   | 44 |
| BIODATA PENULIS .....             |   | 51 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 2.1</b> Motor DC.....   | 5  |
| <b>Gambar 2.2</b> Komponen Motor DC.....  | 7  |
| <b>Gambar 2. 3</b> Medan Magnet pada Konduktor .....                              | 8  |
| <b>Gambar 2.4</b> Rangkaian motor DC (Ogata, 2004).....                           | 8  |
| <b>Gambar 2.5</b> Diagram Blok Kontrol Sistem Pengendalian Tertutup.....          | 11 |
| <b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....                        | 15 |
| <b>Gambar 3.2</b> Diagram Blok Sistem Pengendalian .....                          | 17 |
| <b>Gambar 4.1</b> Respon Kecepatan Yang Dihasilkan Plant .....                    | 23 |
| <b>Gambar 4.2</b> Respon Arus Yang Dihasilkan Plant .....                         | 24 |
| <b>Gambar 4.3</b> Respon Kecepatan Motor DC Estimasi dan Riil saat $N=200$ .....  | 25 |
| <b>Gambar 4.4</b> Respon Arus Motor DC Estimasi dan Riil saat $N=200$ .....       | 26 |
| <b>Gambar 4.5</b> Respon Kecepatan Motor DC Estimasi dan Riil saat $N=500$ .....  | 27 |
| <b>Gambar 4.6</b> Respon Arus Motor DC Estimasi dan Riil saat $N=500$ .....       | 28 |
| <b>Gambar 4.7</b> Respon Kecepatan Motor DC Estimasi dan Riil saat $N=1000$ ..... | 29 |
| <b>Gambar 4.8</b> Respon Arus Motor DC Estimasi dan Riil saat $N=1000$ .....      | 30 |
| <b>Gambar 4.9</b> Respon Kecepatan Motor DC Dengan Fungsi Step 50 .....           | 32 |
| <b>Gambar 4.10</b> Respon Arus Motor DC Dengan Fungsi Step 50 .....               | 32 |
| <b>Gambar 4.11</b> Respon Kecepatan Motor DC Dengan Fungsi Step 100 .....         | 33 |
| <b>Gambar 4.12</b> Respon Arus Motor DC Dengan Fungsi Step 100 .....              | 34 |
| <b>Gambar 4.13</b> Respon Kecepatan Motor DC Dengan Fungsi Step 150 .....         | 34 |
| <b>Gambar 4.14</b> Respon Arus Motor DC Dengan Fungsi Step 150 .....              | 35 |
| <b>Gambar 4.15</b> Respon Kecepatan Motor DC Dengan Matrik Kovarian $0,5^2$ ..... | 36 |
| <b>Gambar 4.16</b> Respon Arus Motor DC Dengan Matrik Kovarian $0,5^2$ .....      | 37 |
| <b>Gambar 4.17</b> Respon Kecepatan Motor DC Dengan Matrik Kovarian 1.....        | 38 |
| <b>Gambar 4.18</b> Respon Arus Motor DC Dengan Matrik Kovarian 1.....             | 39 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabel 3.1</b> Parameter Motor DC .....   | 16 |
| <b>Tabel 3.2</b> Parameter <i>Particle Filtering</i> .....                                  | 20 |
| <b>Tabel 4.1</b> Data Performansi <i>Particle Filter</i> .....                              | 31 |
| <b>Tabel 4.2</b> Parameter Input Step .....   | 31 |
| <b>Tabel 4.3</b> Data Performansi <i>Particle Filter</i> Dengan Variasi Beban.....          | 36 |
| <b>Tabel 4.4</b> Data Performansi <i>Particle Filter</i> Dengan Variasi Matrik Kovarian.... | 40 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pada zaman modern ini manusia sangat bergantung pada motor listrik. Penggunaan motor listrik telah meliputi berbagai bidang mulai dari peralatan rumah tangga, peralatan industri, robot, pesawat, komputer dan alat elektronik lainnya yang membutuhkan motor listrik sebagai penggerak. Pengoperasian berkelanjutan motor listrik sangat penting dalam sebuah pabrik. Salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam pabrik industri adalah motor DC (*Direct Current*). Motor DC merupakan motor listrik yang disuplai dari catu daya tegangan searah atau tegangan bolak balik, dan juga merupakan suatu perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (David, 1989). Saat ini motor DC banyak digunakan sebagai aktuator dalam sistem kontrol dikarenakan memiliki karakteristik kontrol yang baik

Karena karakteristik kontrol kecepatannya yang baik, motor DC masih banyak digunakan di industri meskipun biaya perawatannya lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi. Kebutuhan akan motor elektrik merupakan kebutuhan pokok untuk memajukan suatu industri. Proyeksi kebutuhan akan motor elektrik di dunia meningkat 6.5% setiap tahunnya. Data ini menunjukkan bahwa motor elektrik, salah satunya motor DC, sangat berperan penting dalam kecepatan produksi dan kualitas (Wahid, 2016).

Pada sebuah pabrik yang didalam proses produksinya sudah saling terintegrasi satu sama lain, kesalahan pada suatu komponen akan sangat berdampak pada keseluruhan sistem. Dalam beberapa pabrik industri terdapat ribuan motor listrik yang bekerja secara bersamaan, jika terdapat salah satu motor listrik yang mengalami kerusakan tentu akan mengganggu proses produksi dan sangat merugikan perusahaan.

Dalam penggunaannya saat ini, motor DC sering kali bekerja dengan kecepatan yang bervariasi. Dibutuhkan informasi kecepatan yang akurat untuk menghasilkan kontrol kecepatan yang presisi sehingga sering kali digunakan sensor kecepatan. Penggunaan sensor kecepatan membutuhkan biaya tambahan, ruangan tambahan, dan perawatan yang rutin. Oleh karena itu saat ini mulai dikembangkan metode yang baru untuk mengestimasi kecepatan tanpa menggunakan sensor tambahan yaitu menggunakan

metode *particle filtering* atau juga yang dikenal sebagai *sequential monte carlo*. Untuk mengestimasi kecepatan yang dihasilkan dibutuhkan informasi berupa tegangan dan arus.

*Particle filtering* memiliki kemampuan untuk mengakomodasi dinamika nonlinear, yang mana motor DC menggunakan merupakan sistem nonlinear (Mansouri, M. 2013). Selain itu *particle filtering* mempresentasikan keadaan *posterior* PDF dengan sekumpulan sample acak atau disebut *particle* yang terdiri dari pembagian bobot dan menghitung estimasi berdasarkan sample dan bobot. Oleh karena fungsinya tersebut dibuatlah sebuah penelitian tugas akhir dengan judul Perancangan *Particle Filtering* Sebagai Estimator Kecepatan Pada Motor DC. Adapun hasil estimasi kecepatan yang dihasilkan oleh *particle filtering* akan dibandingkan dengan kecepatan yang dihasilkan plant.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang *particle filtering* untuk mengestimasi kecepatan pada motor DC ?
- b. Bagaimana perbandingan kecepatan yang dihasilkan oleh *plant* dengan *particle filtering*?

## 1.3 Tujuan

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

- a. Merancang *particle filtering* yang mampu mengestimasi kecepatan dengan menggunakan informasi arus dan tegangan pada motor DC
- b. Membandingkan kecepatan yang dihasilkan oleh plant dengan *particle filtering*

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Tipe motor DC yang digunakan yaitu DCM150F
- b. Pemodelan berdasarkan keadaan motor DC tanpa beban
- c. Pemodelan motor DC berdasarkan penelitian sebelumnya
- d. Parameter motor DC yang digunakan mengacu pada jurnal yang ada

## 1.5 Sistematika Laporan

Adapun sistematika penulisan laporan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. BAB I PENDAHULUAN



Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.

b. **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori *particle filtering* dan *state feedback*.

c. **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.

d. **BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

Pada bab IV ini berisi tentang analisis hasil perancangan *particle filtering* untuk mengestimasi nilai kecepatan.

e. **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Motor DC**

Motor DC (*Direct Current*) merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor dc memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam medan magnet maka akan timbul tegangan (GGL) yang berubah – ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak – balik. Prinsip kerja dari motor dc adalah bahwa arah medan magnet rotor selalu berusaha berada pada posisi yang berlawanan arah dengan arah medan magnet stator. Ini mengikuti sifat magnet bahwa jika magnet yang berlawanan arah didekatkan satu sama lain mereka akan saling tarik – menarik. Magnet yang searah akan saling tolak – menolak. Pada motor dc, daerah kumparan medan yang dialiri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar dengan arah tertentu.



**Gambar 2.1** Motor DC

Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya berlangsung melalui medan magnet. Dengan demikian medan magnet disini selain berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan energi, sekaligus sebagai tempat berlangsungnya perubahan energi. Agar proses perubahan energi dapat berlangsung

secara sempurna, maka tegangan sumber harus lebih besar dari ada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Untuk menjaga kontinuitas momen putar rotor maka arah medan magnet rotor harus menyesuaikan. Efek perubahan arah medan rotor dapat diciptakan dengan melakukan perubahan arah aliran arus yang mengalir dalam rangkaian jangkar. Perubahan aliran arus rotor ini dilakukan dengan menghubungkan rangkaian jangkar dengan sumber tegangan luar melalui sikat (brush) yang dilengkapi dengan komutator (Waroh, 2014).

### **2.1.1 Stator Motor DC**

Stator adalah bagian yang berfungsi sebagai rangkaian magnetik yang mempunyai sepasang kutub medan yang terpasang pada bagian dalam stator.

### **2.1.2 Rotor Motor DC**

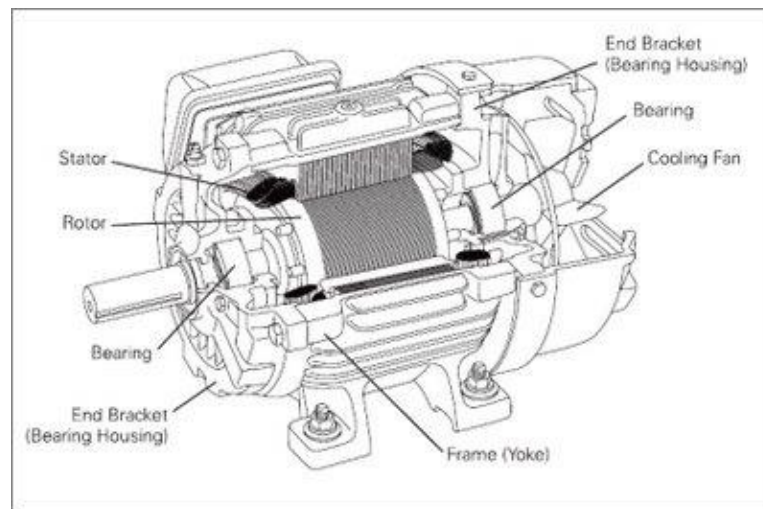
Rotor atau jangkar berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak dalam bentuk gerak putar. Jangkar terdiri dari poros baja dimana tumpukan keping-keping inti yang berbentuk silinder dijepit. Pada inti jangkar terdapat alur-alur dimana lilitan jangkar diletakkan.

### **2.1.3 Komutator**

Konstruksi dari komutator terdiri dari batangan tembaga yang dikeraskan (*drop forged*) yang diisolasi dengan sejenis mika. Fungsi komutator ini adalah mengumpulkan arus induksi dari konduktor jangkar dan mengkonversikan menjadi arus searah melalui sikat. Secara mekanik motor DC merupakan alat yang kompleks dan cenderung banyak persoalan. Beberapa jenis perawatan dibutuhkan pada saat menggunakan motor DC, pada beberapa pemakaian dengan lingkungan tertentu. Gesekan antara karbon dan komutator dapat menyebabkan arus jangkar yang dapat membahayakan.

### **2.1.4 Sikat (Brush)**

Sikat terbuat dari karbon, graphite, logam graphite atau campuran karbon dan grafit yang dilengkapi dengan pegas penekanan dan kontak sikatnya. Sikat biasanya dipasang dengan menumpangkannya pada sisi komutator untuk menyuplai listrik ke motor (Saputra, 2013).

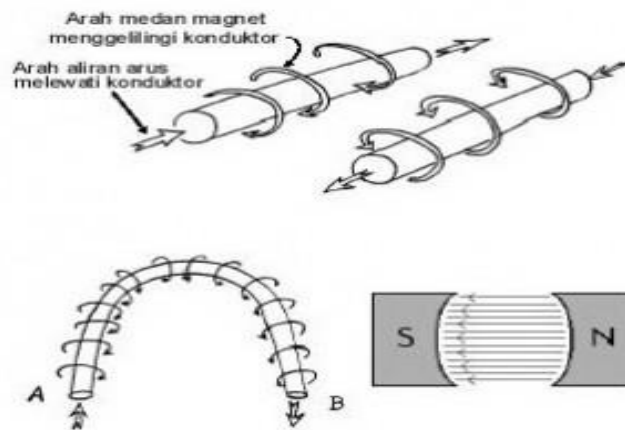


**Gambar 2.2** Komponen Motor DC

## 2.2 Prinsip Kerja Motor DC

Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Bagian utama motor DC adalah stator dan rotor dimana kumparan medan pada motor DC disebut stator dan kumparan jangkar disebut rotor. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputan bebas di antara kutub-kutub magnet permanen. Catu tegangan DC dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuk komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumpatan satu lilitas tersbut disebut angker dinamo. Angker dinamo adalah sebutan untuk komponen yang berputar diantara medan magnet.

Jika arus lewat pada suatu konduktor, timbul medan magnet di sekitar konduktor. Arah medan magnet ditentukan oleh arah aliran arus pada konduktor. Medan magnet yang membawa arus mengelilingi konduktor terlihat pada gambar 2.3. Medan magnet hanya terjadi di sekitar sebuah konduktor jika ada arus mengalir pada konduktor tersebut. Daerah kumparan medan yang dialliri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar dengan arah tertentu. Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik maupun sebaliknya berlangsung melalui medan magnet. Agar proses perubahan energi listrik menjadi energi mekanik dapat berlangsung secara sempurna, maka tegangan sumber harus lebih besar daripada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Dengan memberi arus pada kumparan jangkar yang dilindungi oleh medan magnet, maka akan menimbulkan perputaran pada motor (Rizki, 2010).

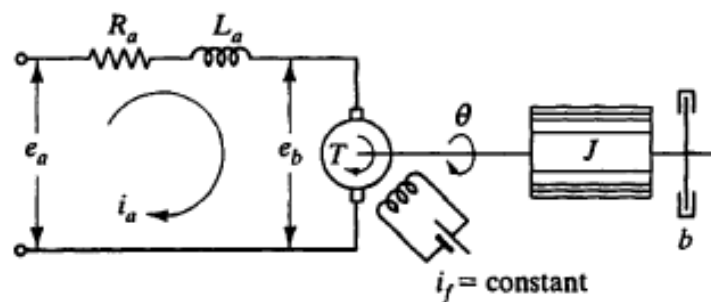


**Gambar 2. 3** Medan Magnet pada Konduktor

### 2.3 Model Matematik Motor DC

Motor DC merupakan sebuah rangkaian yang disusun dari berbagai macam komponen yang saling bekerja sama untuk menghasilkan sebuah output. Beberapa komponen yang terdapat dalam motor DC adalah stator, rotor, komutator, dan sikat.

Untuk bisa membangun sebuah sistem kendali dibutuhkan kemampuan dalam memodelkan sistem. Pemodelan dalam sebuah sistem dapat berupa persamaan differensial, fungsi transfer atau ruang keadaan (*state space*). Model matematik untuk *plant* motor DC didapatkan dari penjabaran pada bagian mekanik dan elektrik.



**Gambar 2.4** Rangkaian motor DC (Ogata, 2004)

Secara umum torsi yang dibangkitkan oleh motor DC berbanding lurus dengan hasil kali dari  $i_a$  dan  $\psi$  yang berbanding lurus dengan arus medan,

$$\psi = K_f i_f \quad (2.1)$$

sehingga torsi dapat dituliskan sebagai berikut,

$$T = K_f i_f K_t \cdot i_a \quad (2.2)$$

Dengan mengasumsikan nilai arus medan konstan, sehingga fluks yang dihasilkan juga menjadi konstan dan menyebabkan torsi mempunyai arah sesuai arus kumparan jangkar, sehingga persamaan 2.4 berubah menjadi

$$T = K_t \cdot i_a \quad (2.3)$$

Ketika gaya dibangkitkan akan timbul gaya gerak listrik balik  $e_b$  yang berbanding lurus dengan kecepatan rotasi motor  $\omega$ , atau

$$e_b = K_b \cdot \omega \quad (2.4)$$

Konstanta torsi motor dan gaya gerak listrik balik adalah sama, sehingga  $K_t = K_b$ ; dengan demikian dapat digunakan  $K$  untuk menyatakan keduanya. Pada bagian mekanik, rotor ( $J$ ) dan beban ( $b$ ) dapat disebut sebagai inersia dan gesekan viskositas, sehingga besarnya torsi dituliskan

$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = T = K \cdot i_a \quad (2.5)$$

Kecepatan kumparan jangkar servomotor dc dikendalikan oleh tegangan kumparan jangkar  $e_a$ , dimana  $e_a$  melewati rangkaian jangkar yang terdiri dari hambatan jangkar ( $R$ ) dan induktansi jangkar ( $L$ ), sehingga persamaan diferensial rangkaian kumparan jangkar menjadi,

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_b = e_a \quad (2.6)$$

Jika persamaan (2.4) disubstitusikan kedalam persamaan (2.6), persamaannya berubah menjadi,

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = V - K \cdot \omega \quad (2.7)$$

Dengan menggunakan transformasi laplace persamaan (2.7) dan (2.9) dapat diubah menjadi berikut,

$$Js\omega(s) + b\omega(s) = KI(s) \quad (2.8)$$

$$LsI(s) + RI(s) = V(s) - K\omega(s) \quad (2.9)$$

Dari persamaan (2.10) dapat dituliskan dalam bentuk  $I(s)$  menjadi,

$$I(s) = \frac{V(s) - K\omega(s)}{R + Ls} \quad (2.10)$$

Dan disubstitusikan ke persamaan (2.10), menjadi

$$Js\omega(s) + b\omega(s) = K \frac{(V(s) - K\omega(s))}{R + Ls} \quad (2.11)$$

Fungsi transfer dari masukan tegangan  $V(s)$  berbanding dengan kecepatan motor  $\omega(s)$  adalah

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{(R + Ls)(Js + b) + K.Kb} \quad (2.12)$$

Nilai  $L$  seringkali diabaikan karena nilainya yang sangat kecil apabila dibandingkan dengan  $R$ , maka

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{RJs + Rb + K.Kb} \quad (2.13)$$

Dari persamaan (2.5) dan (2.7) dapat dituliskan kedalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state-space*) untuk kecepatan motor DC dengan memilih kecepatan rotasi dan arus motor yang mengalir sebagai variabel keadaan, dan tegangan sebagai masukan serta arus sebagai keluaran:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} V \quad (2.14)$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

dengan :

$b$  = koefisien gesekan viskos ekivalen dari motor atau beban pada poros motor (N-m/rad/s)

$\Psi$  = Fluks

$K_f$  = konstanta fluks

$i_f$  = arus fluks (ampere)

$T$  = Torsi (N-m)

$K_t$  = Konstanta torsi motor

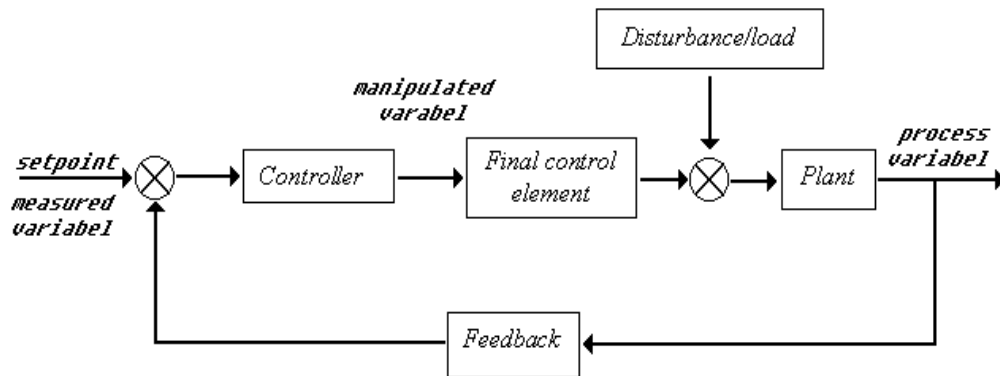
$K_b$  = konstanta emf balik



- R = Tahanan kumparan jangkar, (ohm)  
 J = Momen inersia eqivalen dari motor, (Kg.m<sup>2</sup>)  
 $\omega$  = Kecepatan rotasi, (rpm)  
 V = Tegangan input servo, (Volt)  
 ea = Tegangan yang dikenakan pada jangkar (volt)  
 eb = Gaya gerak listrik balik (volt)  
 L = Induktansi kumparan jangkar (henry)  
 $i_a$  = Arus kumparan jangkar (ampere)

#### 2.4 State Feedback Dengan Integrator

Sistem pengendalian adalah gabungan kerja dari beberapa komponen dengan tujuan untuk mempertahankan variabel yang dikendalikan pada nilai tertentu sehingga menghasilkan output yang diinginkan. Sistem pengendalian kecepatan pada sistem motor DC menggunakan sistem kontrol state feedback dengan integrator. Jika dalam suatu sistem ditambahkan dengan integrator maka dapat menghilangkan error steady state (Ogata, K, 1997).



**Gambar 2.5** Diagram Blok Kontrol Sistem Pengendalian Tertutup

$$u = K_p \cdot x + K_i \int e. dt \quad (2.16)$$

Dengan:

$u$  = Input Motor DC

$K_p$  = Gain Proportional

$K_i$  = Gain Integral

$x$  = State

Terdapat beberapa karakteristik respon dalam pengendalian *state feedback* yang juga harus diketahui dalam suatu sistem *closed loop* yaitu *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*.

- a. *maximum (percent) overshoot* adalah nilai puncak tertinggi respon sistem pengukuran terhadap keadaan yang diinginkan. Jika nilai *steady state* dari respon berbeda dengan nilai yang diinginkan, umumnya menggunakan *maximum percent overshoot* dengan persamaan :

$$\text{Maximum percent overshoot} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

- b. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai dan berada direntang  $\pm 5\%$  atau  $\pm 2\%$  dari keadaan yang diinginkan atau nilai akhir. (Ogata, 2010)
- c. *error steady state* adalah nilai *error* yang dihasilkan dari keadaan *steady* ketika belum mencapai *set point* yang diinginkan. (Ardhiantama, 2016)

## 2.5 Particle Filtering

*Particle filtering* atau juga yang sering dikenal sebagai metode *Sequential Monte Carlo* (SMC) adalah sebuah perhitungan rekursif dari distribusi probabilitas yang relevan dengan menggunakan konsep-konsep dari *importance sampling*, dan perkiraan distribusi probabilitas dengan menggunakan pengukuran diskrit acak (Petar, 2003). Prinsip dasar dari *particle filtering* adalah untuk merepresentasikan keadaan *posterior* PDF dengan sekumpulan sample acak atau biasa disebut *particle*, yang mana terdiri dari pembagian bobot dan untuk menghitung estimasi berdasarkan sample dan bobot (Shane, 2012). Dalam *particle filtering* sangat penting untuk membuat hipotesis dari setiap keadaan (*particle*) dengan sampling diskrit yang sesuai dengan kemungkinan yang terjadi. Setiap dari *particle* tersebut akan dilakukan pembobotan untuk mencirikan kualitas suatu partikel tertentu. Resampling akan dilakukan kembali untuk menseleksi beberapa *particle* yang memiliki nilai pembobotan lebih kecil dan begitu seterusnya disesuaikan dengan variabel yang diketahui.

Salah satu algoritma yang paling sering digunakan dalam *particle filtering* adalah *Sequential Importance Resampling* (SIR). Algoritma SIR memberikan estimasi optimal dari keadaan saat ini. Algoritma ini dapat dilakukan secara rekursif dan akan memberikan

estimasi optimal dari keadaan saat ini secara berurutan. Hasil dari SIS adalah perkiraan bobot untuk distribusi *posterior state*. (Shane, 2013). Adapun langkah – langkah pada *particle filter* adalah sebagai berikut :

### 1. Inisialisasi

Langkah pertama dalam perancangan *particle filtering* yaitu melakukan inisialisasi parameter *particle filter*. 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

Pada langkah ini setiap terjadi pembobotan ulang nilai setiap partikel. Nilai partikel selanjutnya didapatkan dengan cara mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai partikel sebelumnya. Sejumlah N partikel baru dibangkitkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$x_{p_t}^i \sim p(x_t | x_{t-1}^i), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.17)$$

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

$$\tilde{w}_t^i = p(y_t | x_{p_t}^i) \quad (2.18)$$

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

$$w_t^i = \frac{\tilde{w}_t^i}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}_t^i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.19)$$

### 3. Resampling partikel

Tahap ini dilakukan dengan tujuan untuk menseleksi partikel dengan bobot yang terendah. 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:

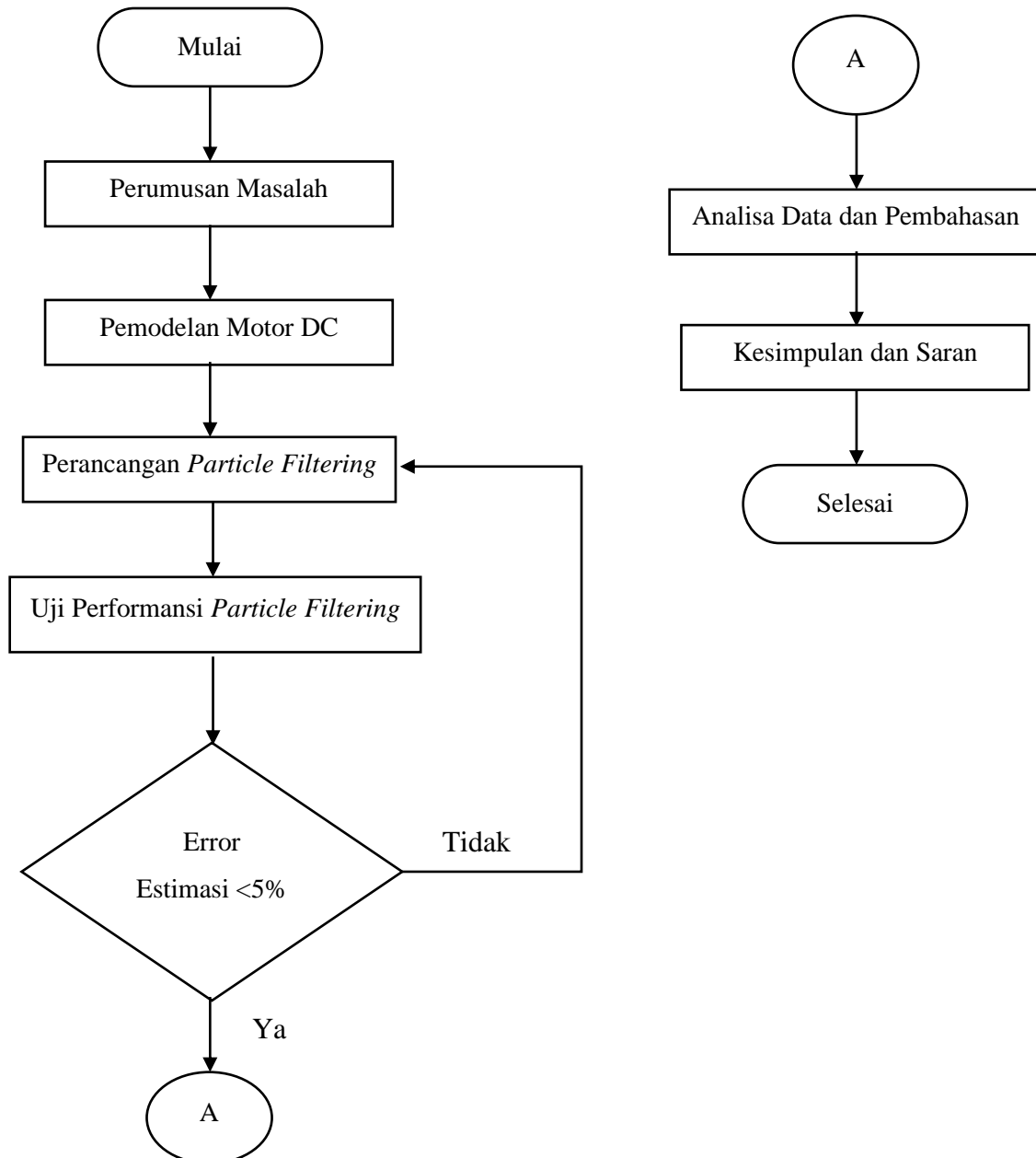
$$P = (x_t^i = x_t^k) = w_t^k, \quad k = 1, \dots, N \quad (2.20)$$

Kemudian kembali ke langkah 2.

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian. Berikut merupakan secara keseluruhan metode penelitian Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.1



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

### 3.1 Pemodelan Sistem Kontrol Motor DC

Pada sistem kontrol motor DC terdiri atas beberapa komponen yaitu plant motor DC, sensor yang digunakan berupa *tachometer* dan aktuator yang digunakan berupa *servoamplifier*.

#### 3.1.1 Plant Motor DC

Dari persamaan (2.15) diperoleh model matematik dari motor DC dengan nilai parameter motor DC didapatkan dari jurnal, dimana nilai parameter motor yang digunakan (Indriawati, 2015):

**Tabel 3.1** Parameter Motor DC

| No | Parameter | Variabel (Satuan)   | Nilai |
|----|-----------|---|-------|
| 1  | J         | Momen inersia ekuivalen dari motor, (Kg.m <sup>2</sup> )                              | 0,01  |
| 2  | b         | Koefisien gesekan viskos ekuivalen dari motor dan beban pada poros motor (N.m/rad.dt) | 0,1   |
| 3  | K         | Konstanta torsi motor   | 0,01  |
| 4  | R         | Tahanan kumparan jangkar (ohm)  | 1     |
| 5  | L         | Induktansi kumparan jangkar (henry)   | 0,5   |

Nilai parameter yang didapatkan dari jurnal kemudian di substitusi kedalam persamaan (2.15), sebagai berikut:

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{RJ_s + R_b + K \cdot K_b} \quad (3.1)$$

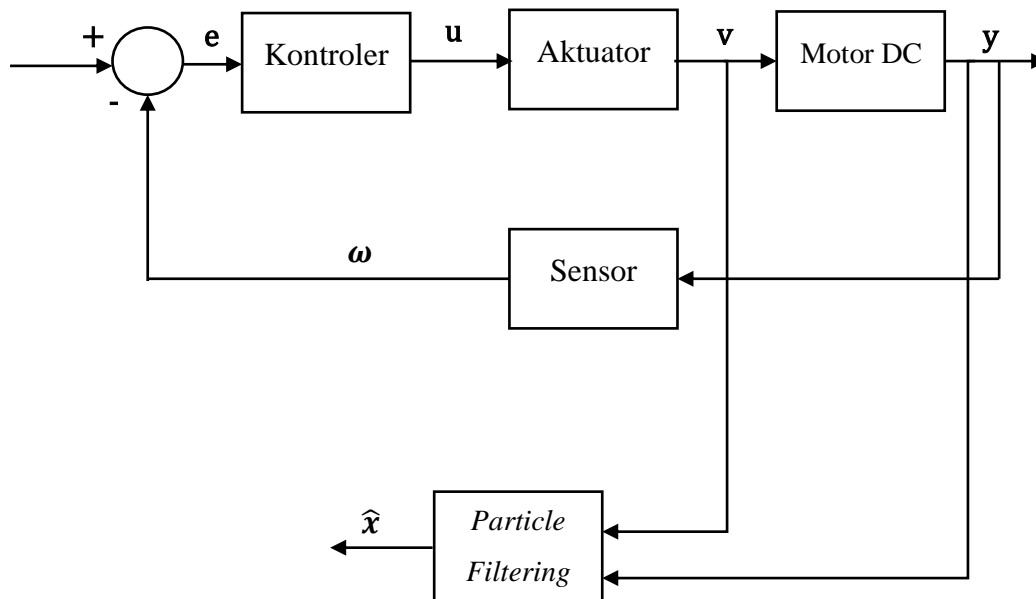
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{0.01}{(1)(0,01)s + (1)(0,1) + (0,01) \cdot (0,001)} \quad (3.2)$$

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{0,01s + 0,1 + 0,00001} \quad (3.3)$$

Dari fungsi transfer yang sudah didapatkan dapat disusun kedalam bentuk persamaan ruang keadaan untuk motor DC sesuai dengan persamaan (2.14) dan (2.15) yaitu sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10 & 1 \\ -0,02 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} V \quad (3.4)$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (3.5)$$



**Gambar 3.2** Diagram Blok Sistem Pengendalian

Dari Gambar 3.2 terlihat bahwa input dari *plant* motor DC yaitu berupa nilai tegangan, yang kemudian menghasilkan 2 variabel state  $x$  yaitu kecepatan ( $\omega$ ) dan arus ( $i$ ). Dari 2 variabel tersebut masuk kedalam sensor dan dihasilkan nilai kecepatan, yang mana variabel yang dikontrol pada sistem ini adalah kecepatan. Kemudian nilai kecepatan yang dihasilkan sensor akan dikurangi dengan nilai dari *set point* dan dihasilkan nilai *error*. Output yang dihasilkan dari kontroler berupa sinyal kontrol ( $u$ ) untuk masuk kedalam aktuator. Kemudian aktuator menghasilkan nilai tegangan ( $v$ ) yang menjadi input pada motor DC. Pada *particle filtering* dibutuhkan informasi berupa nilai tegangan dan arus, sehingga input *particle filtering* diambil dari output pada aktuator dan motor DC. Dikarenakan output yang dihasilkan motor DC adalah kecepatan dan arus, sehingga harus dikalikan dengan matriks  $C$  untuk menghasilkan hanya nilai arus saja. Pada pemodelan motor DC respon yang dihasilkan adalah bentuk kontinyu, sedangkan pada *particle filtering* dibutuhkan input dalam bentuk diskrit. Oleh karena itu seluruh input pada *particle filtering* diberikan *zero order hold* dengan nilai *time sampling* 0,01 untuk mengubah respon kontinyu menjadi diskrit.

### 3.1.2 Sensor *Tachometer*

Tachometer adalah perangkat elektronik yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Pengukuran yang dihasilkan menunjukkan revolusi per menit pada

skala analog meter. Tipe sensor yang digunakan dalam sistem kontrol ini adalah BD2510B.

### 3.1.3 Servo Amplifier

Aktuator yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor DC adalah *servo amplifier*. *Servo amplifier* merupakan rangkaian elektronik yang memiliki time constant yang lebih cepat dibandingkan dengan time constant plant sehingga time constant servo amplifier dapat diabaikan (H. Kohlmann, 2015).

## 3.2 Perancangan Sistem Kontrol State Feedback

Pada perancangan sistem kontrol ini menggunakan persamaan *state space* yaitu sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.6)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.7)$$

Dengan nilai  $x = \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix}$  dimana  $\omega$  adalah kecepatan dan  $i$  adalah arus, sedangkan output yang diinginkan melalui setpoint adalah kecepatan, sehingga

$$y_r = C_r \cdot x = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix} = \omega \quad (3.8)$$

Berdasarkan persamaan (3.6) dan (3.7) didapatkanlah matriks ruang keadaan untuk *state feedback* yaitu sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} -10 & 1 \\ -0,02 & -2 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}$$

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

$$D = 0$$

Dari persamaan (3.8) didapatkan persamaan error, yaitu sebagai berikut :

$$\dot{e} = \omega_{ref} - \omega \quad (3.9)$$

$$\dot{e} = \omega_{ref} - C_r \cdot x \quad (3.10)$$

$$\dot{e} = -\omega_{ref} + C_r \cdot x \quad (3.11)$$



Dengan menggabungkan persamaan (3.4) dan (3.11), maka diperoleh persamaan ruang keadaan untuk plant motor DC adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_{ref} \quad (3.12)$$

$$\dot{X}_c = A_c X_c + B_{cu} + D_c \cdot \omega_{ref} \quad (3.13)$$

$$\dot{X}_c = (A_c + B_c K_c) X_c + D_c \cdot \omega_{ref} \quad (3.14)$$

Dari persamaan tersebut didapatkan nilai matriks sebagai berikut:

$$A_c = \begin{bmatrix} -10 & 1 & 0 \\ -0.02 & -2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$D_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Untuk respon bisa mencapai nilai steady didapatkanlah nilai pole sebagai berikut:

$$\text{Pole ke-1} = -15 + 15i$$

$$\text{Pole ke-2} = -15 - 5i$$

$$\text{Pole ke-3} = -20$$

Dengan menggunakan metode pole placement sehingga diperoleh nilai gain pengendali state feedback yaitu sebagai berikut,

$$K_c = [K_p \quad K_i]$$

$$K_c = [224,99 \quad 19 \quad 2,5]$$

Sehingga didapatkanlah nilai:

$$K_p = [224,99 \quad 19]$$

$$K_i = [2,5]$$

### 3.3 Perancangan Particle Filtering

Perancangan *particle filtering* digunakan untuk mengestimasi kesalahan yang dihasilkan oleh aktuator. Pada algoritma *particle filtering* digunakan inputan dengan bentuk diskrit sehingga perlu adanya perubahan bentuk kontinyu yang dihasilkan plant

kedalam bentuk diskrit. Dengan menggunakan bentuk diskrit tersebut maka ada beberapa langkah dalam algoritma *particle filtering*, yaitu sebagai berikut:

**Tabel 3.2** Parameter *Particle Filtering*

| No | Nama  | Nilai                                     |
|----|---|---|
| 1. | Jumlah Partikel ( $N$ )                             | 200; 500; 1000                            |
| 2. | <i>Initial guess of state value</i><br>( $x_0$ )    | [0; 0;]                                   |
| 3. | Kovarian awal ( $P_0$ )                             | $I_2$                                     |
| 4. | Kovarian <i>noise</i> sistem ( $Q$ )                | $1.10^{-9}$                               |
| 5. | Matriks kovarian <i>noise</i><br>pengukuran ( $Z$ ) | [0,2 <sup>2</sup> 0; 0 0,2 <sup>2</sup> ] |

### 3.3.1 Inisialisasi

Pada tahap ini dilakukan beberapa inisiasi variabel-variabel yang digunakan dalam *particle filtering*. Inisiasi partikel dilakukan dengan cara memunculkan nilai  $N$  partikel. Setelah itu jumlah  $N$  partikel akan didistribusikan secara acak, Untuk  $i = 1, \dots, N$ :

$$x_{p0}(i) = x_0(i) + p, \quad p \sim \mathcal{N}(0, P_0) \quad (3.15)$$

### 3.3.2 Update Particle

Pada tahap ini persamaan yang memiliki input acak (*random*) menghasilkan output yang *random* juga, sehingga tahap ini dilakukan dengan tujuan untuk membuat partikel baru dengan cara mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai sebelumnya. Pada *update particle* dibuat set partikel transisi baru dengan mendistribusikan setiap partikel yang ada berdasarkan nilai partikel sebelumnya:

$$x_p(i) = A_d x(i) + B_d \cdot u \cdot w, \quad w \sim \mathcal{N}(0, Q) \quad (3.16)$$

$$y_p(i) = C_d x_p(i) \quad (3.17)$$

Kemudian dilakukan pembobotan pada setiap partikel, dimana partikel yang memiliki probabilitas terbesar akan memiliki bobot yang lebih besar. Pembobotan partikel didapatkan dengan menggunakan persamaan:

$$\tilde{w}(i) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{y - y_p(i)}{R} \right)^2} \quad (3.18)$$

Selanjutnya bobot dinormalisasi berdasarkan total seluruh bobot yang sudah ada, dengan menggunakan persamaan:

$$w(i) = \frac{\tilde{w}(i)}{\sum_{i=1}^N \tilde{w}(i)} \quad (3.19)$$

Setelah diketahui nilai bobot dari masing-masing partikel, dapat dilakukan estimasi. 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:

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^N w(i) \cdot x_p(i) \quad (3.20)$$

### 3.3.3 Resampling

Pada tahap ini dilakukan penghilangan beberapa partikel dengan bobot yang paling 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:

$$cs(k) = cs(k - 1) + w(k) \quad (3.21)$$

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

$$u(j) = \frac{(j - 1) + \tilde{u}}{M}, \quad \tilde{u} \sim \mathcal{U}(0,1) \quad (3.22)$$

Dengan  $M$  merupakan panjang vektor  $w$ . Apabila nilai  $cs(k)$  kurang dari sampel acak  $u(j)$  maka akan *looping* ke persamaan (3.19) 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 (3.22) dengan nilai  $j$

selanjutnya. Proses resampling akan berhenti saat indeks  $j$  lebih besar dari  $M$ . Sehingga didapatkan persamaan berikut:

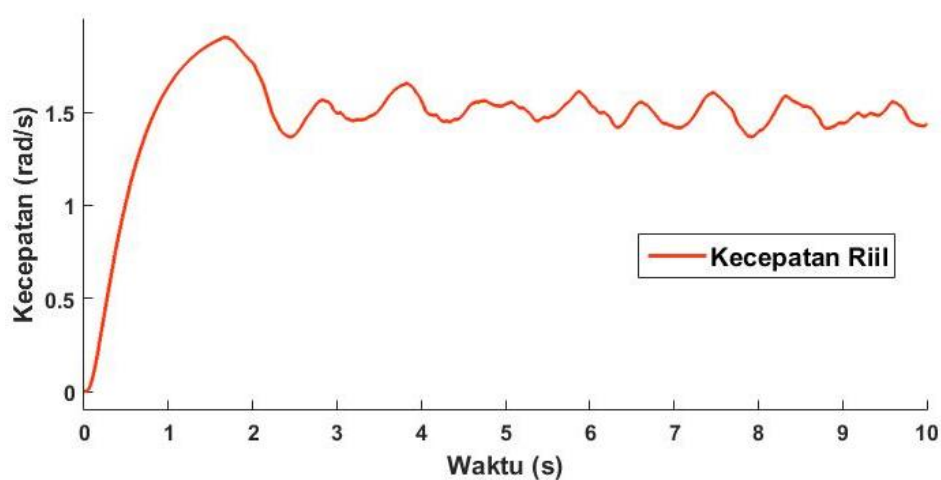
$$x(i) = x_p(k) \tag{3.23}$$

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

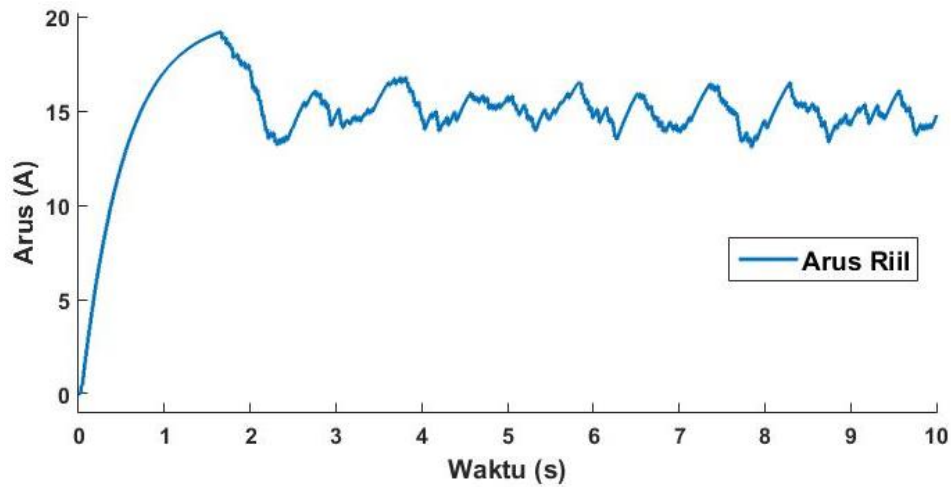
#### 4.1 Hasil Pemodelan Motor DC

Berdasarkan hasil pemodelan motor DC pada *software* MATLAB didapatkan nilai berupa arus dan kecepatan. Adapun dari pemodelan yang telah dilakukan didapatkan respon sebagai berikut:



**Gambar 4.1** Respon Kecepatan Yang Dihasilkan Plant

Berdasarkan hasil pemodelan yang telah dilakukan, didapatkan output *plant* motor DC berupa variabel state space yaitu kecepatan dan arus. Adapun respon kecepatan yang dihasilkan *plant* (riil) sesuai Gambar 4.1. Pada Gambar 4.1 dapat dilihat output kecepatan mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 1,90297944844527 rad/s. Setelah itu nilai kecepatan yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,45 detik sehingga besarnya nilai kecepatan menjadi 1,36727713760558 rad/s. Setelah waktu 2,45 detik respon yang dihasilkan cukup stabil meskipun masih terjadi osilasi. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,654319132 rad/s pada waktu 3,82 detik.



**Gambar 4.2** Respon Arus Yang Dihasilkan Plant

Pada Gambar 4.2 respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang hampir serupa dengan respon kecepatan, hanya saja memiliki nilai yang berbeda. Respon arus yang dihasilkan *plant* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 19,2200768857066 A. Setelah itu nilai arus yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,31 detik sehingga besarnya nilai arus menjadi 13,1953086381525 A. Setelah waktu 2,31 detik respon yang dihasilkan cukup stabil meskipun masih terjadi osilasi. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,818732196141 A pada waktu 3,81 detik.

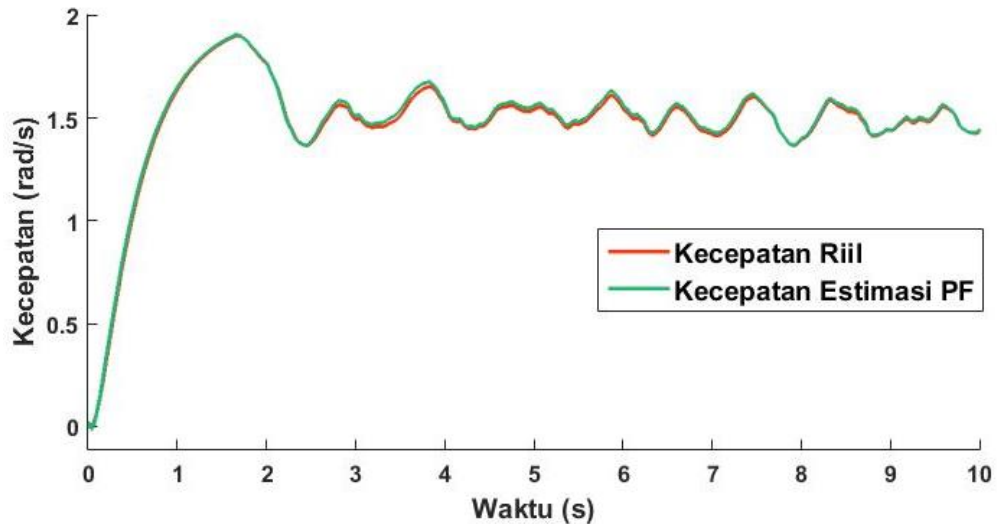
Berdasarkan data yang dihasilkan oleh respon kecepatan dan arus terlihat bahwa respon mengalami kondisi yang sama pada waktu yang sama. Hal tersebut menunjukkan bahwa kecepatan dan arus saling berhubungan satu sama lain.

## 4.2 Hasil Perancangan *Particle Filtering*

Pada penelitian ini akan dilakukan variasi jumlah partikel ( $N$ ) yaitu sebesar 200, 500, dan 1000.

### 4.2.1 *Particle Filtering* dengan Jumlah Partikel 200

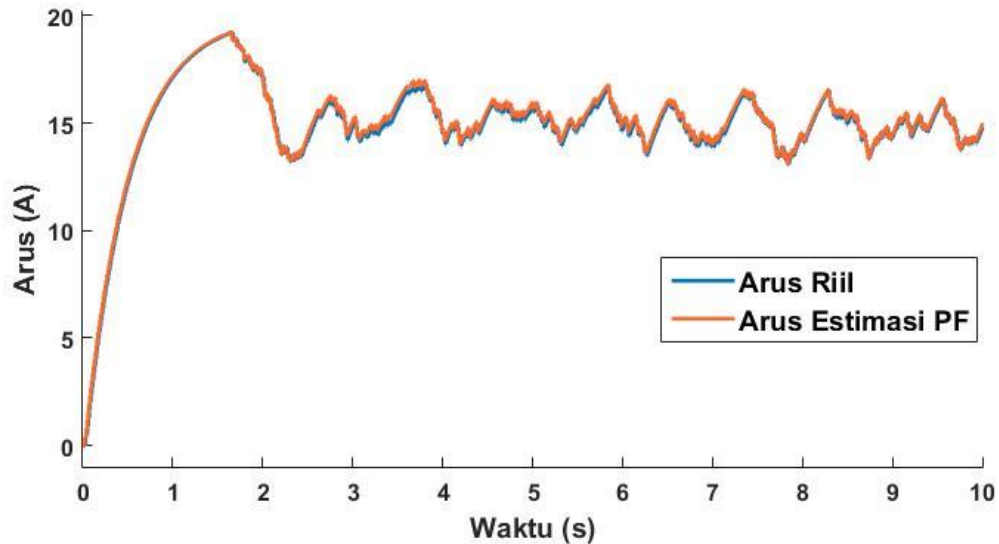
Adapun perancangan *particle filtering* dengan jumlah partikel sebesar 200 seperti pada gambar berikut :



**Gambar 4.3** Respon Kecepatan Motor DC Estimasi dan Riil saat  $N=200$

Pada Gambar 4.3 terlihat respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon kecepatan hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 1,90745844528548 rad/s. Setelah itu nilai kecepatan yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,45 detik sehingga besarnya nilai kecepatan menjadi 1,36914036485065 rad/s. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,67669387224016 rad/s pada waktu 3,82 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon kecepatan riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 1,90297944844527 rad/s dan 1,90745844528548 rad/s. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,654319132 rad/s dan 1,67669387224016 rad/s.



**Gambar 4.4** Respon Arus Motor DC Estimasi dan Riil saat  $N=200$

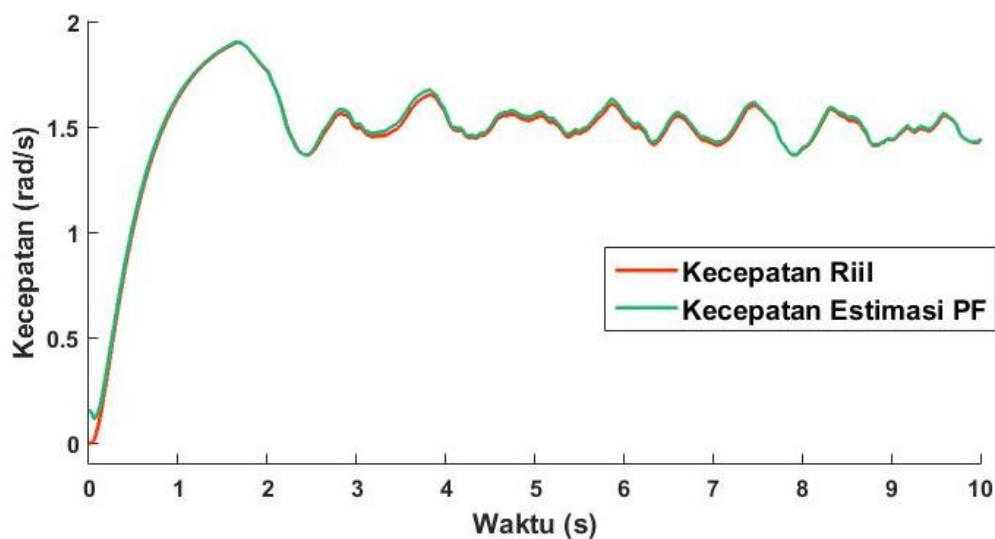
Pada Gambar 4.4 terlihat respon arus yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon arus hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 18,855971380017 A. Setelah itu nilai arus yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,31 detik sehingga besarnya nilai arus menjadi 13,2896063788282 A. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,6689384664472 A pada waktu 3,81 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon arus riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 19,2200768857066 A dan 18,855971380017 A. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,818732196141 A dan 16,6689384664472 A.

#### 4.2.2 Particle Filtering dengan Jumlah Partikel 500

Adapun perancangan *particle filtering* dengan jumlah partikel sebesar 500 seperti pada gambar berikut:

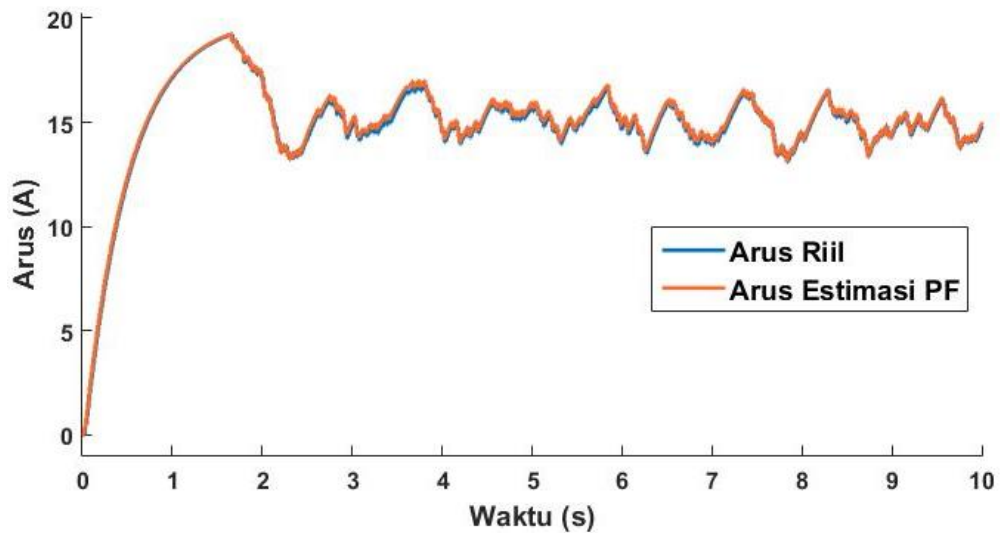




**Gambar 4.5** Respon Kecepatan Motor DC Estimasi dan Riil saat  $N=500$

Pada Gambar 4.5 terlihat respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon kecepatan hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 1,9074646423526 rad/s. Setelah itu nilai kecepatan yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,45 detik sehingga besarnya nilai kecepatan menjadi 1,36913274926072rad/s. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,67668901504404 rad/s pada waktu 3,82 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon kecepatan riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 1,90297944844527 rad/s dan 1,9074646423526 rad/s. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,654319132 rad/s dan 1,67668901504404 rad/s.



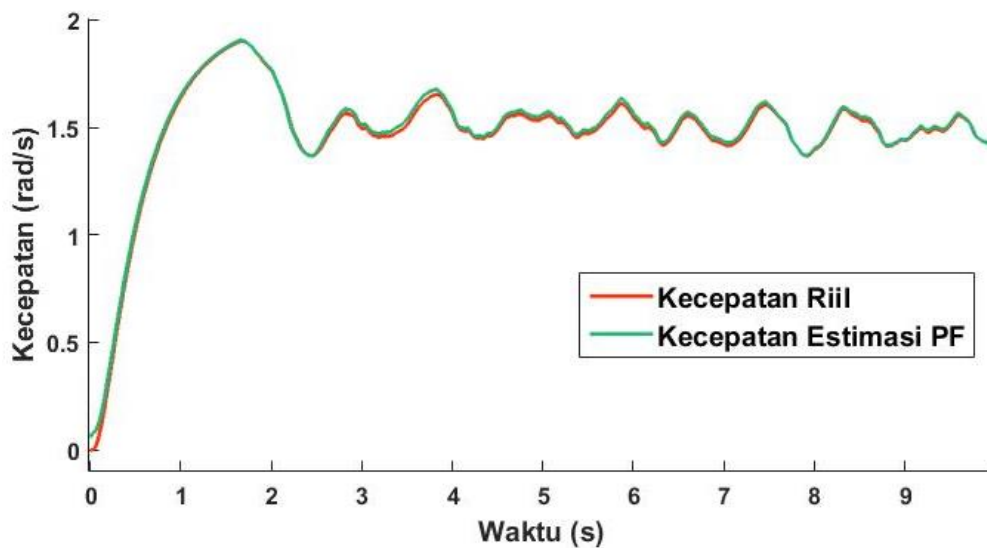
**Gambar 4.6** Respon Arus Motor DC Estimasi dan Riil saat  $N=500$

Pada Gambar 4.6 terlihat respon arus yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon arus hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 18,8559479788872 A. Setelah itu nilai arus yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,31 detik sehingga besarnya nilai arus menjadi 13,2895810325057 A. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,6689337289262 A pada waktu 3,81 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon arus riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 19,2200768857066 A dan 18,8559479788872 A. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,818732196141 A dan 16,6689337289262 A.

#### 4.2.3 *Particle Filtering* dengan Jumlah Partikel 1000

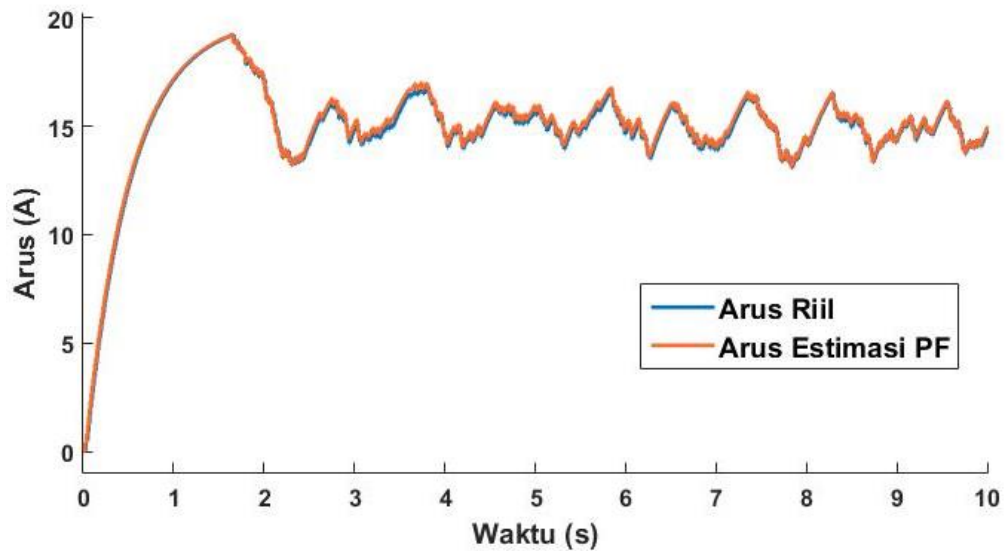
Adapun perancangan *particle filtering* dengan jumlah partikel sebesar 1000 seperti pada gambar berikut :



**Gambar 4.7** Respon Kecepatan Motor DC Estimasi dan Riil saat  $N=1000$

Pada Gambar 4.7 terlihat respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon kecepatan hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 1,90745692878176 rad/s. Setelah itu nilai kecepatan yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,45 detik sehingga besarnya nilai kecepatan menjadi 1,36913456998765 rad/s. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,67669465475881 rad/s pada waktu 3,82 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon kecepatan riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 1,90297944844527 rad/s dan 1,90745692878176 rad/s. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,654319132 rad/s dan 1,67669465475881 rad/s.



**Gambar 4.8** Respon Arus Motor DC Estimasi dan Riil saat  $N=1000$

Pada Gambar 4.8 terlihat respon arus yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon arus hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 18,8558974934868 A. Setelah itu nilai arus yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,31 detik sehingga besarnya nilai arus menjadi 13,2895841941494 A. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,6689338885155 A pada waktu 3,81 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon arus riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 19,2200768857066 A dan 18,8558974934868 A. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,818732196141 A dan 16,6689338885155 A.

### 4.3 Pengujian Performansi *Particle Filtering* (PF) dengan RMSE

Berdasarkan hasil percobaan yang telah dilakukan menggunakan jumlah partikel yang berbeda, maka dihasilkan respon estimasi pada kecepatan dan arus yang berbeda. Besarnya nilai error atau selisih antara respon yang dihasilkan *plant* dan *particle filter* berbeda di setiap detiknya, sehingga digunakan sebuah pengujian

menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE mampu mengukur besarnya selisih nilai antara hasil estimasi dan nilai riil secara keseluruhan. Berdasarkan data respon yang telah didapatkan diketahui nilai RSME dari masing-masing variabel adalah sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Data Performansi *Particle Filter*

| No | Jumlah Partikel | RMSE              |                   |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|
|    |                 | $\omega$          | $ia$              |
| 1  | 200             | 0,019345906725134 | 0,210810203226730 |
| 2  | 500             | 0,015456592153004 | 0,210028748150831 |
| 3  | 1000            | 0,014885419307733 | 0,200890489197330 |

Berdasarkan data pada Tabel 4.1 diketahui bahwa nilai RMSE terkecil dari respon kecepatan adalah pada saat jumlah partikel 1000 dan nilai terbesar adalah pada saat jumlah partikel 200. Hal tersebut juga sama terjadi pada respon arus, dimana nilai RMSE terkecil didapatkan pada saat jumlah partikel 1000 dan nilai terbesar didapatkan pada saat jumlah partikel 200.

#### 4.4 Hasil Pemodelan Dengan Perubahan Tegangan

Adanya perubahan nilai tegangan pada *plant* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perubahan respon yang dihasilkan antara hasil estimasi *particle filtering* dengan nilai riil. Perubahan nilai tegangan dilakukan dengan penambahan fungsi *step* dengan parameter sebagai berikut.

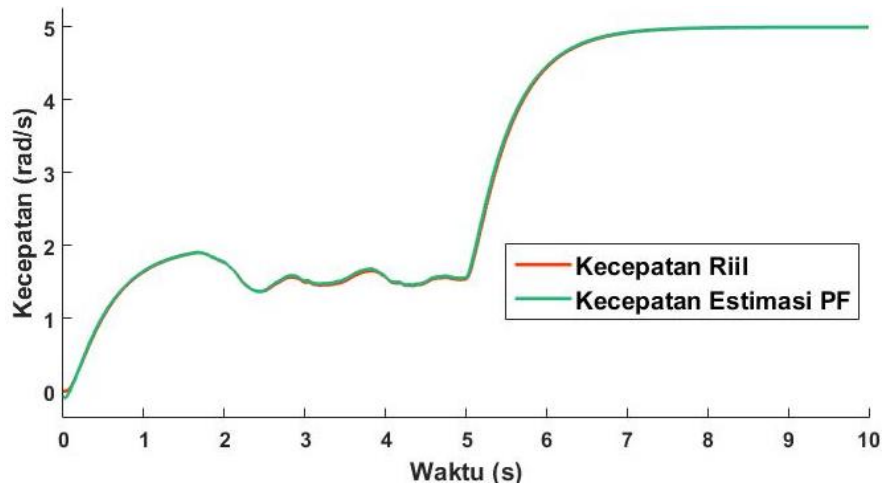
**Tabel 4.2** Parameter Input Step

| No | Nama          | Nilai      |
|----|---------------|------------|
| 1. | Step Time     | 5          |
| 2. | Initial Value | 0          |
| 3. | Final Value   | 50;100;150 |
| 4. | Sample Time   | 0,01       |

Berdasarkan parameter pada Tabel 4.2 dilakukan penambahan nilai tegangan pada detik ke-5 sebesar 50, 100 dan 150 V. Hal tersebut menyebabkan terjadinya perubahan respon yang dihasilkan oleh *plant* dan *particle filtering*.

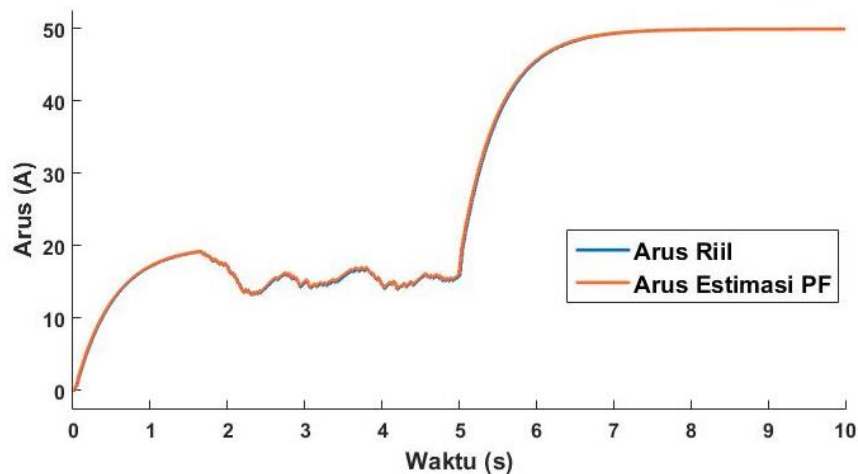
#### 4.4.1 Particle Filtering dengan Penambahan Beban 50

Adapun perancangan *particle filtering* dengan penambahan beban sebesar 50 seperti pada gambar berikut:



**Gambar 4.9** Respon Kecepatan Motor DC Dengan Fungsi Step 50

Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan pemodelan dan estimasi pada Gambar 4.9 memiliki bentuk yang sama dengan respon kecepatan yang sebelumnya, namun perbedaannya adalah bahwa pada waktu 5 detik terjadi peningkatan nilai kecepatan pada respon riil dan estimasi secara berturut-turut adalah 1,54421060844741 rad/s dan 1,56414496669237 rad/s. Setelah detik ke-5 nilai respon kecepatan terus meningkat mendekati nilai 5 rad/s. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,019324081331570.

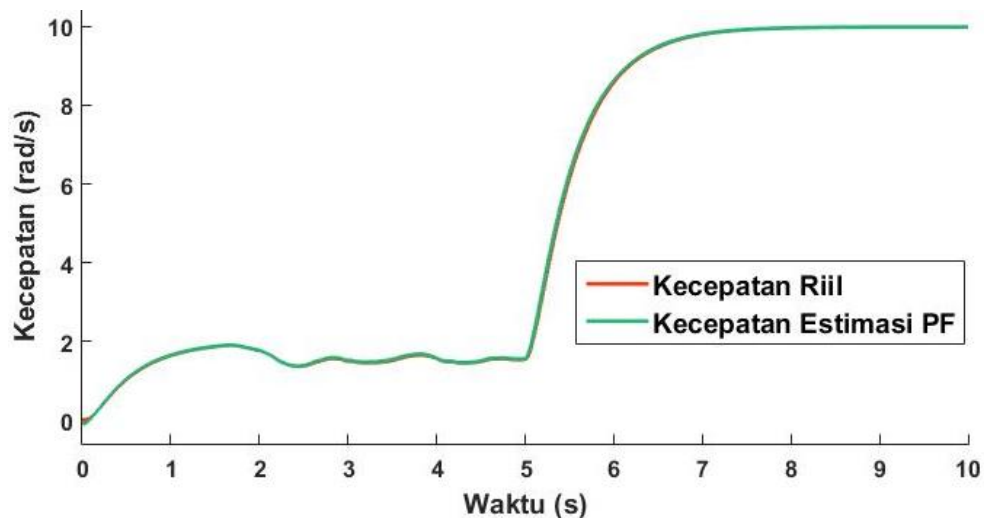


**Gambar 4.10** Respon Arus Motor DC Dengan Fungsi Step 50

Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa respon arus yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan pemodelan dan estimasi pada Gambar 4.10 memiliki bentuk yang sama dengan respon arus yang sebelumnya, namun perbedaannya adalah bahwa pada waktu 5 detik terjadi peningkatan nilai arus pada respon riil dan estimasi secara berturut-turut adalah 15,8051316960838 A dan 16,6674790519813 A. Setelah detik ke-5 nilai respon arus terus meningkat mendekati nilai 50 A. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,229065427010764.

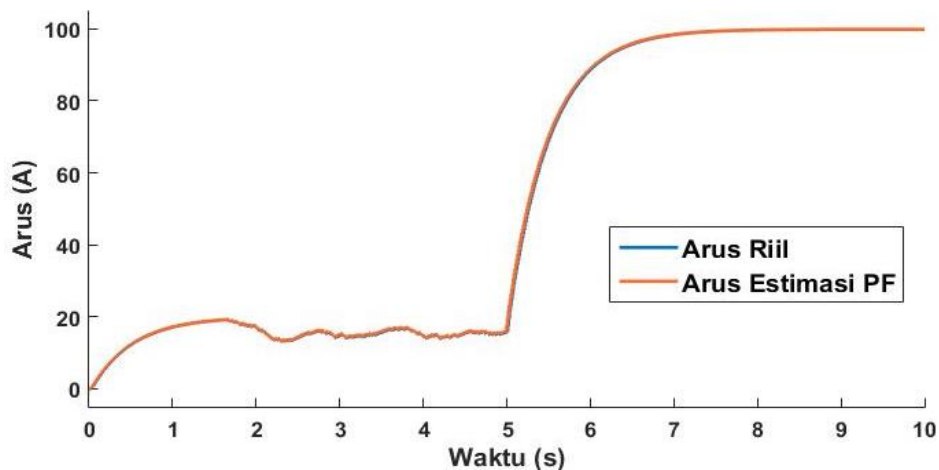
#### 4.4.2 Particle Filtering dengan Penambahan Beban 100

Adapun perancangan *particle filtering* dengan penambahan beban sebesar 100 seperti pada gambar berikut:



**Gambar 4.11** Respon Kecepatan Motor DC Dengan Fungsi Step 100

Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan pemodelan dan estimasi pada Gambar 4.11 memiliki bentuk yang sama dengan respon kecepatan yang sebelumnya, namun perbedaannya adalah bahwa pada waktu 5 detik terjadi peningkatan nilai kecepatan pada respon riil dan estimasi secara berturut-turut adalah 1,54421060844741 rad/s dan 1,56414537550674 rad/s. Setelah detik ke-5 nilai respon kecepatan terus meningkat mendekati nilai 10 rad/s. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,037286558951057.

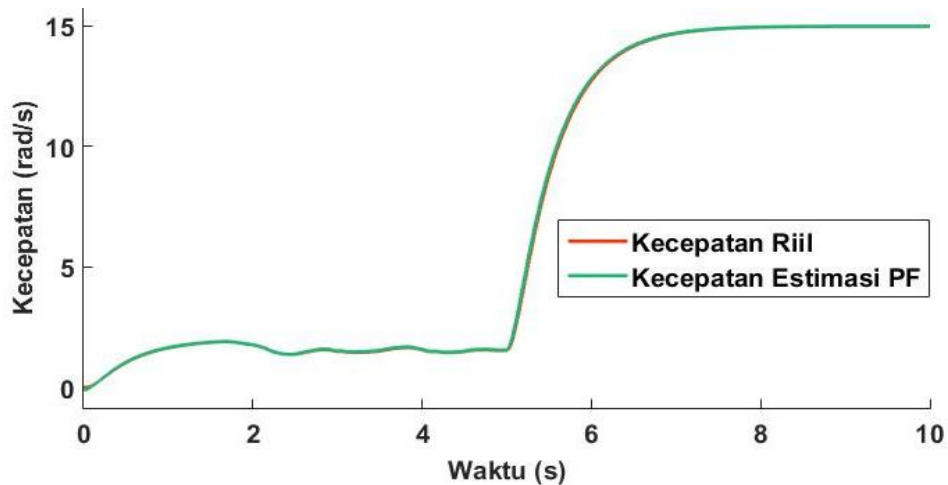


**Gambar 4.12** Respon Arus Motor DC Dengan Fungsi Step 100

Pada Gambar 4.12 terlihat bahwa respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan pemodelan dan estimasi pada Gambar 4.12 memiliki bentuk yang sama dengan respon kecepatan yang sebelumnya, namun perbedaannya adalah bahwa pada waktu 5 detik terjadi peningkatan nilai kecepatan pada respon riil dan estimasi secara berturut-turut adalah 15,8051316960838 A dan 17,6674832665177 A. Setelah detik ke-5 nilai respon kecepatan terus meningkat mendekati nilai 100 A. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,401106175868885.

#### 4.4.3 Particle Filtering dengan Penambahan Beban 150

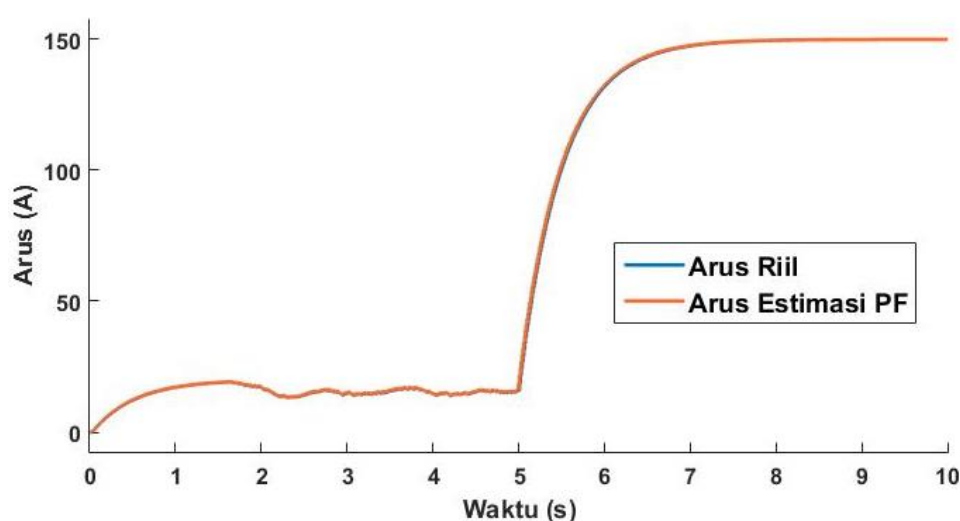
Adapun perancangan *particle filtering* dengan penambahan beban sebesar 150 seperti pada gambar berikut:



**Gambar 4.13** Respon Kecepatan Motor DC Dengan Fungsi Step 150



Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan pemodelan dan estimasi pada Gambar 4.13 memiliki bentuk yang sama dengan respon kecepatan yang sebelumnya, namun perbedaannya adalah bahwa pada waktu 5 detik terjadi peningkatan nilai kecepatan pada respon riil dan estimasi secara berturut-turut adalah 1,54421060844741 rad/s dan 1,56414537550674 rad/s. Setelah detik ke-5 nilai respon kecepatan terus meningkat mendekati nilai 15 rad/s. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,057649039905697.



**Gambar 4.14** Respon Arus Motor DC Dengan Fungsi Step 150

Pada Gambar 4.14 terlihat bahwa respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan pemodelan dan estimasi pada Gambar 4.14 memiliki bentuk yang sama dengan respon kecepatan yang sebelumnya, namun perbedaannya adalah bahwa pada waktu 5 detik terjadi peningkatan nilai kecepatan pada respon riil dan estimasi secara berturut-turut adalah 15,8051316960838 A dan 18,6674832665177 A. Setelah detik ke-5 nilai respon kecepatan terus meningkat mendekati nilai 150 A. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,618147091211991.

#### 4.4.4 Pengujian Performansi PF Dengan Variasi Beban

Berikut merupakan nilai RMSE dari masing-masing variasi beban berdasarkan nilai kecepatan dan arus.

**Tabel 4.3** Data Performansi *Particle Filter* Dengan Variasi Beban

| No | Beban | RMSE              |                   |
|----|-------|-------------------|-------------------|
|    |       | $\omega$          | $ia$              |
| 1  | 50    | 0,019324081331570 | 0,229065427010764 |
| 2  | 100   | 0,037286558951057 | 0,401106175868885 |
| 3  | 150   | 0,057649039905697 | 0,618147091211991 |

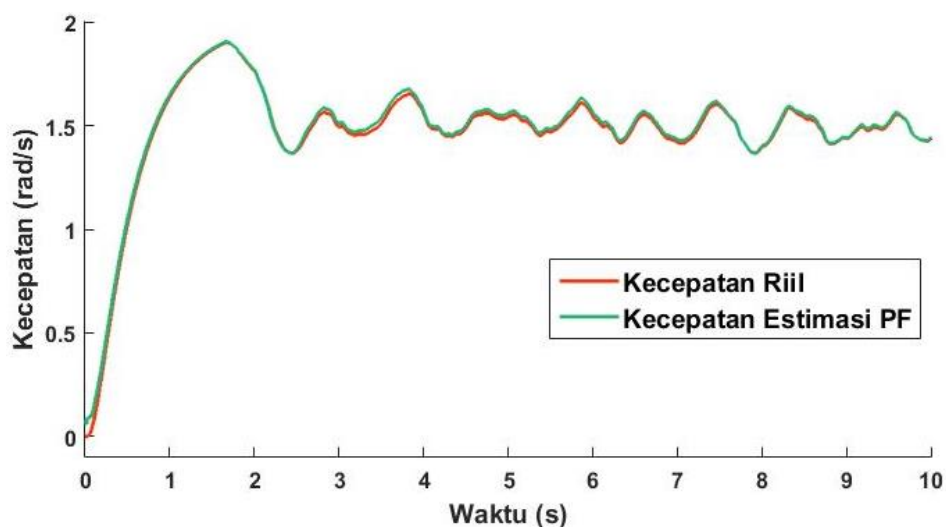
Berasarkan data pada tabel 4.3 terlihat bahwa nilai RMSE mengalami peningkatan ketika diberikan beban yang lebih besar. Nilai RMSE yang paling kecil terdapat pada beban 50 dan yang paling besar terdapat pada beban 150. Peningkatan nilai RMSE terjadi pada nilai kecepatan dan arus.

#### 4.5 Hasil Pemodelan Dengan Perubahan Matrik Kovarian

Adanya perubahan nilai matrik kovarian pada *plant* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perubahan respon yang dihasilkan antara hasil estimasi *particle filtering* dengan nilai riil. Terdapat tiga variasi matrik kovarian yang digunakan yaitu  $0,2^2$ ,  $0,5^2$ , 1. Percobaan dilakukan dengan menggunakan jumlah partikel sebesar 200.

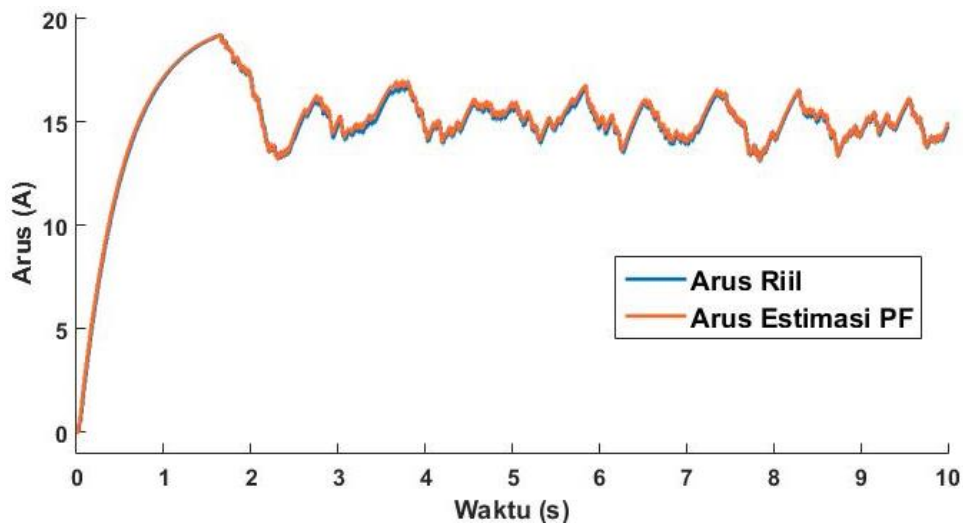
##### 4.5.1 *Particle Filtering* dengan Matrik Kovarian $0,5^2$

Adapun perancangan *particle filtering* dengan perubahan matrik kovarian menjadi  $0,5^2$  seperti pada gambar berikut:

**Gambar 4.15** Respon Kecepatan Motor DC Dengan Matrik Kovarian  $0,5^2$

Pada Gambar 4.15 terlihat respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon kecepatan hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 1,90751160970727 rad/s. Setelah itu nilai kecepatan yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,45 detik sehingga besarnya nilai kecepatan menjadi 1,36915111918171 rad/s. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,67669583594420 rad/s pada waktu 3,82 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon kecepatan riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 1,90297944844527 rad/s dan 1,90751160970727 rad/s. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,65431913233382 rad/s dan 1,67669583594420 rad/s. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,016617510499155.



**Gambar 4.16** Respon Arus Motor DC Dengan Matrik Kovarian  $0,5^2$

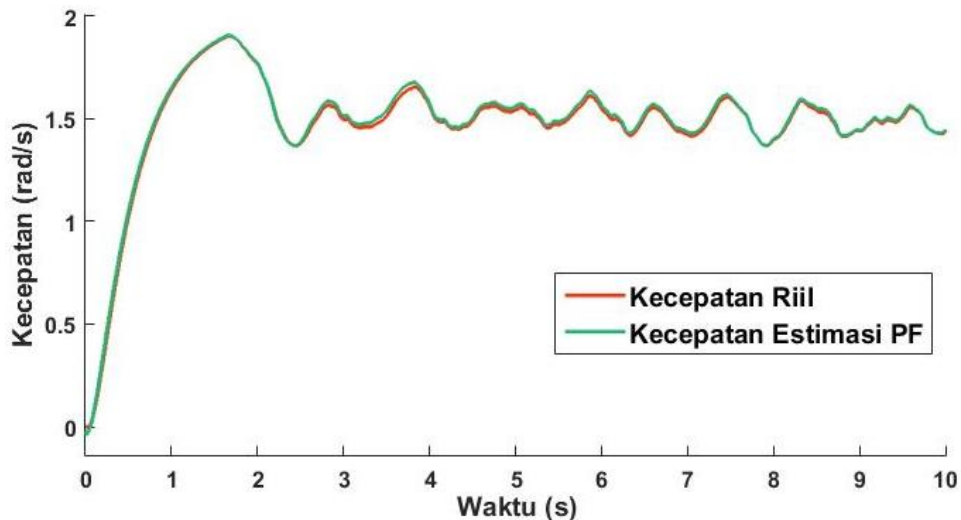
Pada Gambar 4.16 terlihat respon arus yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon arus hasil estimasi *particle filtering*

mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 18,8563964583790 A. Setelah itu nilai arus yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,31 detik sehingga besarnya nilai arus menjadi 13,2897204377488 A. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,6689547969699 A pada waktu 3,81 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon arus riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 19,2200768857066 A dan 18,8563964583790 A. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,8187321961410 A dan 16,6689547969699 A. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,211582905985005.

#### 4.5.2 Particle Filtering dengan Matrik Kovarian 1

Adapun perancangan *particle filtering* dengan perubahan matrik kovarian menjadi 1 seperti pada gambar berikut:

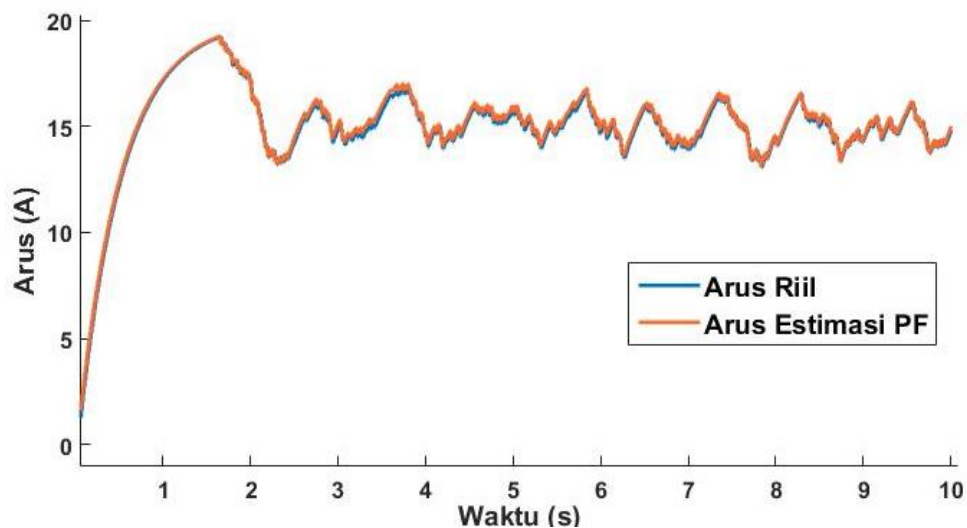


**Gambar 4.17** Respon Kecepatan Motor DC Dengan Matrik Kovarian 1

Pada Gambar 4.17 terlihat respon kecepatan yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon kecepatan hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 1,90760260122094 rad/s. Setelah itu nilai kecepatan

yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,45 detik sehingga besarnya nilai kecepatan menjadi 1,36916953309749 rad/s. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,67669698956323 rad/s pada waktu 3,82 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon kecepatan riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 1,90297944844527 rad/s dan 1,90760260122094 rad/s. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 1,65431913233382 rad/s dan 1,67669698956323 rad/s. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0.015637705076607.



**Gambar 4.18** Respon Arus Motor DC Dengan Matrik Kovarian 1

Pada Gambar 4.18 terlihat respon arus yang dihasilkan antara hasil pemodelan (riil) dan estimasi saling berhimpitan. Respon yang dihasilkan memiliki bentuk yang sama dimana pada awalnya respon mengalami kondisi *transien* sebelum mencapai keadaan *steady*. Pada respon arus hasil estimasi *particle filtering* mengalami perubahan nilai menuju *peak* dari waktu 0 detik sampai 1,66 detik dengan nilai sebesar 18,8571242464195 A. Setelah itu nilai arus yang dihasilkan kembali turun dari waktu 1,66 detik sampai waktu 2,31 detik sehingga besarnya nilai arus menjadi 13,2899159165093 A. Besarnya nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,6689642172635 A pada waktu 3,81 detik.

Dengan membandingkan data yang dihasilkan antara respon arus riil dan estimasi didapatkan nilai *peak* secara berturut turut yaitu 19,2200768857066 A dan 18,8571242464195 A. Kemudian nilai *peak* yang dihasilkan pada saat kondisi respon stabil adalah 16,8187321961410 A dan 16,6689642172635 A. Dengan menggunakan pengujian performansi RMSE didapatkan nilai sebesar 0,212774578468676.

#### 4.5.3 Pengujian Performansi PF Dengan Variasi Matrik Kovarian

Berikut merupakan nilai RMSE dari masing-masing variasi matrik kovarian berdasarkan nilai kecepatan dan arus.

**Tabel 4.4** Data Performansi *Particle Filter* Dengan Variasi Matrik Kovarian

| No | Matrik Kovarian | RMSE              |                   |
|----|-----------------|-------------------|-------------------|
|    |                 | $\omega$          | $ia$              |
| 1  | $0.2^2$         | 0,019345906725134 | 0,210810203226730 |
| 2  | $0.5^2$         | 0,016617510499155 | 0,211582905985005 |
| 3  | 1               | 0.015637705076607 | 0,212774578468676 |

Berasarkan data pada tabel 4.4 terlihat bahwa nilai RMSE pada variabel kecepatan mengalami penurunan ketika diberikan matrik kovarian yang lebih besar. Nilai RMSE terbesar berada pada saat matrik kovarian  $0.2^2$  dan terendah pada saat 1. Pada variabel kecepatan nilai RMSE mengalami penurunan ketika diberikan matrik kovarian yang lebih besar. Nilai RMSE terbesar berada pada saat matrik kovarian 1 dan terendah pada saat  $0.2^2$ .

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

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

- a. Perancangan estimator *particle filtering* yang mampu mengestimasi kecepatan membutuhkan informasi berupa arus dan tegangan.
- b. Berdasarkan hasil pengujian *particle filtering* menggunakan metode RMSE menggunakan tiga variasi jumlah partikel yaitu 200, 500 dan 1000 diketahui bahwa semakin besar jumlah partikel akan menghasilkan error yang semakin kecil.
- c. Hasil pengujian penambahan nilai beban dengan variasi 50, 100 dan 150 pada jumlah partikel 200 mengalami perubahan nilai RMSE. Semakin besar nilai beban menyebabkan terjadinya peningkatan nilai RMSE.
- d. Hasil pengujian perubahan nilai matik kovarian dengan variasi 0,2<sup>2</sup>, 0,5<sup>2</sup>, dan 1 pada jumlah partikel 200 mengalami perubahan nilai RMSE. Pada nilai kecepatan cenderung mengalami penurunan ketika diberikan matrik kovarian yang lebih besar, sedangkan pada nilai arus mengalami peningkatan ketika diberikan matrik kovarian yang lebih kecil.

#### **5.2 Saran**

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil pengujian ini untuk penelitian selanjutnya adalah :

- a. Mengimplementasikan estimator *particle filtering* pada plan motor DC secara langsung.
- b. Membutuhkan waktu yang lebih lama dalam pengujian jumlah partikel yang sesuai.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR PUSTAKA

- David, E., Schump. (1989). *Reliability Testing of Electring Motors*. IEEE Transactions On Industry Application, 25(3)
- 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.
- 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.
- Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control System*. USA: Prentice-Hall, Inc.
- Ogata, K. (2004). *System Dynamics*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Petar, M., Jayesh, H., Jianguai, Z., Yufei, H., Tadesse, G., Monica, F. B & Joaquin, M. (2003). “*Particle Filtering*”. IEEE Signal Processing Magazine, vol.20, no.5, pp. 19-38.
- Rizki, S. S. (2010). “Motor DC dan Aplikasinya di Kapal”. Pasca Sarjana ITS, Surabaya.
- Saputra, E. (2013). *Analisa Efisiensi Motor DC Seri Akibat Pergeseran Sikat*, vol.2, no. 3
- Shane, B. (2012). “*Prognostic Algorithms for Condition Monitoring and Remaining Useful Lifetime Estimation*”. Thesis Doctor of Philosophy in Faculty of Science and Engineering, National University of Ireland Maynooth.
- Wahid, A., Wahyu, T & Tri, W. (2016). Sistem Kontrol Torsi Pada Motor DC. *Indonesian Journal of Electronic and Instrumentation Systems*, 6(1), pp. 93-104.
- Waroh, A. P. (2014). *Analisa dan Simulasi Sistem Pengendalian Motor DC*. Jurnal Ilmiah Sains, pp 81-86.

## LAMPIRAN

### A. Kode Matlab

#### A.1 M File

```
J = 0.01;
b = 0.1;
Ke = 0.01;
R = 1;
Lin = 0.5;
Ts = 0.01;

A = [-b/J   Ke/J
      -Ke/Lin -R/Lin];
B = [0
      1/Lin];
C = [0  0; 0  1];
Cr = [1  0];
D = 0;
E = [1 0; 1 0];

nx=size(A,1);
ny=size(C,2);
nu=size(B,2);
nr=1;

Ac = [A,zeros(nx,nr);E(1:nr,:),zeros(nr)];
Bc = [B;0];
p1 = -15 + 5i;
p2 = -15 - 5i;
p3 = -20;
Kc = place(Ac,Bc,[p1 p2 p3]);
Kp = Kc(1:2);
Ki = Kc(3);

data1 = KecepatanEstimasi.signals.values(:,1);
data2 = KecepatanEstimasi.signals.values(:,2);
Error1 = data2-data1;
rmsekecepatan = sqrt(mean(Error1.^2));

data3 = ArusEstimasi.signals.values(:,1);
data4 = ArusEstimasi.signals.values(:,2);
Error2 = data4-data3;
rmsearus = sqrt(mean(Error2.^2));
```

#### A.2 M File Inisiasi Parameter *Particle Filtering*

```
N=200;
x0 = [0 0]';
P0 = 1*eye(2);
Q =[1e-9 0 ;
    0 1e-9 ];
Z = [0.2^2 0; 0 0.2^2];
nx=size(P0,2);
xp0 = repmat(x0,1,N)+sqrt(P0)*randn(nx,N);
```

### A.3 M File *Updating Particle Filtering*

```

N=200;
n=size(x,1);
xp=zeros(n,N);
for i=1:N
J = 0.01;
b = 0.1;
Ke = 0.01;
R = 1;
Lin = 0.5;
Ts = 0.01;
A = [-b/J    Ke/J
      -Ke/Lin -R/Lin];
B = [0
      1/Lin];
C = [1    0;0    1];

Ad = eye(2) + Ts*A;
Bd = Ts*B;
Cd=C;
xp(:,i)=Ad*x(:,i) + Bd*u+sqrt(Q)*randn(n,1);

end
e= repmat(y,1,N) - Cd*x;
w=exp(-(1/2)*(sum(e.*(Z\e)))));
wi=w/sum(w);
nx=size(Ad,2);
xhat=real(sum((repmat(wi,nx,1).*xp),2));

```

### A.4 M File *Resampling Particle Filtering*

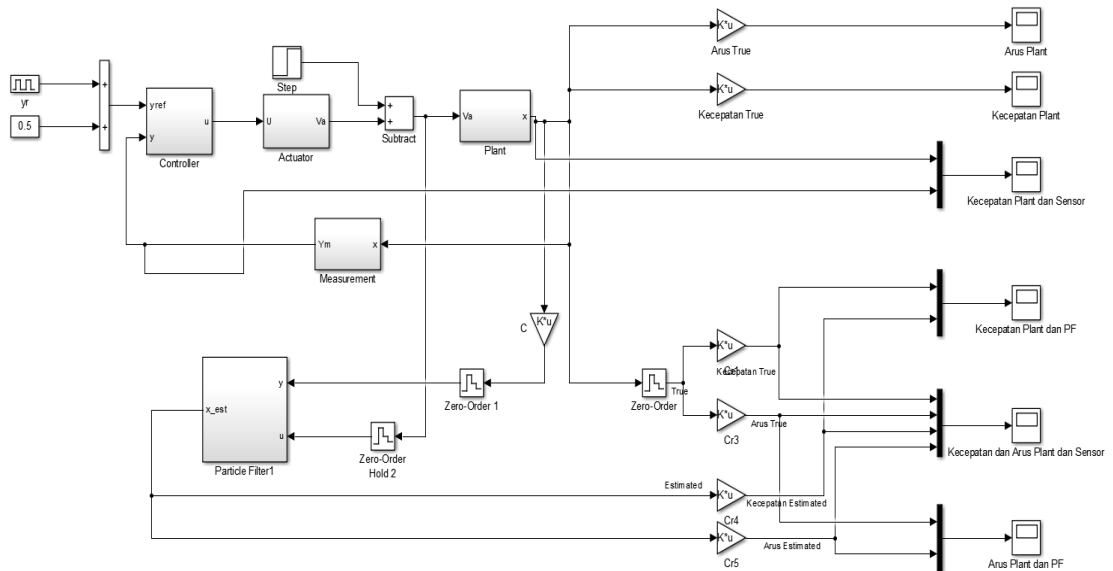
```

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

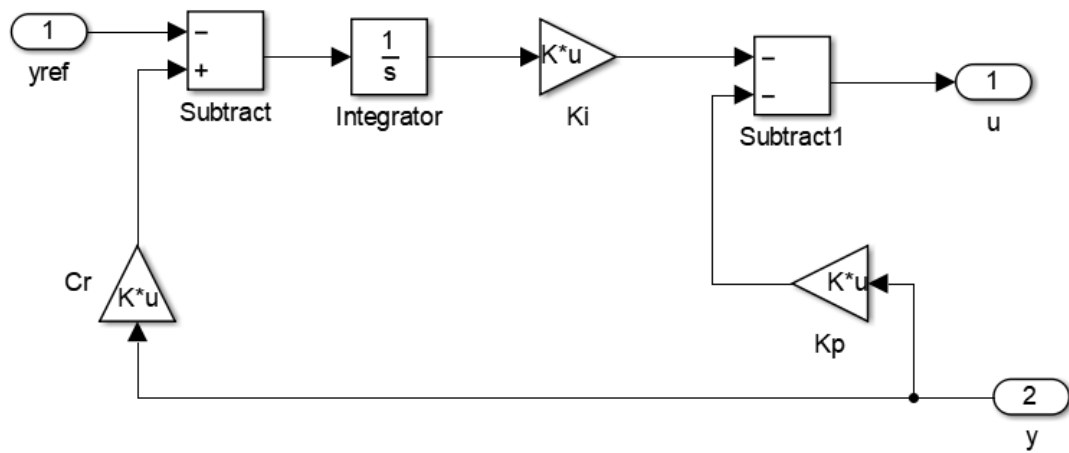
```

## B. Simulink Matlab 2015a

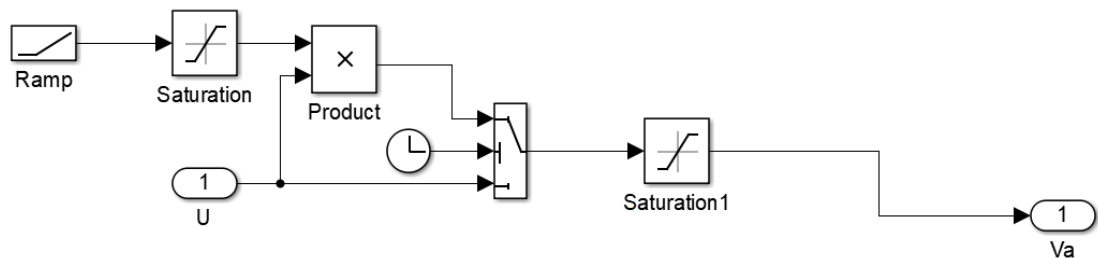
### B.1 Keseluruhan Sistem



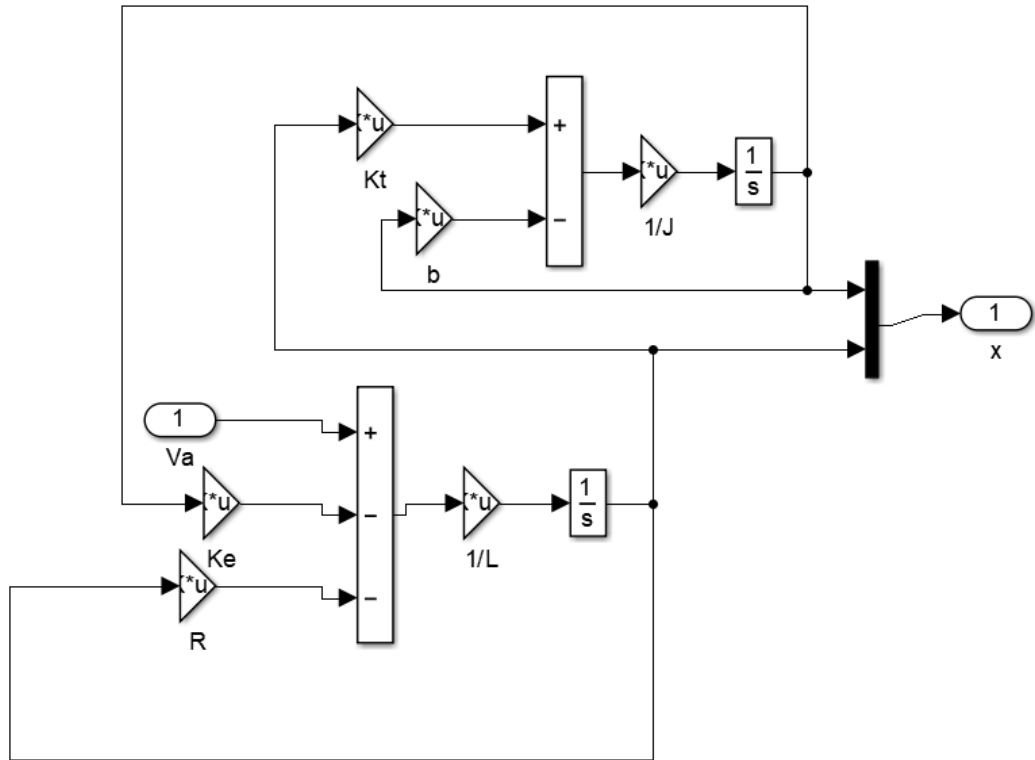
### B.2 Kontroler



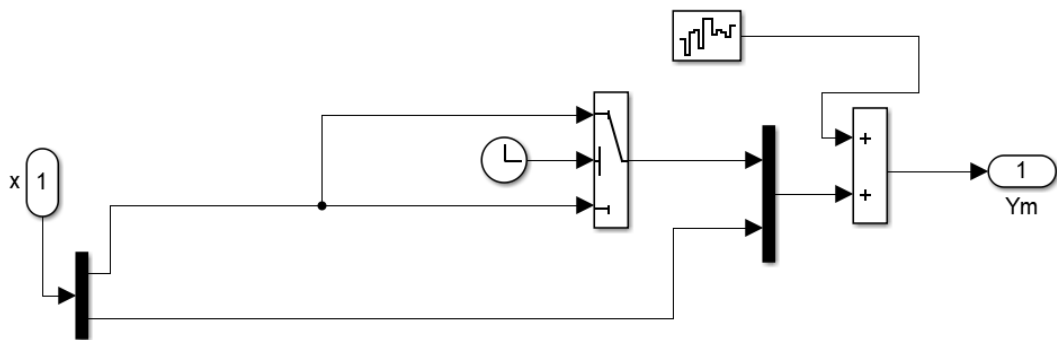
### B.3 Aktuator



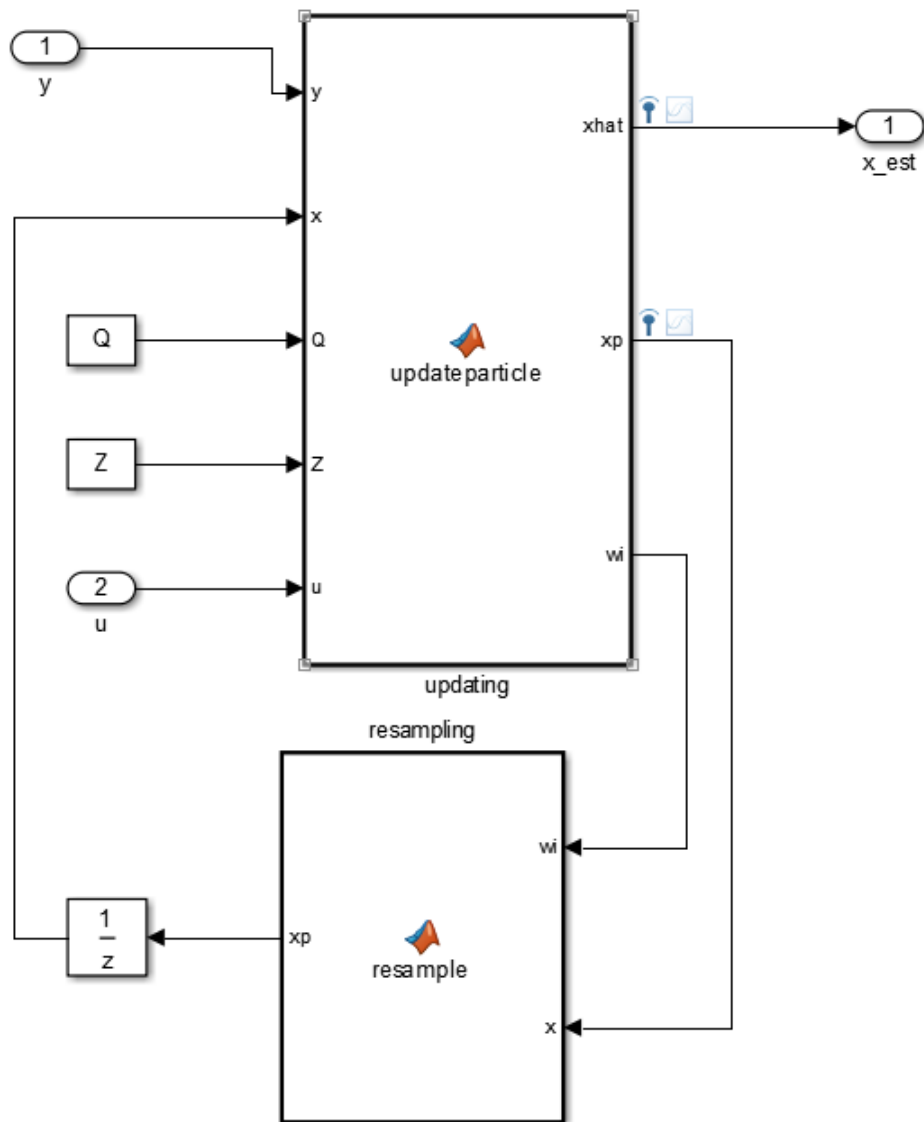
### B.4 Plant



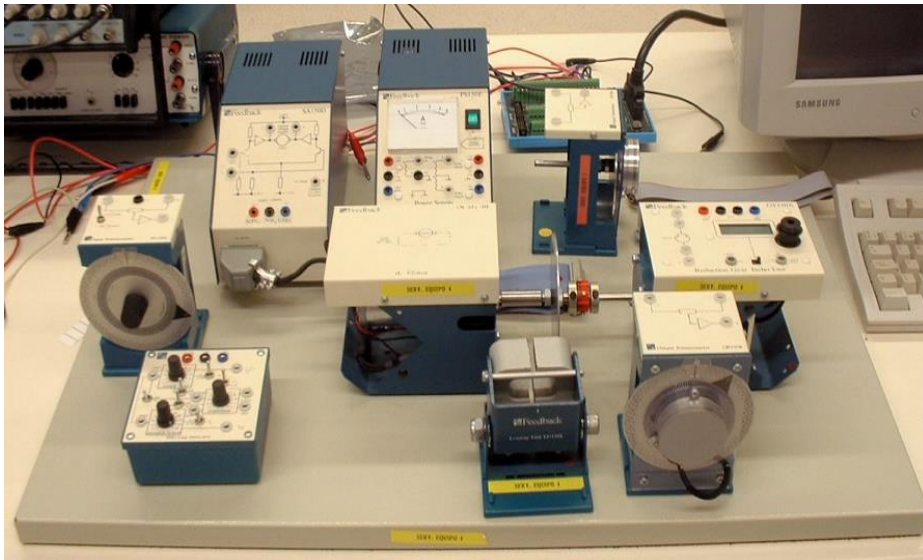
**B.5 Sensor**



**B.6 Particle Filtering**



### C. Sistem Servo Modular MS150DC



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BIODATA PENULIS



Nama penulis Ricky Giovanni Pratama. Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 03 November 1998 sebagai anak pertama. Saat ini penulis tinggal di DKI Jakarta. Penulis telah menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SD Slamet Riyadi Cijantung hingga tahun 2010, pendidikan menengah pertama di SMPN 106 Jakarta Timur hingga tahun 2013, pendidikan menengah atas di SMAN 39 Jakarta Timur hingga tahun 2016, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga saat ini. Pada bulan Juni 2020, penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul **Perancangan *Particle Filtering* Sebagai Estimator Kecepatan Pada Motor DC**. Bagi pembaca yang memiliki kritik serta saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini maka dapat menghubungi penulis melalui email: [rickygiovannip@gmail.com](mailto:rickygiovannip@gmail.com).