



TUGAS AKHIR - TM 145502

**SIMULASI PENGARUH VARIASI BEBAN TORSI
PADA MOTOR BRUSHLESS DC DENGAN KENDALI
PID**

Rosyid Wicaksono
NRP.1021140000080

Dosen Pembimbing
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing. , Ph.D.
19751120 200212 1 002

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
FAKULTAS VOKASI
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM 145502

**SIMULASI PENGARUH VARIASI BEBAN TORSI
PADA MOTOR BRUSHLESS DC DENGAN KENDALI
PID**

**Rosyid Wicaksono
NRP.2114 030 080**

**Dosen Pembimbing
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing. , Ph.D.
19751120 200212 1 002**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN INDUSTRI
FAKULTAS VOKASI
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - TM 145502

**SIMULATION EFFECT OF TORQUE LOAD
VARIATION ON BRUSHLESS DC MOTOR WITH PID
CONTROL**

Rosyid Wicaksono
NRP.2114 030 080

Advisor
Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing. , Ph.D.
19751120 200212 1 002

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
FACULTY OF VOCATIONAL
Institute Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

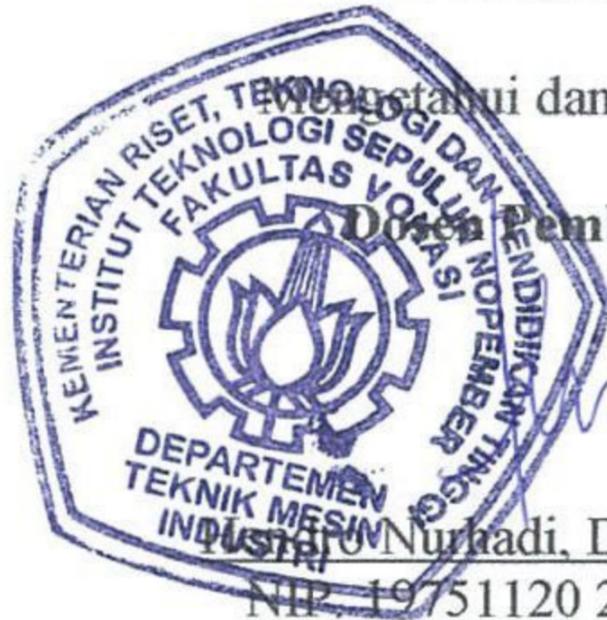
LEMBAR PENGESAHAN
SIMULASI PENGARUH VARIASI BEBAN TORSI
PADA MOTOR BRUSHLESS DC DENGAN KENDALI
PID

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Ahli Madya
Pada
Bidang Studi Manufaktur
Program Studi Diploma III
Departemen Teknik Mesin Industri
Fakultas Vokasi
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
SURABAYA

Oleh :

ROSYID WICAKSONO
NRP. 1021140000080



Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing

Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D
NIP. 19751120 200212 1 002

SURABAYA, JULI 2018

Simulasi Pengaruh Variasi Beban Torsi Pada Motor Brushless DC Dengan Kendali PID

Nama Mahasiswa : Rosyid Wicaksono
NRP : 10211400000080
Jurusan : Teknik Mesin Industri
Dosen Pembimbing : Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D

ABSTRAK

Pada tugas akhir kali ini dilakukan simulasi dengan software matlab Simulink R2018a terhadap motor Brushless DC dengan kendali PID yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai torsi terhadap kecepatan putar dan nilai arus pada stator motor. Pada simulasi yang telah dilakukan, ketika motor diberi beban torsi 0,215 Nm, 0,322 Nm, dan 0,43 Nm kecepatan putar pada motor mampu mengikuti setpoint yang diberikan walaupun terjadi naik turun pada kecepatannya. Sedangkan ketika motor diberi beban torsi 0,537 Nm dan 0,645 Nm motor mengalami penurunan masing-masing sebesar 1 rpm. Penurunan kecepatan pada motor diakibatkan karena nilai beban torsi tersebut melebihi kemampuan torsi yang mampu dihasilkan motor sehingga motor tidak mampu mencapai setpoint yang telah ditentukan. Peningkatan nilai torsi pada motor juga berakibat pada naiknya nilai arus stator pada motor dimana terjadi kenaikan rata-rata sebesar 4 ampere pada tiap kenaikan nilai beban torsi.

Kata Kunci: Brushless DC, PID, Beban Torsi, Simulink, Arus stator.

Simulation Effect Of Torque Load Variation On Brushless DC Motor Wth PID Control

Name : Rosyid Wicaksono
NRP : 10211400000080
Departement : Teknik Mesin Industri
Advisor : Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D

ABSTRACT

In this final project using software matlab simulink R2018a for simulation of Brushless DC motor with PID control which aims to know the effect of change of torque value to rotational speed and current value in motor stator. On the simulation, when the motor is given 0.215 Nm torque load, 0.322 Nm, and 0.43 Nm the speed of rotation on the motor is able to follow the given setpoint despite going up and down at its speed. While when the motor is given torque of 0.537 Nm and 0.645 Nm of motor has decreased each of 1 rpm. The decreasing in motor speed is due to the torque load value exceeding the torque capable of generating the motor so that the motor is unable to reach the specified setpoint. Increasing the torque value on the motor also results in an increase in the stator current value on the motor where there is an average increase of 4 amperes at each increase in torque load value.

Keywords: Brushless DC, PID, Torque Load, Simulink, Stator Current.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT Tuhan semesta alam yang telah melimpahkan segala berkat serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi mahasiswa dalam menyelesaikan pendidikan di Program Studi D3 Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS yang merupakan integrasi dari semua materi yang telah diberikan selama perkuliahan.

Keberhasilan penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah banyak memberikan bantuan, motivasi dan dukungan. Oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan doa dan dukungan penuh terhadap penyelesaian tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS.
3. Bapak Ir. Suhariyanto, M.Sc selaku Koordinator Program Studi Diploma III Teknik Mesin serta Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS.
4. Bapak Ir. Eddy Widiyono, M.Sc selaku Dosen Wali
5. Bapak Hendro Nurhadi, Dipl.-Ing., Ph.D selaku Pembimbing Tugas Akhir.
6. Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan kritik, saran dan masukan guna menyempurnakan Tugas Akhir ini.
7. Teman – Teman Angkatan 2014 yang telah bersama-sama menjalani semua perjuangan dan pembelajaran di Departemen Teknik Mesin Industri FV-ITS.
8. Teman-teman D3 Teknik Mesin Industri yang telah membantu dalam bentuk semangat, motivasi, dan inspirasi dalam penyusunan tugas akhir ini.

9. Semua dosen dan karyawan Program Studi Teknik Mesin Industri FV-ITS.
10. Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu, kami ucapkan terima kasih.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan tugas akhir ini masih belum sempurna, maka dari itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis. Akhir kata penulis berdoa agar segala bantuan yang diberikan akan mendapat balasan dan rahmat dari Allah SWT. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagaimana yang diharapkan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3

BAB II DASAR TEORI

2.1 Motor DC Brushless.....	5
2.1.1 Prinsip Kerja Motor BLDC	8
2.2 Pengendalian Motor BLDC.....	9
2.2.1 Metode six-step	9
2.3 Metode Pendeteksi Perubahan Komutasi	10
2.3.3 Sensor Hall	11
2.4 Inverter 3 Phasa.....	13
2.5 Kontroler	13
2.5.1 Kontroler Proporsional.....	14
2.5.2 Kontroler Integral.....	15
2.5.3 Kontroler Derrivative	15
2.5.4 Kontroler PID	16
2.6 Pulse Width Modulation.....	18

2.7 Matlab.....	21
2.7.1 Simulink	23

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian	25
3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian	26
3.3 Perancangan Model Dengan Matlab	33
3.3.1 Motor Brushless DC	34
3.3.2 PID Kontroler	35
3.3.3 Hall Effect	36
3.3.4 Inverter	37

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulink Diagram Motor BLDC.....	39
4.2 Konsep Penelitian.....	40
4.3 Penentuan Nilai Input.....	40
4.4 Tuning PID	42
4.5 Hasil Simulasi	44
4.5.1 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,215 Nm.....	45
4.5.2 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,332 Nm.....	48
4.5.3 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,43 Nm.....	52
4.5.4 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,537 Nm.....	55
4.5.5 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,645 Nm.....	58
4.6 Data Hasil Simulasi.....	62

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran.....	63

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi Motor BLDC.....	5
Gambar 2.2	Motor BLDC Inrunner.	6
Gambar 2.3	Motor BLDC Outrunner.....	7
Gambar 2.4	Medan Magnet Pada Solenoida.....	8
Gambar 2.5	Tegangan Stator BLDC.....	9
Gambar 2.6	Six step PWM.	10
Gambar 2.7	Sensor Hall dan Perubahan Sinyal PWM.....	12
Gambar 2.8	Rangkaian Inverter 3 Phasa.....	13
Gambar 2.9	Diagram Blok Kontroller Proporsional	14
Gambar 2.10	Diagram Blok Kontroller Integral	15
Gambar 2.11	Diagram Blok Kontroller Derrivative	16
Gambar 2.12	Stuktur Kontroller PID.....	17
Gambar 2.13	Sinyal PWM.....	19
Gambar 2.14	Pulsa PWM Pada Duty Cycle Yang Berbeda...	20
Gambar 2.15	Pulsa PWM.....	21
Gambar 2.16	Matlab R2018a	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	25
Gambar 3.2	Block Configuration PMSM.....	28
Gambar 3.3	Block Parameter PMSM.....	29
Gambar 3.4	Block Parameter PID Controller.....	28
Gambar 3.5	Tampilan Scope Pada Matlab	31
Gambar 3.6	Block Parameter Beban Torsi.....	32
Gambar 3.7	Model PMSM Pada Simulink Library.....	33
Gambar 3.8	Subsystem Block PMSM.....	34
Gambar 3.9	PID kontrol Pada Simulink.....	32
Gambar 3.10	Subsystem PID kontrol.....	36
Gambar 3.11	Simulink Block Decoder	36
Gambar 3.12	Simulink Model Block Gates	37
Gambar 3.13	Model Universal Bridge	37
Gambar 3.14	Subsystem block Universal Bridge.....	38
Gambar 4.1	Block Diagram Simulink Motor BLDC	37
Gambar 4.2	Respon Kontroler P	42
Gambar 4.2	Respon Kontroler PI.....	43
Gambar 4.2	Respon Kontroler PID	44
Gambar 4.5	Rpm Output Pada Beban 0,215 Nm	45

Gambar 4.6	Rpm Output Simulasi Pertama	46
Gambar 4.7	Signal Statistic Rpm Output.....	47
Gambar 4.8	Arus Stator Beban 0,215 Nm.....	47
Gambar 4.9	Signal Statistic Arus Stator.....	48
Gambar 4.10	Rpm Output Pada Beban 0,322 Nm	48
Gambar 4.11	Signal Statistic Rpm Output	49
Gambar 4.12	Rpm Output Simulasi Kedua	50
Gambar 4.13	Arus Stator Pada Beban 0,322 Nm.....	50
Gambar 4.14	Signal Statistik Arus Stator	51
Gambar 4.15	Rpm Output Pada Beban 0,43 Nm.....	52
Gambar 4.16	Signal Statistic Rpm Output.....	53
Gambar 4.17	Rpm Output Simulasi Ketiga	54
Gambar 4.18	Arus Stator Pada Beban 0,43 Nm.....	54
Gambar 4.19	Signal Statistik Arus Stator	55
Gambar 4.20	Rpm Output Pada Beban 0,537 Nm	55
Gambar 4.21	Signal Statistic Rpm Output.....	56
Gambar 4.22	Rpm Output Simulasi Ketiga	56
Gambar 4.23	Arus Stator Pada Beban 0,537 Nm.....	57
Gambar 4.24	Signal Statistik Arus Stator	58
Gambar 4.25	Rpm Output Pada Beban 0,645 Nm	59
Gambar 4.26	Rpm Output Simulasi Ketiga	60
Gambar 4.27	Signal Statistic Rpm Output.....	61
Gambar 4.28	Arus Stator Pada Beban 0,645 Nm.....	61
Gambar 4.29	Signal Statistik Arus Stator	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kombinasi timing komutasi	30
Tabel 4.1 Parameter input simulasi	41
Tabel 4.2 Koefisien Gesek.....	41
Tabel 4.3 Data hasil simulasi.....	62

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan akan sistem penggerak elektrik yang efisien saat ini semakin meningkat. Motor yang dibutuhkan adalah motor yang memiliki efisiensi tinggi dan biaya perawatan rendah. Motor DC brushed, motor yang digunakan secara umum, belum mampu memenuhi kebutuhan tersebut. Motor DC brushed memiliki biaya perawatan yang tinggi akibat digunakannya brush dalam komutasi motor. Sedangkan pada motor brushless sistem komutasi atau perpindahan putaran rotor menggunakan encoder (sensored) atau hall sensor (sensorless) yang dikendalikan secara elektronik. Cara kerja dari hall sensor ini adalah untuk menentukan posisi medan magnet pada rotor sehingga dapat ditentukan pada gulungan stator mana yang akan dialiri arus.

Selain itu, semakin berkembangnya dunia industri, kebutuhan akan sistem kontrol yang mampu meningkatkan kinerja sistem dan kualitas produksi juga menjadi semakin penting, sehingga perlu dikembangkan suatu sistem kontrol yang mampu mengatur sistem secara otomatis untuk menghasilkan keluaran seperti yang diinginkan sehingga dapat mengurangi error yang terjadi. Sistem kontrol tersebut digunakan agar sistem dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Pada tugas akhir kali ini akan dilakukan simulasi untuk mengetahui respon dari motor Brushless DC terhadap perubahan nilai torsi. Untuk memperoleh respon motor brushless DC yang bagus menggunakan pengendali PID, diperlukan penentuan (tuning) parameter K_p , K_i dan K_d yang tepat sehingga bisa mengurangi error yang terjadi akibat adanya penambahan beban torsi pada motor.

1.2. Rumusan masalah

Adapun Perumusan masalah dan penjabaran masalah yang akan dibahas dalam pengerjaan tugas akhir ini meliputi :

1. Bagaimana respon motor Brushless DC dengan kendali PID terhadap perubahan variasi torsi ?
2. Bagaiman pengaruh variasi beban torsi terhadap nilai arus pada motor Brushless DC ?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui respon motor Brushless DC dengan kendali PID terhadap perubahan variasi torsi.
2. Mengetahui pengaruh variasi beban torsi terhadap nilai arus pada motor Brushless DC.

1.4. Batasan masalah

1. Motor yang digunakan adalah motor Brushless DC 3 fasa 24 Volt
2. Penelitian dilakukan untuk memperoleh respon motor BLDC terhadap variasi beban torsi.
3. Penelitan dilakukan dengan menggunakan software MATLAB SIMULINK R2018a
4. Hasil yang diperoleh berupa data grafik yang diperoleh dari simulasi model block yang dibuat didalam software matlab Simulink R2018a
6. Untuk model block motor digunakan Model Block Permanent Magnet Synchronous Brushless Dc Motor yang terdapat pada Simulink library
7. Tidak dilakukan uji jalan
8. Asumsi efisiensi motor adalah adalah 80% - 90%.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dalam tugas akhir ini adalah mengetahui respon motor brushless DC dengan kendali PID terhadap pengaruh variasi beban torsi.

1.6 Sistematika penulisan

➤ **BAB I PENDAHULUAN**

Pada bagian ini diuraikan latar belakang, pepersamaan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

➤ **BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Pada bagian ini diuraikan beberapa landasan teori dan hasil penelitian sebelumnya.

➤ **BAB III METODE PENELITIAN**

Pada bagian ini akan diuraikan metode penelitian, spesifikasi peralatan yang akan dipakai dalam pengujian, cara pengujian, dan data yang diambil.

➤ **BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA**

Dalam bab ini dibahas tentang hasil pengujian dan analisis dari data yang didapat dari hasil penelitian.

➤ **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bagian ini berisi kesimpulan hasil penelitian serta saran- saran konstruktif untuk penelitian selanjutnya.

➤ **DAFTAR PUSTAKA**

Pada bagian ini berisi sumber sumber yang didapatkan dalam penulisan buku tugas akhir ini.

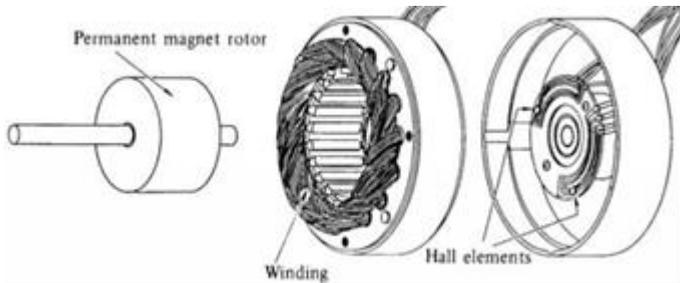
➤ LAMPIRAN

Pada bagian ini terdapat gambar-gambar ataupun data-data penting yang tidak dilampirkan didalam kelima bab diatas

BAB II DASAR TEORI

2.1. Motor DC Brushless

Kelebihan motor brushless DC adalah struktur sederhana, efisiensi tinggi, dan torsi yang besar selain itu menjadi pilihan yang tepat dalam banyak aplikasi dikehidupan sehari-hari seperti pada peralatan rumah tangga, industri dan pesawat. Motor brushless DC memiliki komutator elektris untuk menggantikan brush sehingga memiliki kemampuan efisiensi yang lebih tinggi, rendahnya emisi suara dan perawatan yang lebih mudah. Hall-effect sensor digunakan motor untuk mengetahui posisi rotor. Motor brushless DC menggunakan prinsip yang sama dengan motor DC konvensional kecuali statornya memiliki belitan tiga fasa dan rotornya memiliki kutub magnet. Hal ini menyebabkan motor brushless DC sering dikatakan mirip secara konstruksi dengan motor sinkron AC magnet permanen namun, terdapat perbedaan pada back-EMF. Gelombang back-EMF pada motor sinkron AC magnet permanen berbentuk sinusoidal sedangkan motor brushless DC berbentuk trapezoidal. Bentuk back-EMF motor brushless DC memiliki karakteristik elektris yang sama dengan motor DC.

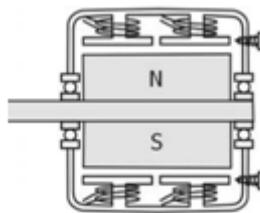


Gambar 2.1 Konstruksi Motor Brushless DC

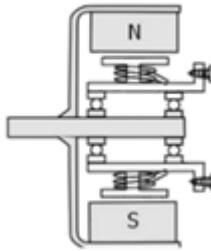
Prinsip dasar dari motor brushless DC adalah menggantikan komutator mekanis dengan menggunakan rangkaian switch elektris. Komutasi tanpa kontak mekanis tercipta karena adanya rangkaian inverter yang tersambung pada kumparan stator sehingga tidak diperlukan lagi sikat pada motor untuk melakukan komutasi. Pengaturan kecepatan serta arah rotasi motor dapat diatur melalui rangkaian kontrol dan sensor posisi rotor.

Secara konstruksi, motor brushless DC memiliki 2 (dua) bagian utama yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian statis dari motor yang terdiri dari kumparan jangkar. Sedangkan rotor merupakan bagian motor yang bergerak dan terdiri dari magnet permanen. Untuk rotor, motor brushless DC memiliki 2 (dua) tipe rotor yaitu inrunner dan outrunner yang mana dibedakan melalui peletakan rotor.

Pada motor inrunner posisi stator yang merupakan slot berisi belitan berada dibagian luar dari magnet permanen yang berputar pada bagian dalam motor. Sedangkan pada motor outrunner, posisi rotor berada diluar stator sehingga magnet permanen berputar mengelilingi belitan stator. Secara umum, motor outrunner menghasilkan torsi yang lebih besar pada kecepatan lebih rendah karena magnet permanen yang dimiliki lebih banyak.



Gambar 2.2 Motor Brushless DC *Inrunner*



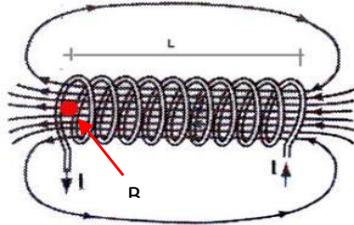
Gambar 2.3 Motor Brushless DC *Outrunner*

Dalam memahami sebuah motor listrik, penting untuk mengerti apa yang dimaksud dengan beban motor (Torsi). Beban mengacu kepada keluaran tenaga putar/torsi sesuai dengan kecepatan yang diperlukan. Beban umumnya dapat dikategorikan kedalam tiga kelompok:

- Beban torsi konstan
adalah beban dimana permintaan keluaran energinya bervariasi dengan kecepatan operasinya, namun torsi nya tidak bervariasi. Contoh beban dengan torsi konstan adalah conveyor, rotary kilns, dan pompa displacement konstan.
- Beban dengan torsi variabel
adalah beban dengan torsi yang bervariasi dengan kecepatan operasi. Contoh beban dengan torsi variabel adalah pompa sentrifugal dan fan.
- Beban dengan energi konstan
adalah beban dengan permintaan torsi yang berubah dan berbanding terbalik dengan kecepatan. Contoh untuk beban dengan daya konstan adalah peralatan - peralatan mesin.

2.1.1. Prinsip Kerja Motor BLDC

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan, pada stator timbul medan magnet (B):



Gambar 2.4 Medan magnet pada solenoida

$$B = \frac{\mu N I}{2 l}$$

Di mana N merupakan jumlah lilitan, i merupakan arus, l merupakan panjang lilitan dan μ merupakan permeabilitas bahan.

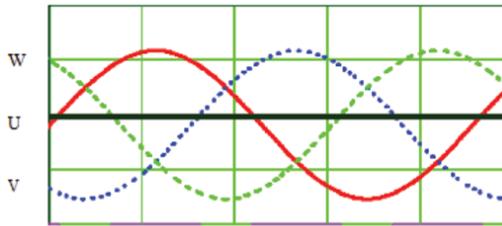
Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat.

Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan.

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

di mana f merupakan frekuensi arus input dan p merupakan jumlah pole rotor.

Medan putar magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator U, V, dan W. Perubahan polaritas ini terjadi akibat adanya arus yang mengalir pada stator berupa arus AC yang memiliki polaritas yang berubah-ubah.



Gambar 2.5 Tegangan Stator BLDC

Berdasarkan gambar 2.5, ketika stator U diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negative sedangkan V dan W yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan stator dan magnet rotor, sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator U, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator V dan W. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC sinusoidal, medan magnet stator U, V, dan W akan berubah-ubah polaritas dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC.

2.2 Pengendalian Motor BLDC

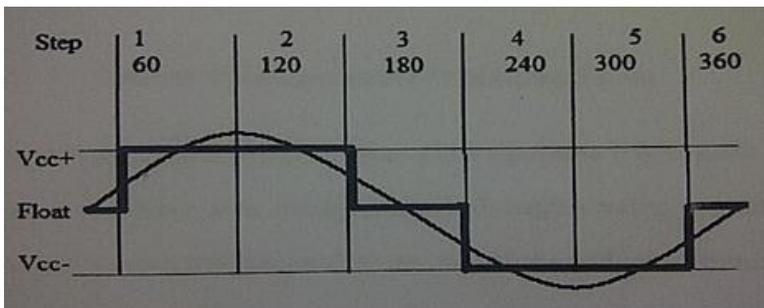
Pada tugas akhir kali ini menggunakan metode six step untuk pengendalian motor BLDC.

2.2.1 Metode Six Step

Metode six step merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC komersial. Hal ini terjadi karena metode ini sederhana sehingga mudah diimplementasikan. Hanya saja metode ini memiliki kelemahan yakni memiliki arus rms yang tinggi, rugi – rugi daya yang tinggi, dan bising. Hal ini terjadi karena PWM yang diinginkan dalam metode ini merupakan PWM square dengan frekuensi tertentu sehingga menciptakan gelombang AC yang berbentuk trapezoid atau

square. Akibat dari gelombang yang terbentuk square atau trapezoid timbul gelombang harmonic.

Metode ini disebut metode six step karena agar mampu menciptakan gelombang trapezoid atau square yang menyerupai gelombang sinusoidal, digunakan PWM square yang terdiri dari 6 bagian yakni 2 bagian positif, 2 negatif, dan 2 bagian floating. Masing – masing bagian besarnya 60 derajat gelombang sinusoidal. Kondisi floating pada algoritma ini adalah kondisi ketika gelombang sinusoidal berpotong pada titik 0.



Gambar 2.6 Six step PWM

Untuk membentuk gelombang trapezoid atau gelombang square 3 fasa, digunakan 3 buah algoritma six step yang masing – masing berbeda 1 step (60 derajat) antara satu algoritma dengan algoritma lainnya.

2.3 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi

Agar BLDC dapat dikendalikan dengan baik (kecepatan dan torsi konstan), diperlukan adanya timing perubahan komutasi yang tepat. Apabila timing perubahan komutasi tidak tepat, motor BLDC akan mengalami slip. Akibat adanya slip adalah kecepatan dan torsi motor tidak konstan. Hal ini tampak terutama pada saat motor berputar pada kecepatan tinggi. Ketika terjadi slip, kecepatan motor akan cenderung turun dan memiliki kemungkinan motor berhenti berputar. Untuk

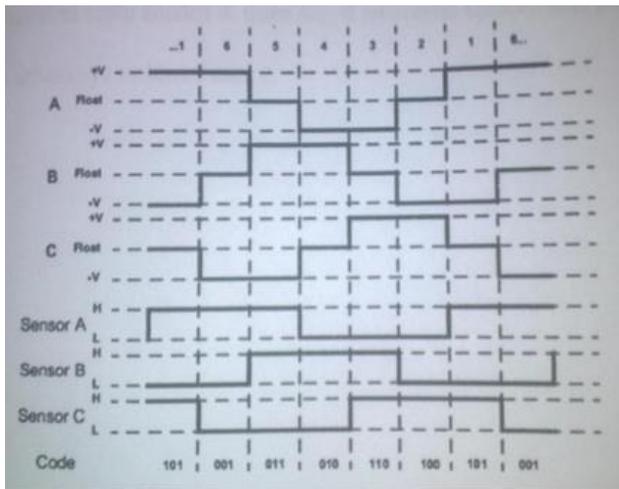
menentukan timing perubahan komutasi terdapat dua metode yang digunakan yakni metode sensorless dan dengan menggunakan sensor. Metode sensorless dilakukan dengan cara mendeteksi BEMF dan zero crossing pada fasa motor yang mengalami kondisi floating (hanya terdapat pada metode six-step), sedangkan metode dengan menggunakan sensor adalah dengan menggunakan encoder dan sensor hall. Kedua metode ini memiliki kelebihan dan kelemahan. Pada metode sensorless, metode ini tidak dapat digunakan pada kecepatan yang rendah. Hal ini terjadi karena tegangan yang diinduksikan pada kumparan yang tidak dialiri arus (floating) nilainya cukup kecil sehingga tidak dapat dideteksi, selain itu metode ini tidak dapat digunakan pada metode pengendalian sinusoidal karena pada metode ini tidak terdapat satu fasa pun yang mengalami kondisi floating. Kelebihan dari metode ini adalah spesifikasi motor secara fisik tidak diperlukan dan cenderung lebih murah karena tidak menggunakan alat tambahan (sensor tambahan). Sedangkan penggunaan sensor memiliki kelebihan yakni motor dapat berputar pada kecepatan yang rendah dan dapat digunakan pada kedua metode pengendalian yang ada.

2.3.1 Sensor Hall

Salah satu cara untuk menentukan timing perubahan komutasi yang tepat adalah dengan menggunakan 3 buah sensor hall. Pada umumnya ketiga sensor hall terpisah 120 derajat satu dengan yang lainnya, walaupun pada kondisi khusus tidak. Kondisi khusus adalah pada motor BLDC yang memiliki pole dalam jumlah banyak (di atas 6 pole). Kelebihan dari penggunaan sensor hall ini adalah peletakkan dari sensor hall awal tidak perlu terlalu presisi dengan rotor selain itu untuk motor dengan pole yang berbeda cukup dengan menggeser letak dari sensor hall. Kelemahan dari sensor hall adalah apabila letak sensor hall tidak tepat satu dengan lainnya, misalkan pada motor 2 pole tidak benar – benar 120 derajat satu dengan lainnya, kesalahan dalam penentuan timing perubahan komutasi dapat terjadi, bahkan ada kemungkinan tidak didapatkannya 6 kombinasi yang berbeda

apabila posisi salah satu atau ketiga sensor hall tidak berbeda terlalu jauh dengan letak sensor hall yang seharusnya.

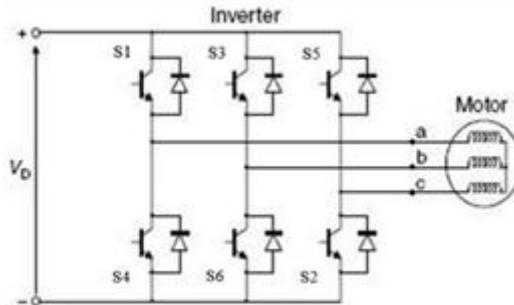
Dengan menggunakan tiga sensor hall akan didapatkan 6 kombinasi yang berbeda. Keenam kombinasi ini menunjukkan timing perubahan komutasi. Ketika dari ketiga sensor hall didapatkan kombinasi tertentu, sinyal PWM pada suatu step harus diubah sesuai dengan kombinasi yang didapatkan.



Gambar 2.9 Sensor Hall dan Perubahan Sinyal PWM

Berdasarkan gambar 2.9 ketika sensor hall menunjukkan kombinasi tertentu maka sinyal PWM akan berubah mengikuti kombinasi yang telah ditentukan, misalkan kombinasi sensor hall menunjukkan 101, maka PWM A dan B akan menyala, sedangkan C akan floating, kombinasi 001, PWM A dan C menyala, sedangkan B akan floating, dan seterusnya. Kondisi floating hanya terdapat pada metode PWM six-step, sedangkan pada metode PWM sinusoidal, kondisi floating merupakan suatu kondisi di mana sinyal sinusoidal berubah dari positif ke negative atau sebaliknya melewati nilai 0.

2.4 Inverter Tiga Fasa



Gambar 2.10 Rangkaian Inverter Tiga Fasa

Output inverter tiga fasa berfungsi sebagai sumber tegangan tiga fasa AC bagi motor brushless DC. Inputan inverter berupa sumber tegangan DC seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.10 Berdasarkan kegunaannya maka inverter tiga fasa merupakan pengubah sinyal tegangan DC menjadi AC. Pada umumnya, inverter yang sering digunakan adalah VSI karena karena nilai tegangannya sesuai dengan yang diinginkan dengan nilai arus yang berubah-ubah berdasarkan perubahan beban. Inverter tiga fasa memiliki enam switch dengan komposisi S1, S3, S5 untuk fase positif sedangkan S2, S4, S6 untuk fase negatif. Terdapat syarat agar tidak terjadi hubung singkat pada sumber DC dan tegangan keluaran AC yang tidak sesuai yaitu tidak boleh terjadi kondisi ON bersamaan untuk switch S1-S4, S3-S6, dan S5-S2. Setiap switch memiliki rasio duty cycle 50% dengan interval penyalan antar switch sebesar 60° . Terbentuklah sinyal six-step pada output tegangan line-to-neutral yang merupakan hasil dari switching setiap periode sehingga biasa disebut six-step inverter.

2.5 Kontroler

Kontroler dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Hal itu disebabkan oleh tidak dapat dirubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik plant harus diterima sebagaimana

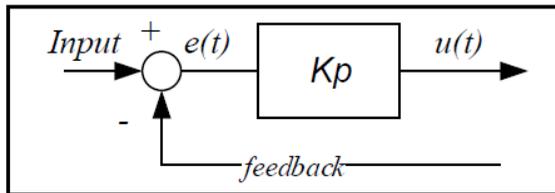
adanya, perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan kontroler.

Salah satu fungsi kontroler adalah mengurangi sinyal error, sinyal error adalah perbedaan nilai setpoint dengan nilai output plant. Setpoint adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan, sedangkan output plant adalah nilai aktual yang terukur pada output plant. Semakin kecil nilai sinyal error maka kinerja sistem kontrol dinilai semakin baik.

Prinsip kerja kontroler adalah membandingkan nilai output plant dengan nilai setpoint, menentukan nilai kesalahan dan akhirnya menghasilkan sinyal kontrol untuk meminimalkan kesalahan (Ogata K,1995).

2.5.1 Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memiliki output yang besarnya sebanding dengan besarnya sinyal error. Output kontroler merupakan perkalian antara penguatan proporsional dengan sinyal error. Gambar 2.11 menunjukkan diagram blok kontroler proporsional.



Gambar 2.11 Diagram Blok Kontroler Proporsional

dimana:

K_p = adalah gain proporsional

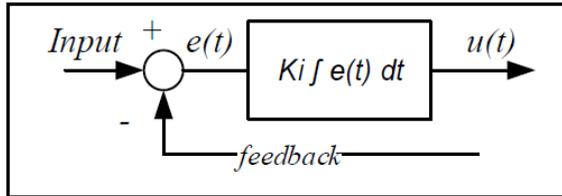
$e(t)$ = sinyal error

$u(t)$ = output kontroler

Penambahan K_p akan mempercepat kecepatan respon transient dan mengurangi error steady state.

2.5.2 Kontroler Integral

Kontroler integral memiliki karakteristik seperti sebuah operasi integral, output kontroler dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan perubahan nilai sinyal error. Output kontroler merupakan penjumlahan terus menerus dari perubahan sinyal error. Gambar 2.12 menunjukkan diagram blok kontroler integral.



Gambar 2.12 Diagram Blok Kontroler Integral

dimana:

K_i = adalah *gain* integral

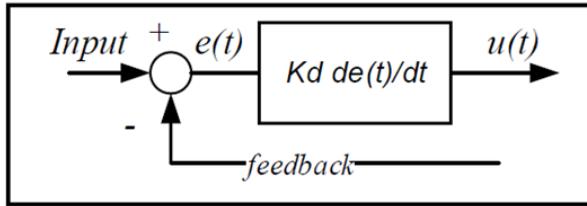
$e(t)$ = sinyal *error*

$u(t)$ = *output* kontroler

Pada kontrol integral digunakan untuk menghilangkan sinyal error dalam steady state. Namun pemilihan K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pemilihan K_i yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan output berosilasi karena menambah orde system.

2.5.3 Kontroler Derivative

Kontroler derivative memiliki sifat seperti suatu operasi turunan. Perubahan yang mendadak pada masukkan kontroler mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Kontroler ini tidak akan menghasilkan output saat sinyal error konstan sehingga tidak akan mempengaruhi keadaan mantap. Gambar 2.13 menunjukkan diagram blok kontroler derivative.



Gambar 2.13 Diagram Blok kontroler Derivative

dimana:

Kd = adalah gain derivative

$e(t)$ = sinyal error

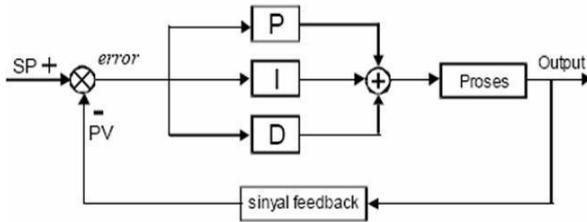
$u(t)$ = output kontroler

Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respon transient. Kontrol Diferensial hanya berubah saat ada perubahan error sehingga saat error statis kontrol ini tidak akan bereaksi, hal ini pula yang menyebabkan kontroler Diferensial tidak dapat dipakai sendiri.

2.5.4 Kontroler PID (Proporsional-Integral-Derivative)

Kontroler PID merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem. Kontroler PID adalah kontroler konvensional yang banyak dipakai dalam dunia industri. Kontroler PID akan memberikan aksi kontrol kepada *plant* berdasarkan besar kesalahan yang diperoleh. Kesalahan adalah perbedaan dari *setpoint* dengan *output* sistem pengaturan.

Ilustrasi rancangan kontroler *Proportional*, *Integral*, *Derivative* (PID) yang digunakan pada *plant* motor BLDC dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Struktur controller PID

Adapun persamaan Kontroler PID adalah:

$$mv(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Keterangan:

- mv(t) : Manipulated variable
- Kp : konstanta proporsional
- Ti : time integral
- Td : time derivative
- e(t) : Error

Komponen kontrol PID ini terdiri dari tiga jenis yaitu *proportional*, *integral* dan *derivative*. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang kita inginkan terhadap suatu *plant*. Efek dari setiap pengontrol *Proportional*, *Integral* dan *Derivative* pada sistem *loop* tertutup disimpulkan pada Tabel 2.1.

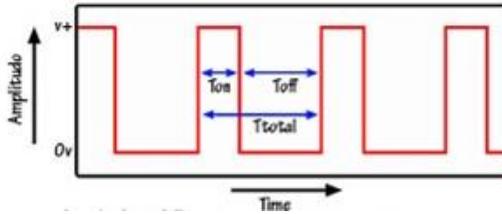
Tabel 2.1 Karakteristik Kontroler *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative*

<i>Respon Close-Loop</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Setting Time</i>	<i>Steady State Error</i>
<i>Proportional</i>	Turun	Naik	Perubahan Kecil	Turun
<i>Integral</i>	Turun	Naik	Naik	Hilang
<i>Derivative</i>	Perubahan Kecil	Turun	Turun	Perubahan Kecil

2.6 Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) secara umum adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam satu periode, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Beberapa contoh aplikasi PWM adalah pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, audio effect dan penguatan, serta aplikasi-aplikasi lainnya.

Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0% hingga 100% seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Sinyal PWM

$$T_{\text{total}} = T_{\text{on}} + T_{\text{off}}$$

$$D = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{out}} = D \times V_{\text{in}}$$

$$V_{\text{out}} = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{total}}} \times V_{\text{in}}$$

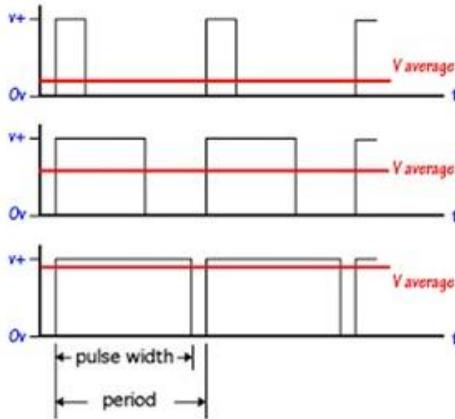
Dimana :

T_{on} = Waktu pulsa “High”

T_{off} = Waktu pulsa “Low”

D = Duty cycle adalah lamanya pulsa high dalam satu periode

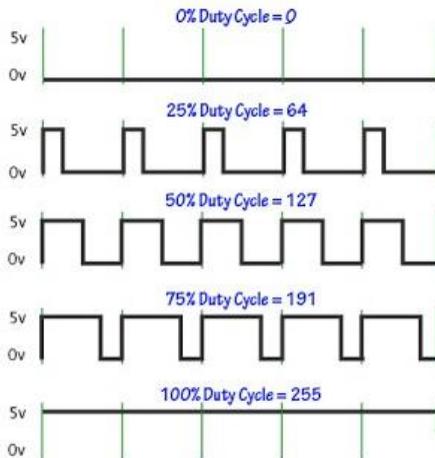
Dari persamaan diatas, diketahui bahwa perubahan *duty cycle* akan merubah tegangan output atau tegangan rata-rata seperti gambar 2.15 yaitu menunjukkan Pulsa PWM pada duty cycle yang berbeda-beda.



Gambar 2.16 Pulsa PWM pada duty cycle yang berbeda-beda

PWM merupakan salah satu teknik untuk mendapatkan sinyal analog dari sebuah piranti digital. Sebenarnya sinyal PWM dapat dibangkitkan dengan banyak cara, secara analog menggunakan IC op-amp atau secara digital.

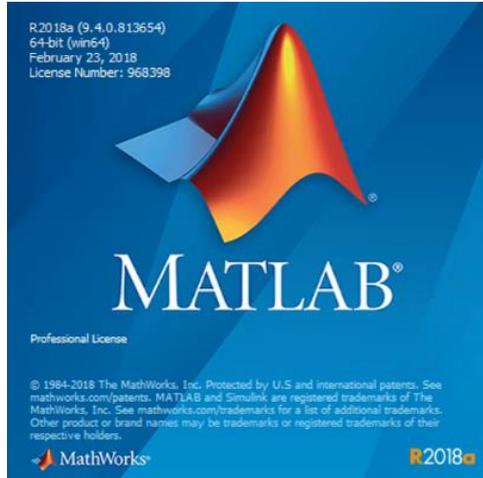
Secara analog setiap perubahan PWM-nya sangat halus, sedangkan secara digital setiap perubahan PWM dipengaruhi oleh resolusi PWM itu sendiri. Resolusi adalah jumlah variasi perubahan nilai dalam PWM tersebut. Misalkan suatu PWM memiliki resolusi 8 bit, berarti PWM ini memiliki variasi perubahan nilai sebanyak 256 variasi mulai dari 0 – 225 perubahan nilai yang mewakili duty cycle 0% – 100% dari keluaran PWM tersebut seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17 pulsa PWM.



Gambar 2.17 Pulsa PWM

2.7 Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Pada awalnya, program ini merupakan *interface* untuk koleksi rutin-rutin numerik dari proyek LINPACK dan EISPACK, dan dikembangkan menggunakan bahasa FORTRAN namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan assembler (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB).



Gambar 2.18 Matlab R2018a

MATLAB telah berkembang menjadi sebuah *environment* pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi *built-in* untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier dan kalkulasi matematis lainnya. MATLAB juga berisi *toolbox* yang berisi fungsi-fungsi tambahan untuk aplikasi khusus. MATLAB bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk ditambahkan pada *library* ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu.

MATLAB (Matrix Laboratory) yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, yang digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dll. Sehingga Matlab banyak digunakan pada:

- Matematika dan Komputansi
- Pengembangan dan Algoritma
- Pemrograman Modeling, Simulasi, dan Pembuatan Prototipe

- Analisa Data , Eksplorasi dan Visualisasi
- Analisis Numerik dan Statistik
- Pengembangan Aplikasi Teknik

2.7.1 Simulink

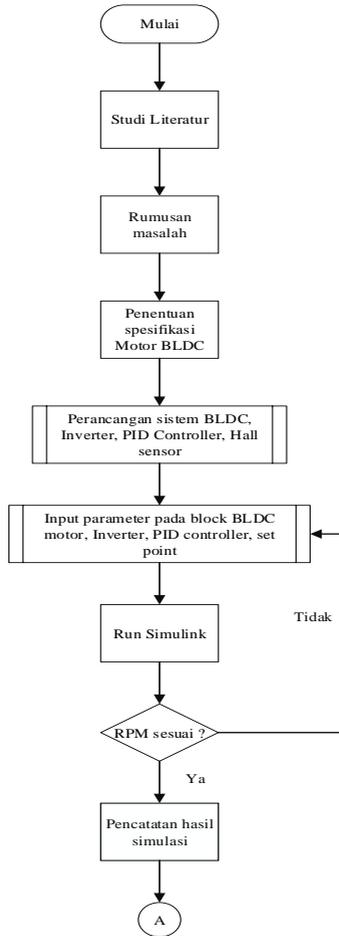
Simulink merupakan bagian tambahan dari software MATLAB (Mathworks Inc.). Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisa dari sistem dinamik dengan menggunakan ntarmuka grafis (GUI). Simulink terdiri dari beberapa kumpulan toolbox yang dapat digunakan untuk analisa sistem linier dan non-linier. Beberapa library yang sering digunakan dalam sistem kontrol antara lain math, sinks, dan sources.

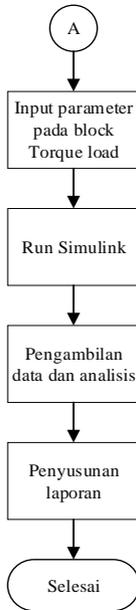
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Penjelasan Setiap Diagram Alir Penelitian

a. Studi literatur

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur. Literatur yang digunakan berupa buku teks, jurnal, tugas akhir, laman internet dan penelitian yang berhubungan dengan motor Brushless DC, PID control, dan sistem kontrol untuk motor brushless DC.

b. Perumusan Masalah

Setelah dilakukan studi literature, banyak informasi yang didapat. Dengan adanya informasi yang telah didapat, timbul suatu permasalahan. Permasalahan tersebut yaitu bagaimana merancang sebuah sistem dengan plant motor Brushless DC supaya mendapatkan rpm yang diinginkan.

c. Penentuan spesifikasi motor Brushless DC

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data pada motor brushless dc yang akan digunakan pada simulasi. Spesifikasi motor listrik yang akan digunakan adalah sebagai berikut :

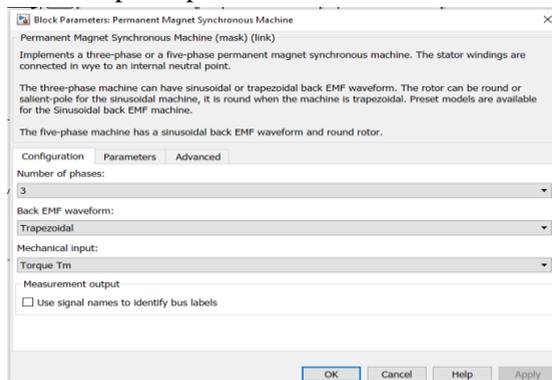
- Rated power supply : 24 Volt
- Rated output power : 90 W
- Poles number : 6
- Phase number : 3
- Rated speed : 4000
- Maximum speed : 5000
- Rated Torque : 0,215 N.m
- Rated curent : 4,92 Ampere
- Voltage constan : 3 Vrms/krpm
- Momen of Inertia : 0.114×10^{-4} kg.m²
- Phase resistance : 0,4 Ohm
- Inductance resistance : 0,37 mH

d. Perancangan Sistem Brushless DC, Inverter, PID Controller, Hall sensor

Perancangan sistem brushless dc, inverter, PID controller, hall sensor dengan menggunakan software Matlab. Proses perancangan menggunakan library pada software matlab Simulink. Pada perancangan motor Brushless dc menggunakan model Permagnet Magnet Synchronous Motor sedangkan pada bagian inverter menggunakan inverter 3 phase.

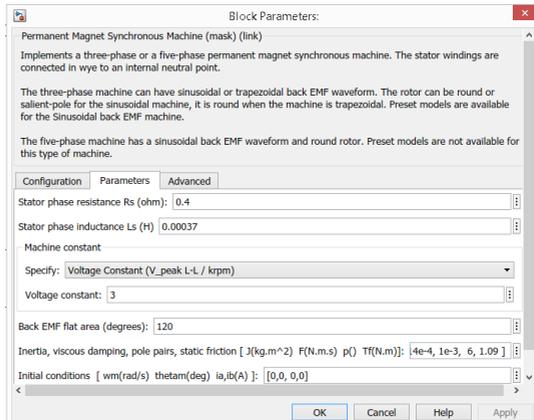
e. Input Parameter Pada Block Brushless DC motor, Inverter, PID controller, Set point.

Setelah perancangan pada sistem dengan plant motor BLDC dilakukan penginputan parameter pada block Brushless DC motor, inverter, PID controller, Set point. Pada block Brushless DC motor penginputan berdasarkan pada data spesifikasi motor. Pada block PID controller penginputan digunakan untuk menentukan konstanta K_p , K_i dan K_d . Sedangkan pada bagian set point digunakan untuk menentukan kecepatan pada motor Brushless DC.



Gambar 3.2 Block Configuration PMSM

Pada gambar diatas number of phases menunjukkan jumlah fasa atau kabel yang bermuatan listrik. Pada motor Brushless DC ini memiliki kabel yang ke tiganya dialiri arus listrik. Untuk back EMF waveform dipilih Trapezoidal.

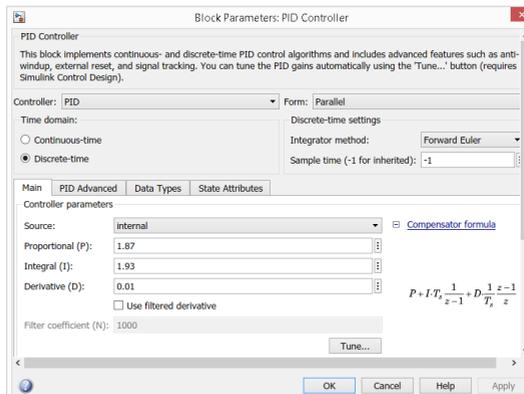


Gambar 3.3 Block Parameter PMSM

Pada gambar diatas terdapat beberapa parameter input yang digunakan. Berikut penjelasannya :

- Stator phase resistance : Menentukan besarnya resistance atau tahanan pada kumparan stator dalam satuan ohm
- Stator phase inductance : Menentukan besarnya induktansi pada kumparan stator dalam satuan henry
- Machine constan : Pada bagian ini dipilih voltage constan ($V_{peak} L-L / krpm$) yang mengacu pada spesifikasi motor yang digunakan.

- Back EMF flat area (degrees) : Dimana motor akan menghasilkan tegangan back emf tiap 120°.
- Moment of Inertia : Besarnya gaya puntir akibat dari berat rotor itu sendiri
- Viscous damping : besarnya energi terbuang yang terjadi akibat dari redaman yang diberikan oleh cairan pelumas.
- Pole pairs : Banyaknya jumlah pasangan kutub yang terdapat pada rotor. Semakin sedikit jumlah pole pairs pada motor semakin tinggi putaran yang dihasilkan.
- Static friction : Besarnya gaya gesek statis yang terjadi pada motor.



Gambar 3.4 Block parameter PID Controller

Pada block parameter PID perubahan dilakukan pada konstanta proporsional (P), integral (I), derivative (D). penentuan konstanta ini bertujuan untuk

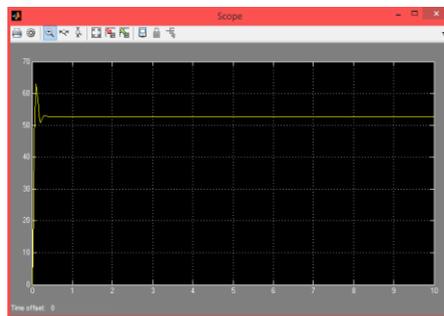
mendapatkan output yang sesuai atau paling tidak mendekati besarnya setpoint yang telah ditentukan.

f. Run Simulink

Setelah menentukan parameter yang ada pada block diagram motor BLDC, langkah selanjutnya adalah mensimulasikan block diagram tersebut dengan menekan tombol run pada Simulink, lalu untuk melihat hasil simulasi double klik pada scope yang akan memunculkan sebuah data berupa grafik. Jika pada grafik menunjukkan rpm yang sesuai dengan set point rpm yang diberikan maka dapat dilanjutkan pada tahap selanjutnya.

g. Pencatatan Hasil Simulasi

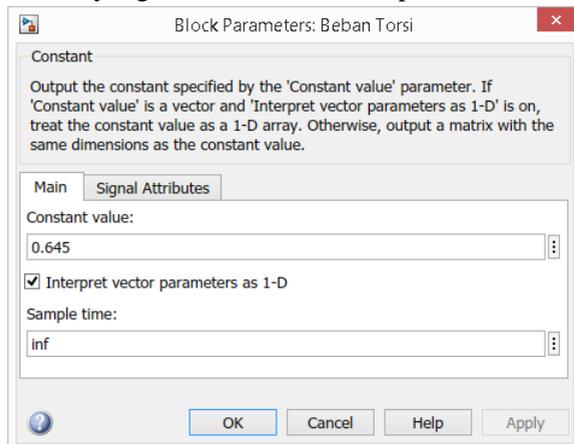
Dari simulasi yang dijalankan akan didapatkan grafik pada scope yang menunjukkan respon dari sistem yang berupa rpm output, arus stator serta torsi output.



Gambar 3.5 Tampilan Scope pada Matlab

h. Input Parameter Pada Block Beban Torsi

Setelah rpm output pada tampilan scope dirasa sesuai dengan rpm input maka selanjutnya dilakukan penambahan pada beban torsi. Hal ini dimaksudkan untuk menguji kestabilan rpm dari sistem motor Brushless DC ketika mendapatkan gangguan berupa beban torsi. Pada block ini akan dilakukan empat kali perubahan nilai torsi sebesar 0,322 Nm, 0,43 Nm, 0,537 Nm, dan 0,645 Nm dari nilai torsi awal motor yaitu 0,215 Nm. Sedangkan untuk input pada block parameter yang lain tidak dilakukan perubahan.



Gambar 3.6 Block parameter beban torsi

i. Pengambilan data dan analisis

Setelah dilakukan penambahan beban torsi dilakukan pengambilan data melalui scope untuk melihat respon dari sistem yang berupa rpm output dan arus stator yang

selanjutnya akan dilakukan analisa terhadap perubahan nilai torsi terhadap nilai rpm output dan arus stator.

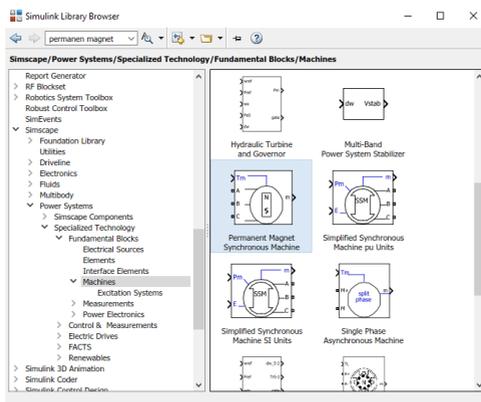
j. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan tugas akhir dilakukan setelah data didapat dari hasil simulasi keseluruhan sistem dengan plant berupa motor Brushless DC pada Matlab dianalisa dan didapatkan kesimpulan pada penelitian Tugas Akhir ini.

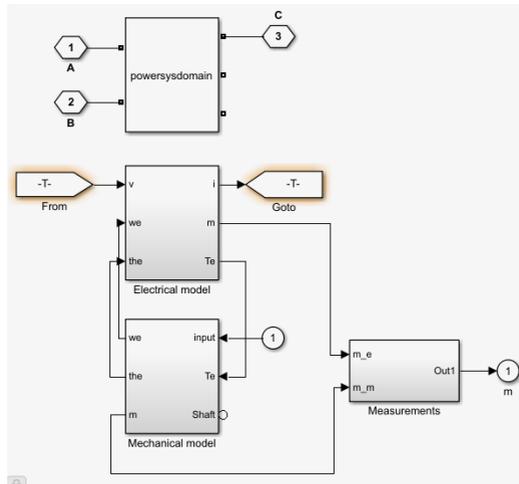
3.3 Perancangan Model Dengan Menggunakan Software Matlab

3.3.1 Motor Brushless DC

Untuk permodelan motor Brushless DC menggunakan model permanent magnet synchronous machine (PMSM) yang ada pada library Simulink.



Gambar 3.7 Model PMSM pada library Simulink

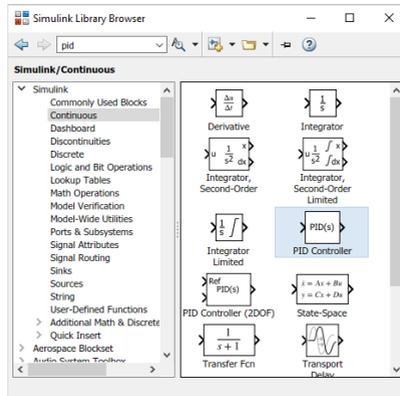


Gambar 3.8 Subsystem Block PMSM

Gambar diatas merupakan subsystem dari model block PMSM yang digunakan. Dimana pada gambar diatas tegangan (v) dan arus yang digunakan berasal dari block inverter. Tegangan serta arus yang masuk akan mengalir pada kumparan pada stator yang akan membangkitkan medan magnet pada stator. Sedangkan pada bagian rotor motor BLDC berupa magnet permanent yang akan mengakibatkan terjadi tarik menarik antara medan magnet pada stator dan medan magnet pada rotor yang mengakibatkan motor akan berputar. Pada block electrical model output yang dihasilkan berupa arus yang mengalir pada tiap fasanya, back emf, serta hall effect signal sedangkan pada block mechanical model output yang dihasilkan berupa w_e atau kecepatan rotor (rad/s), the atau posisi dari rotor (rad), dan Te atau torsi elektromagnetik (N.m).

3.3.2 PID Controller

Pada bagian PID Controller menggunakan model yang ada pada library Simulink. Model PID controller terletak pada blok Simulink / continuous.

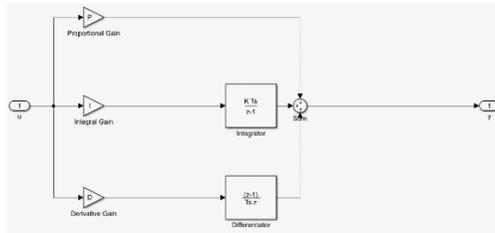


Gambar 3.9 PID Kontrol pada library Simulink

Pada block ini menggunakan 3 kontroler yaitu kontroler P, kontroler I dan kontroler D. Berikut fungsi tiap kontroler :

- Kontroler P merupakan perkalian penguatan proporsional dengan sinyal error yang berfungsi untuk mempercepat respon serta mengurangi error.
- Kontrol integral digunakan untuk menghilangkan sinyal error dalam steady state. Namun pemilihan K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan system. Pemilihan K_i yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan output berosilasi karena menambah orde system.

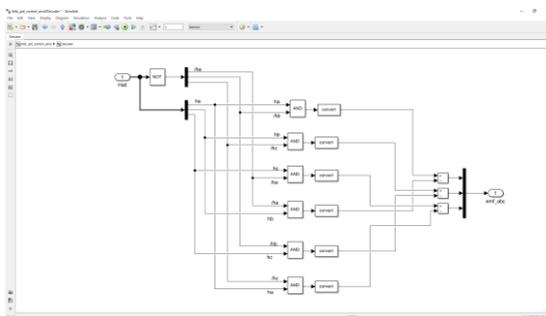
- Kontroler D digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respon transient. Kontrol Diferensial hanya berubah saat ada perubahan error sehingga saat nilai error tetap kontrol ini tidak akan bereaksi.



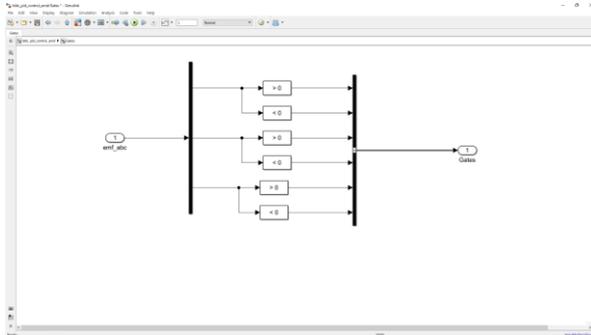
Gambar 3.10 Subsystem PID Control

3.3.3 Hall Effect

Pada bagian ini terdiri dari 2 block yang saling berhubungan yaitu block decoder dan block gates. Decoder berfungsi menerjemahkan sinyal kiriman dari sensor hall effect dan gates yang berfungsi sebagai kendali switch pada inverter.



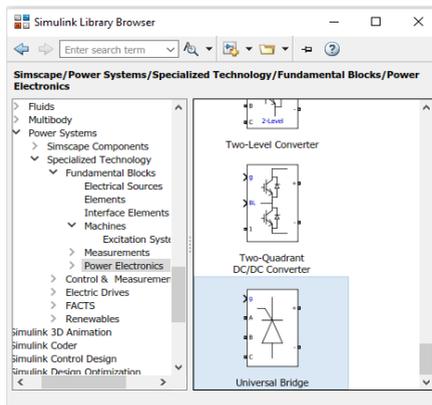
Gambar 3.11 Simulink model block decoder



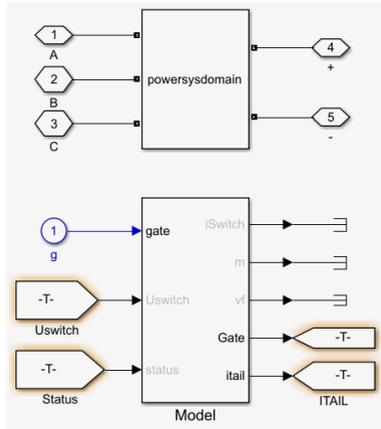
Gambar 3.12 Simulink model block gates

3.3.4 Inverter

Pada simulasi kali ini inverter yang digunakan adalah inverter 3 phase universal bridge yang terdapat di `simscape/power system/specialized technology/fundamental block/power electronic` pada library Simulink. Pada block inverter untuk power electronic device menggunakan mosfet.



Gambar 3.13 Model universal bridge Simulink library



Gambar 3.14 Subsystem block Universal Bridge

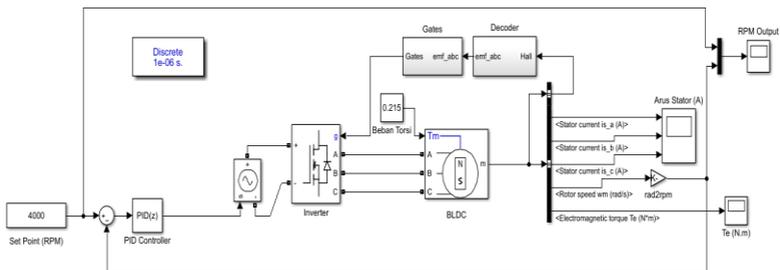
Gambar diatas merupakan subsystem daripada block model inverter. Pada nomor 4 dan nomor 5 merupakan jalur masuknya sumber tegangan dari inverter dimana sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan DC 24 Volt. Pada block inverter ini berfungsi untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC yang akan digunakan mengalir kumparan pada motor sehingga akan membangkitkan medan magnet pada stator. Dimana pada inverter menggunakan metode pensaklaran untuk mengubah tegangan listrik searah (DC) menjadi tegangan listrik bolak-balik (AC). Gate pada block diatas merupakan hasil dari umpan balik hall sensor yang mendeteksi posisi rotor. Selanjutnya output dari gate berfungsi untuk menentukan timing pensaklaran pada inverter serta digunakan untuk menentukan pada kumparan motor mana yang akan dilewati arus.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulink diagram motor BLDC

Block diagram keseluruhan sistem motor BLDC dalam simulasi:



Gambar 4.1 Block diagram simulink motor BLDC

Pada block diagram diatas terdapat 4 komponen utama yaitu motor Brushless DC, PID controller, inverter, serta hall effect sensor yang berfungsi sebagai feedback motor. Pada tugas akhir kali ini sistem pengaturan pada motor Brushless DC menggunakan feedback yang berasal dari hall effect sensor. Sensor hall effect diletakkan pada posisi rotor yang kemudian digunakan untuk menentukan posisi rotor. Hasil pendeteksian posisi rotor yang dilakukan hall effect akan berupa sinyal pulsa. Perbedaan sinyal pulsa antar sensor tersebut akan mempengaruhi proses switching pada inverter sehingga tegangan yang masuk pada tiap fasanya akan berbeda-beda sesuai dengan posisi rotor sehingga membuat motor Brushless DC berputar. Inverter juga berfungsi untuk membalik

polaritas tegangan DC melalui sistem pensaklaran pada inverter yang akan menghasilkan gelombang sinusoidal.

4.2 Konsep Penelitian

Pada penelitian kali ini menggunakan konsep penelitian desain dan analisa menggunakan software matlab R2018a, penelitian dilakukan dalam rangka penelitian lanjutan melalui simulasi yang dapat diamati mealui data grafik yang ditampilkan melalui fitur scope yang terdapat didalam software matlab. Pada simulasi yang dilakukan kali ini adalah simulasi kerja daripada motor ketika dilakukan pembebanan torsi. Permodelan beban pada simulasi kali ini adalah dengan menambah nilai dari torsi input pada block beban torsi pada motor. Lalu dilakukan pengamatan pada scope apakah terjadi penurunan kecepatan yang signifikan pada kecepatan motor.

4.3 Penentuan Nilai Input

Didalam simulasi percobaan kali ini menggunakan fitur permanent magnet synchronous motor yang didapat dari Simulink library. Nilai input ini digunakan untuk mengisi parameter yang terdapat pada tiap block diagram dalam sistem pengaturan kecepatan motor Brushless DC yang bertujuan untuk memperoleh hasil yang maksimal. Dalam penentuan nilai input yang akan digunakan pada simulasi kali ini menggunakan parameter dari spesifikasi motor Brushless DC.

Tabel 4.1 Parameter input simulasi

No	Input	Nilai
1.	Rated power supply	24 Vdc
2.	Rated output power	90 W
3.	Poles number	6
5.	Phase number	3
6.	Rated speed	4000
7.	Maximum speed	5000
8.	Rated torque	0,215 Nm
8.	Phase Resistance	0,4 Ohm
9.	Phase inductance	0,37 mH
10.	Voltage constant	3.0 Vrms/krpm
11.	Momen Inertia	$0,114 \times 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$

Dikarenakan input parameter pada static friction belum diketahui, maka akan dilakukan perhitungan secara manual untuk mendapatkan nilai parameter tersebut. pada perhitungan kali ini diasumsikan gesekan yang terjadi antara bahan alumunium dan baja sehingga didapatkan koefisien gesek statis sebesar 0,61 seperti pada tabel 4.2 Pada dan berikut perhitungan yang dilakukan :

Tabel 4.2 Koefisien gesek

Bahan	μ_s	μ_k
Baja di atas baja	0,74	0,57
Aluminium di atas baja	0,61	0,47
Tembaga di atas baja	0,53	0,36
Kuningan di atas baja	0,51	0,44
Seng di atas besi tuang	0,85	0,21
Tembaga di atas besi tuang	1,05	0,29
Gelas di atas besi tuang	0,04	0,40
Tembaga di atas gelas	0,68	0,53
Teflon di atas teflon	0,04	0,04
Teflon di atas baja	0,04	0,04

- Penentuan nilai static friction
 $l =$ panjang poros pada motor (m)
 $\mu_s = 0,61$

$$T = F \times l$$

$$0.215 \text{ Nm} = F \times 0,12 \text{ m}$$

$$F = 1,79 \text{ N}$$

$$F_s = \mu_s \times N$$

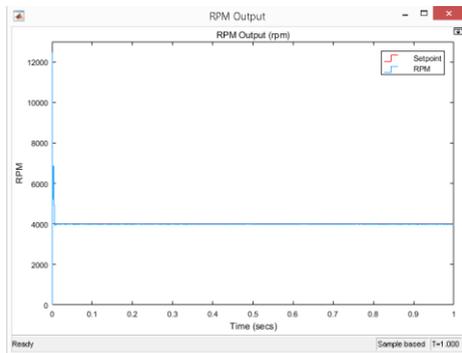
$$F_s = 0,61 \times 1,79 \text{ N}$$

$$F_s = 1,09 \text{ N.m}$$

4.4 Tuning PID

Untuk penentuan nilai K_p , K_i dan K_d pada kontroler PID dilakukan secara manual. Proses tuning PID bertujuan untuk mendapatkan output rpm yang paling mendekati nilai setpoint yang telah ditentukan yakni sebesar 4000 rpm. Penambahan nilai K_p , K_i dan K_d berdasarkan pada karakteristik tiap kontroler. Berikut pengaruh tiap kontroler P, I, dan D pada output sistem :

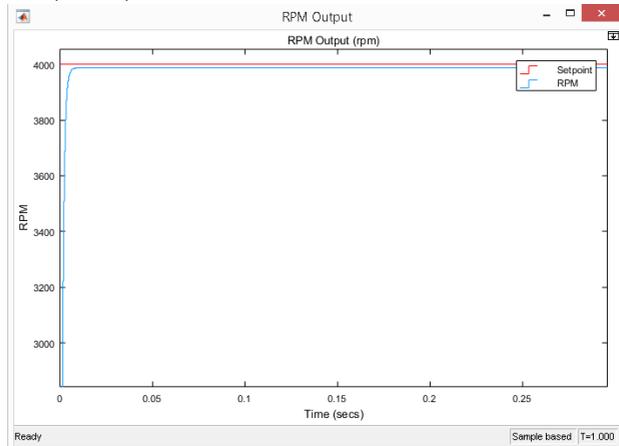
- $P = 10, I = 0, D = 0$



Gambar 4.2 Respon kontroler P

Pada saat hanya menggunakan kontroler P output terlihat rpm output mengalami overshoot yang tinggi sehingga perlu dilakukan penambahan kontroler D untuk menurunkan overshoot yang terjadi pada sistem.

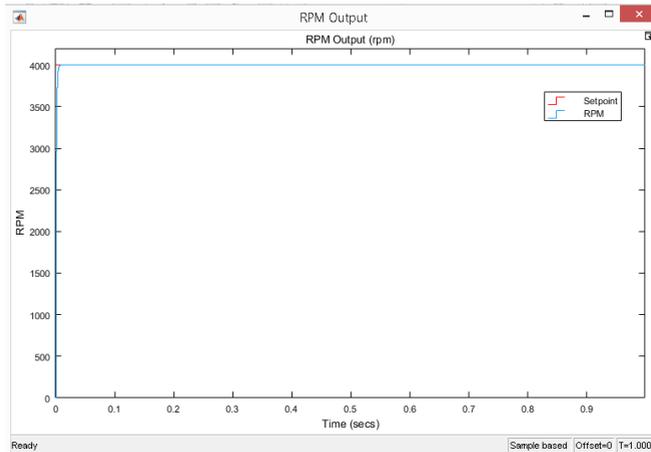
- $P = 10, I = 0, D = 0.01$



Gambar 4.3 Respon kontroler PD

Saat dilakukan penambahan kontroler D terlihat respon pada motor tidak mengalami overshoot. Namun respon pada motor belum mencapai setpoint yang diperlihatkan garis warna merah. Sehingga perlu dilakukan penambahan kontroler I supaya respon dari motor mampu mencapai setpoint.

- $P = 10, I = 30, D = 0,01$



Gambar 4.4 Respon kontroler PID

Setelah dilakukan penambahan kontroler I pada proses tuning PID, terlihat respon dari motor mampu mencapai setpoint yang telah ditentukan. Sehingga nilai tuning PID pada kali ini dapat digunakan pada proses simulasi.

4.5 Hasil Simulasi.

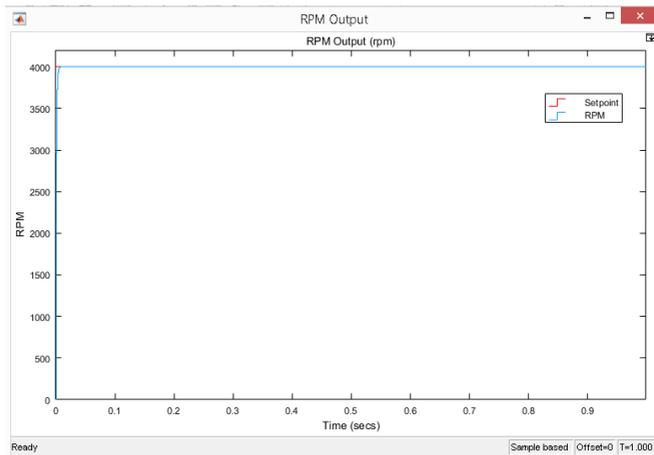
Pada simulasi kali ini nilai setpoint untuk kecepatan motor adalah 4000 rpm. Pada simulasi pertama akan dilakukan percobaan dengan mengubah nilai konstanta pada PID untuk mendapatkan respon yang stabil. Setelah respon telah stabil yakni nilai output rpm sesuai dengan input rpm maka dilanjutkan pada tahap simulasi kedua yaitu dengan mengubah nilai torsi input motor. Setelah dilakukan beberapa percobaan tuning PID

maka didapatkan nilai $K_p= 10$ $K_i= 30$ dan $K_d= 0,01$ yang paling mendekati nilai setpoint.

Terdapat 2 parameter hasil respon sinyal yang akan dilihat sebagai acuan untuk menentukan kinerja dari sistem dengan plant motor Brushless DC sesuai dengan ketentuan yang diinginkan pada penelitian tugas akhir ini. Parameter hasil respon sinyal yang dimaksud antara lain:

- a). Rpm output
- b). Arus pada stator

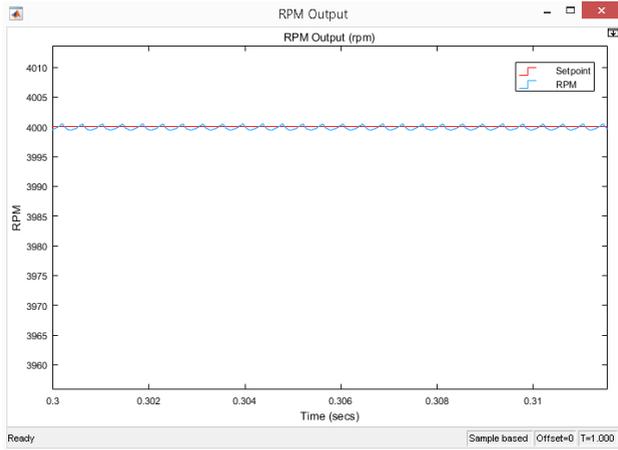
4.5.1 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,215



Gambar 4.5 Rpm output pada beban 0,215 Nm

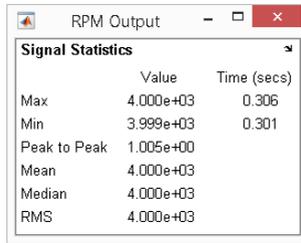
Dari grafik diatas rpm motor dapat mengikuti setpoint yang telah diberikan yaitu sebesar 4000 rpm. Hal ini terjadi karena pada beban torsi 0,215 Nm merupakan nilai torsi yang dihasilkan oleh motor pada saat kecepatan motor 4000 rpm. Dimana pada spesifikasi motor BLDC yang digunakan pada saat motor mencapai kecepatan

4000 rpm maka motor akan menghasilkan torsi sebesar 0,215 Nm. Sehingga pada hasil simulasi diatas sesuai dengan data yang diperoleh dari motor. Detail rpm output yang dihasilkan dari simulasi dengan beban torsi 0,215 Nm dapat diketahui dengan memilih penampilan *Signal Statistic* yang ada pada kotak dialog scope. Untuk gambar rpm output yang lebih detail ditunjukkan pada gambar 4.3



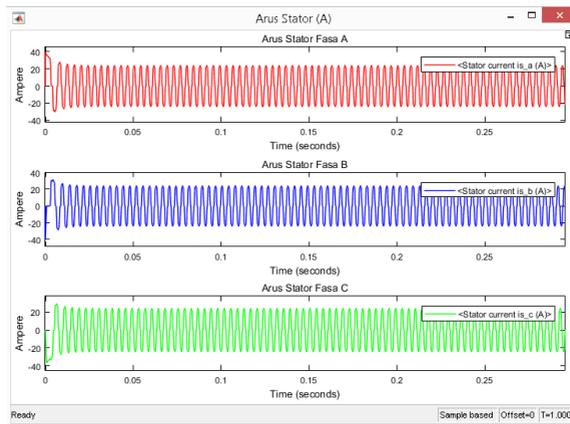
Gambar 4.6 Rpm output detail simulasi pertama

Pada gambar diatas menunjukkan respon kecepatan motor brushless dc ketika terkena beban torsi. Terlihat bahwa masih terjadi osilasi pada kecepatan motor brushless. Namun naik turunnya nilai kecepatan masih dalam range 4000 rpm.



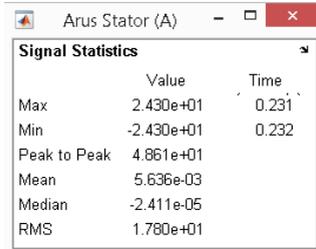
Gambar 4.7 Signal statistic rpm output pada beban 0,215 Nm

Dari gambar 4.7 diatas menunjukkan nilai mean dari grafik 4000 rpm. Nilai mean ini berasal dari naik turunnya rpm yang ada pada gambar 4.6.



Gambar 4.8 Arus stator pada beban 0,215 Nm

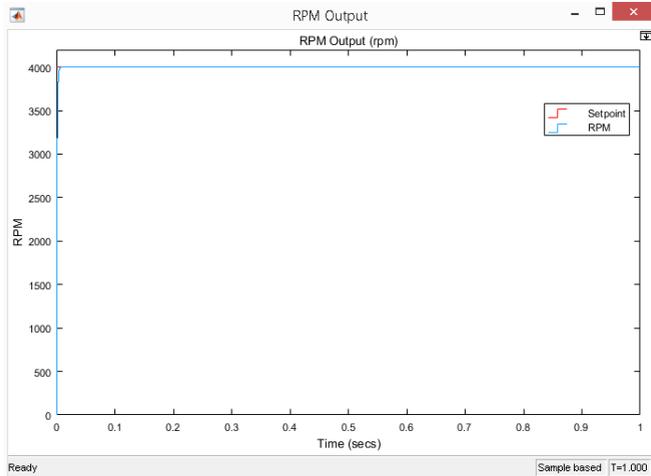
Terlihat pada gambar 4.8 arus pada stator terlihat mengalami naik turun. Hal ini terjadi karena arus yang mengalir pada stator adalah arus ac yang memiliki bentuk gelombang trapezoidal. Pada gambar diatas arus puncak pada stator mencapai 24,31 ampere sedangkan ketika arus turun mencapai -24,31 ampere seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6



Gambar 4.9 Signal Statistic Arus stator pada beban 0,215 Nm

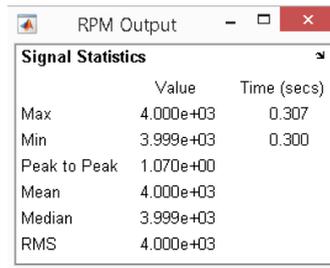
4.5.2 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,332

Pada simulasi kedua nilai input dari beban torsi dilakukan peningkatan nilai beban torsi. Nilai torsi awal motor yang sebesar 0,215 Nm dinaikkan menjadi 0,332 Nm.



Gambar 4.10 Rpm Output pada beban 0,322 Nm

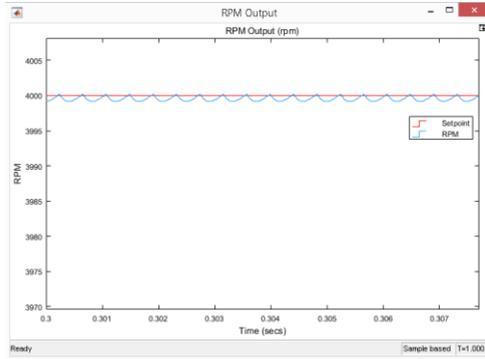
Pada simulasi kedua ini kecepatan dari motor mampu mengikuti setpoint kecepatan yang diberikan. Walaupun terjadi naik turun nilai pada kecepatan motor namun naik turunnya nilai kecepatan pada motor ini masih dalam range 4000 rpm. Hal ini ditunjukkan pada signal statistic pada gambar 4.11. Dimana untuk nilai mean dari pada grafik yang diperoleh yaitu sebesar 4000.



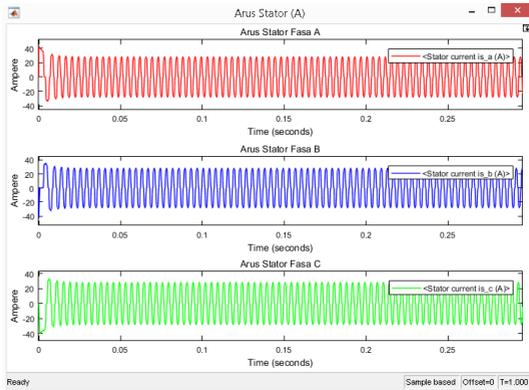
	Value	Time (secs)
Max	4.000e+03	0.307
Min	3.999e+03	0.300
Peak to Peak	1.070e+00	
Mean	4.000e+03	
Median	3.999e+03	
RMS	4.000e+03	

Gambar 4.11 Signal statistic rpm output pada beban 0,322 Nm

Tidak berubahnya kecepatan pada motor seperti pada simulasi pertama yakni sebesar 4000 rpm disebabkan pada simulasi kedua ini nilai torsi yang digunakan untuk pembebanan pada motor adalah nilai torsi yang diambil dari nilai torsi rata-rata pada motor dan nilai torsi maksimum yang dihasilkan oleh motor pada kecepatan 4000 rpm. Sehingga motor tetap mampu menahan beban torsi yang diberikan karena masih dalam batas kemampuan dari motor tersebut.



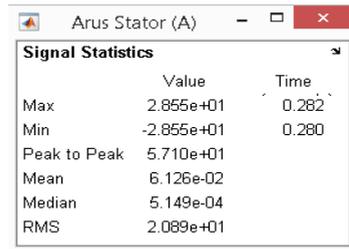
Gambar 4.12 Rpm output detail simulasi kedua



Gambar 4.13 Arus stator pada beban 0,322 Nm

Pada simulasi kedua ini nilai arus yang mengalir pada stator mengalami kenaikan sebanding dengan simulasi pertama. Kenaikan pada nilai arus ini berbanding lurus dengan kenaikan nilai torsi. Hal ini menunjukkan bahwa kendali PID mampu merespon perubahan nilai rpm yang terjadi dengan memanfaatkan umpan balik yang diberikan sensor hall effect. Dimana selanjutnya output sinyal kendali pada PID diteruskan

pada bagian inverter untuk menaikkan nilai arus pada stator.

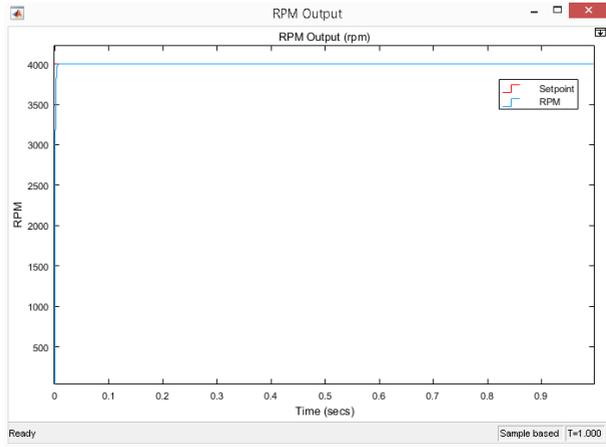


	Value	Time
Max	2.855e+01	0.282
Min	-2.855e+01	0.280
Peak to Peak	5.710e+01	
Mean	6.126e-02	
Median	5.149e-04	
RMS	2.089e+01	

Gambar 4.14 Signal statistic arus stator pada beban 0,322 Nm

Nilai arus stator saat dikenai beban torsi 0,322 pada batas atas adalah 28,55 Ampere sedangkan untuk nilai arus batas bawah pada -28,55 Ampere. Dimana terjadi kenaikan nilai arus sebesar 4,25 Ampere dibandingkan dengan nilai arus stator pada simulasi sebelumnya yang bernilai 24,30 ampere. Naik turunnya nilai arus pada stator motor disebabkan karena pada tiap fasanya mengalir tegangan positif dan tegangan negatif dimana adanya perbedaan polaritas yang mengalir pada kumparan stator akan menciptakan medan magnet sehingga akan terjadi tarik menarik antara medan magnet pada rotor dengan medan magnet yang timbul akibat aliran arus yang mengalir pada stator.

4.5.3 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,43 Nm



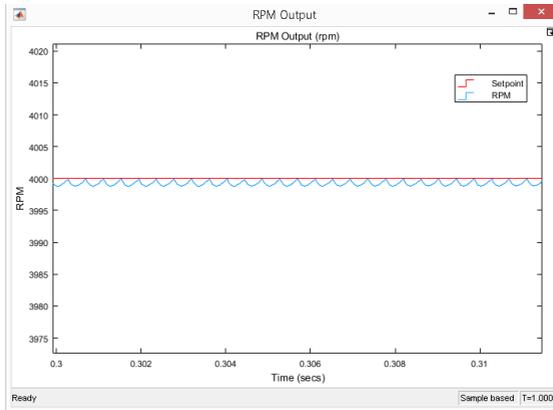
Gambar 4.15 Rpm Output pada beban 0,43 Nm

Pada gambar 4.15 nilai rpm pada motor mampu mencapai setpoint walaupun terjadi naik turun pada nilai kecepatannya. Hal ini disebabkan karena adanya slip yang diakibatkan oleh beban torsi yang menyebabkan putaran medan magnet pada rotor tidak sinkron dengan putaran medan magnet pada stator.

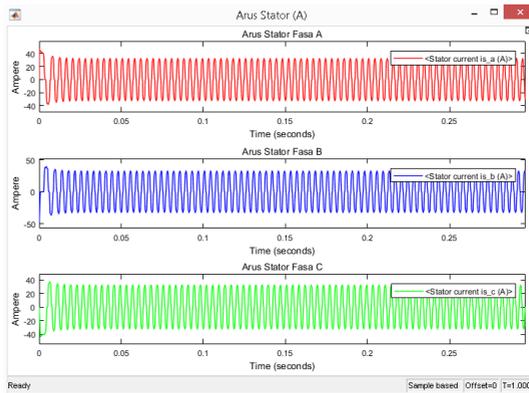
	Value	Time (secs)
Max	4.000e+03	0.311
Min	3.999e+03	0.300
Peak to Peak	1.146e+00	
Mean	3.999e+03	
Median	3.999e+03	
RMS	3.999e+03	

Gambar 4.16 Signal Statistik rpm output pada beban 0,43 Nm

Pada gambar diatas menunjukkan grafik rpm output simulasi percobaan yang telah dilakukan, yang menghasilkan nilai output motor berupa kecepatan putar maksimum mencapai 4000 rpm. Untuk mengetahui lebih detail berapa nilai kecepatan yang dihasilkan oleh motor dapat dilihat pada gambar 4.16. Dapat dilihat kecepatan putaran dari motor yang tetap mampu meraih setpoint yang ditunjukkan garis merah walaupun terjadi naik turun pada kecepatan motor. Hal ini disebabkan nilai beban torsi yang digunakan pada simulasi ketiga ini adalah nilai beban torsi maksimum yang dihasilkan oleh motor pada saat kecepatan 4000 rpm sehingga terjadi naik turun pada kecepatan motor, namun kecepatan motor tetap mampu mencapai setpoint yang ditentukan yaitu sebesar 4000 rpm.

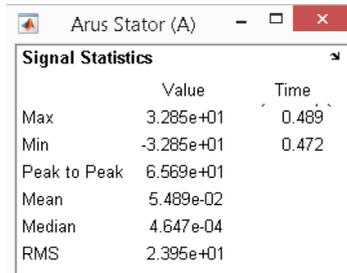


Gambar 4.17 Rpm output simulasi ketiga



Gambar 4.18 Arus stator pada beban 0,43 Nm

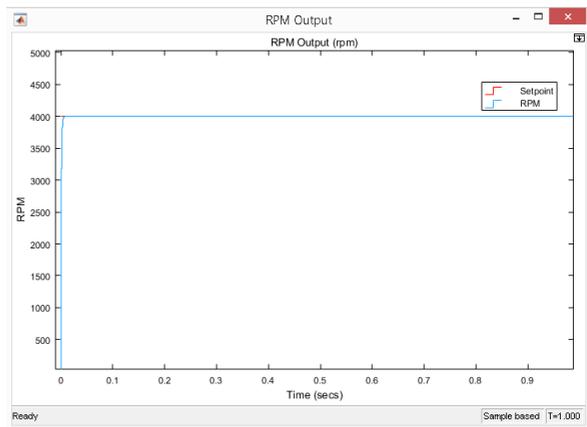
Pada gambar diatas terlihat bahwa arus pada stator mengalami kenaikan yang diakibatkan oleh naiknya beban torsi pada motor Brushless DC.



Gambar 4.19 Signal statistic arus stator pada beban 0,43 Nm

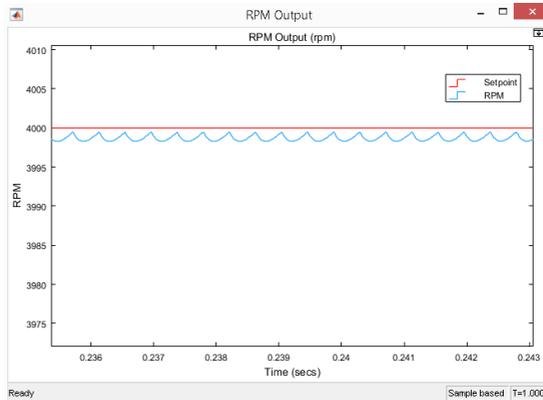
Pada gambar 4.19 menunjukkan arus yang mengalir pada stator untuk batas atas mencapai 32,85 ampere sedangkan untuk batas bawah -32,85 ampere.

4.5.4 Hasil Simulasi dengan beban torsi 0,537 Nm



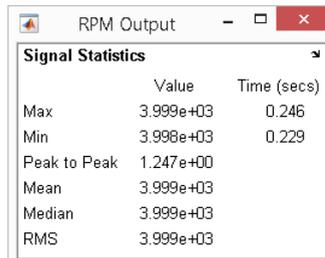
Gambar 4.20 Rpm output pada beban 0,537 Nm

Pada saat diberi torsi input sebesar 0,537 Nm nilai rpm pada motor Brushless DC mengalami error sebesar 0,025 % atau mengalami penurunan sebesar 1 rpm.



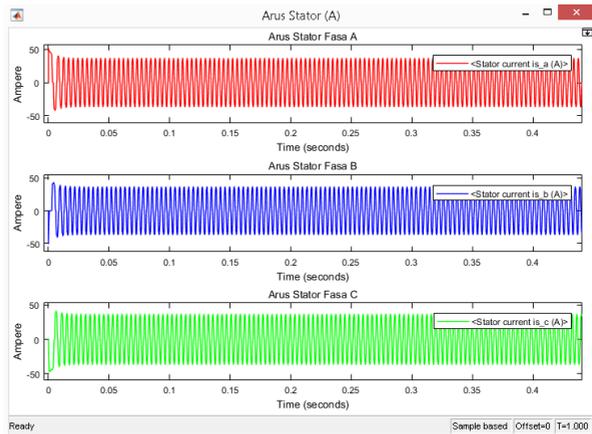
Gambar 4.21 Rpm output simulasi keempat

Pada gambar 4.21 nilai rpm terlihat mengalami naik turun namun naik turunnya nilai rpm pada gambar diatas masih pada range 3999 seperti yang ditunjukkan signal statistic pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.22 Signal statistic pada beban 0,537 Nm

Pada Simulasi keempat ini terlihat bahwa rpm pada motor turun menjadi 3999 rpm. Hal ini disebabkan pada nilai input untuk beban torsi yang digunakan yakni sebesar 0,537 Nm melebihi nilai torsi maksimum yang dapat dihasilkan oleh motor sehingga kecepatan pada motor tidak mampu mencapai pada setpoint yang telah ditentukan.



Gambar 4.23 Arus stator pada beban 0,537 Nm

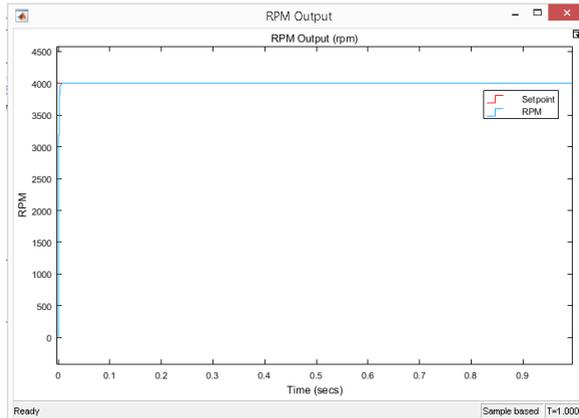
Saat motor diberi beban 0,537 Nm, arus pada stator mengalami peningkatan pada tiap fasanya yang ditunjukkan pada gambar 4.23. Dimana besarnya arus yang mengalir pada stator mencapai 37,10 Ampere untuk batas atas sedangkan untuk batas bawah bernilai -37,10 Ampere.

Signal Statistics		
	Value	Time
Max	3.710e+01	0.482
Min	-3.710e+01	0.356
Peak to Peak	7.420e+01	
Mean	3.511e-03	
Median	-1.949e-05	
RMS	2.698e+01	

Gambar 4.24 Signal statistic arus stator pada beban 0,537 Nm

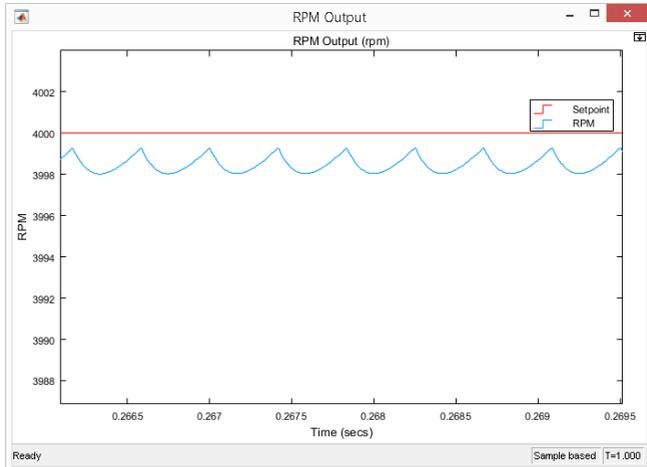
Dari signal statistic yang ditampilkan terjadi kenaikan nilai arus pada saat motor starting. Hal ini terjadi karena adanya slip yang timbul pada saat motor starting, dimana terjadi adanya perbedaan antara kecepatan medan putar pada stator dengan kecepatan rotor. Setelah motor mencapai kecepatan sinkronnya yaitu putaran rotor pada motor dengan putaran medan magnet pada stator berputar pada kecepatan yang sama (sinkron). Dimana arus pada stator saat mencapai kecepatan sinkronnya berada pada 37,10 Ampere untuk batas atas dan -37,10 Ampere untuk batas bawah.

4.5.5 Hasil Simulasi Beban Torsi 0,645



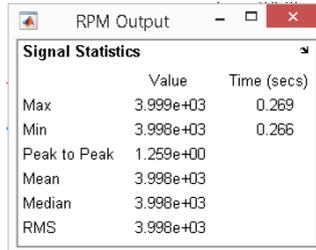
Gambar 4.25 Rpm output pada beban 0,645 Nm

Pada gambar diatas menunjukkan grafik rpm output atau kecepatan putan yang dihasilkan oleh motor berdasarkan simulasi percobaan yang telah dilakukan, yang menghasilkan nilai output motor berupa kecepatan putar maksimum mencapai 3998 rpm, dimana terjadi error sebesar 0,05 % dari nilai awal yang diinginkan yaitu 4000 rpm. Untuk mengetahui lebih detail berapa nilai kecepatan yang dihasilkan oleh motor dapat dilihat pada gambar 4.26.

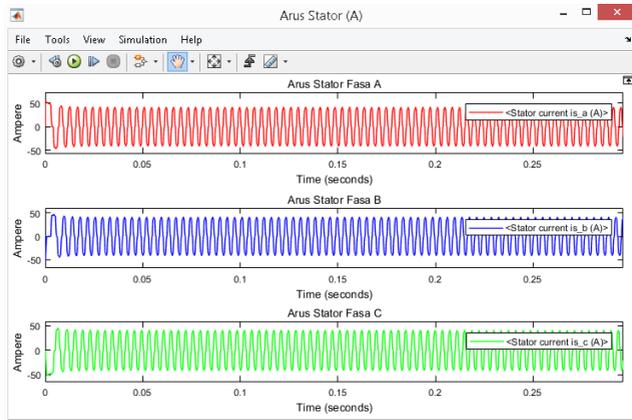


Gambar 4.26 Rpm output hasil simulasi kelima

Pada gambar diatas menunjukkan nilai output maksimum dari putaran motor yang diperbesar dalam range waktu 0,265 – 0,2695 detik. Dari gambar diatas menunjukkan bahwa putaran ang dihasilkan diperoleh sebesar 3998 rpm, penurunan tersebut terjadi akibat dari bertambahnya nilai beban torsi yang bekerja pada motor sehingga menghambat putaran dari motor. Selain itu pada simulasi keenam ini nilai torsi yang digunakan melebihi torsi maksimum dari motor ketika motor berada pada kecepatan 4000 rpm. Sehingga dapat dilihat pada signal statistic kecepatan putar dari motor hanya mencapai maksimum 3999 rpm dengan nilai mean 3998 rpm pada saat kecepatan motor naik turun.

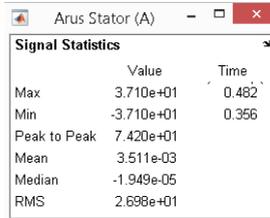


Gambar 4.27 Signal statistic rpm output pada beban torsi 0,645 Nm



Gambar 4.28 Arus stator pada beban 0,645 Nm

Berdasarkan data berupa grafik yang ditunjukkan pada gambar diatas, nilai arus pada stator yang berbeda untuk pembacaan grafik diatas. Terdapat tiga warna sebagai pembeda masing-masing fasa, garis dengan warna merah untuk fasa a, garis dengan warna biru untuk fasa b, dan terakhir garis dengan hijau untuk fasa c. untuk mengetahui detail dari nilai arus yang mengalir pada stator dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 4.29 Signal statistic arus stator

Nilai arus stator maksimum saat terjadi beban torsi 0,645 adalah 41,41 Ampere sedangkan untuk nilai arus stator minimum adalah -41,41 Ampere. Dimana terjadi kenaikan nilai arus sebesar 4,31 ampere dibandingkan dengan nilai arus stator pada simulasi sebelumnya yang bernilai 37,10 ampere.

4.7 Data Hasil Simulasi

Setelah dilakukan simulasi dengan variasi beban torsi, diperoleh data hasil simulasi yang ditunjukkan pada table berikut:

Tabel 4.3 Data hasil simulasi

Rpm input	Torsi (N.m)	Arus (Ampere)	Rpm output	Error (%)
4000	0,215	24,30	4000	0
	0,322	28,55	4000	0
	0,43	32,85	4000	0
	0,537	37,10	3999	0,025
	0,645	41,41	3998	0,05

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan yaitu membuat desain sistem motor listrik Brushless DC dengan menggunakan simulasi dari software matlab Simulink r2018a diperoleh respon berupa grafik yang kemudian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut;

1. Pada simulasi yang telah dilakukan, ketika motor diberi beban torsi 0,215 Nm, 0,322 Nm, dan 0,43 Nm kecepatan putar pada motor mampu mengikuti setpoint yang diberikan walaupun terjadi naik turun pada kecepatannya. Sedangkan ketika motor diberi beban 0,537 Nm dan 0,645 Nm motor mengalami penurunan masing-masing sebesar 1 rpm.
2. Peningkatan nilai torsi pada motor juga berakibat pada naiknya nilai arus stator pada motor dimana terjadi kenaikan rata-rata sebesar 4 ampere pada tiap kenaikan nilai beban torsi. Hal ini disebabkan karena pengendali PID mengirim sinyal error yang berupa sinyal pulsa ke inverter lalu digunakan untuk mempercepat frekuensi switching pada inverter sehingga menaikkan nilai arus yang mengalir pada motor.

5.2 SARAN

Dalam pengerjaan dan penyelesaian Proyek Akhir ini tentu tidak lepas dari berbagai macam kekurangan dan kesalahan. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut dan masukan untuk perbaikan sistem menjadi lebih sempurna,

maka perlu dilakukan hal-hal sebagai berikut :

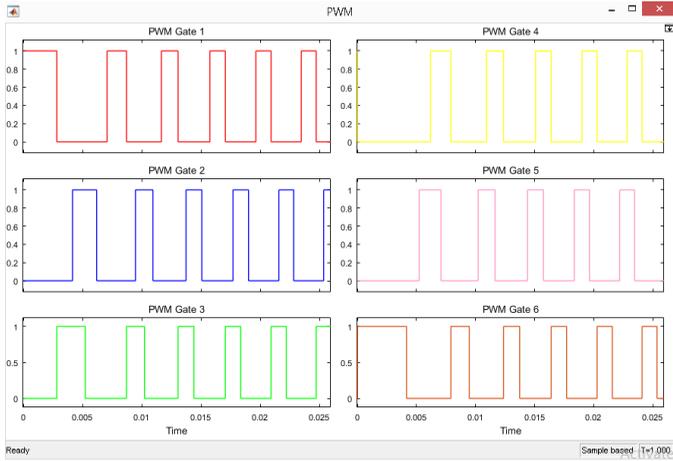
1. Dalam simulasi kali ini untuk lebih diperhatikan detail pada spesifikasi kontrolernya sehingga akan diperoleh hasil yang lebih maksimal.
2. Dapat digunakan sistem kendali yang lebih modern seperti kendali fuzzy atau adaptive tuning PID yang mampu mengatasi perubahan beban yang sering terjadi serta meminimalisir nilai error yang ditimbulkan.

DAFTAR PUSTAKA

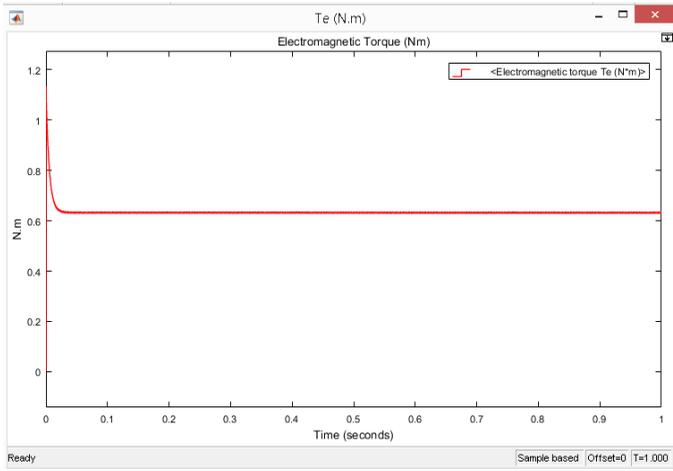
1. Alshehabi, *Improving the Performance of Brushless DC Motor Using the Six Digits form of SVPWM Switching Mode*, Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran, 2012
2. V.Viswanathan. *A Novel Current Controlled Space Vector Modulation based Control Scheme for Reducing Torque Ripple in Brushless DC Drives*, Research Scholar, Department of EEE, JNTU, Hyderabad, India, 2011
3. Philip, Preetha. *Modelling Of Brushless DC Motor Drive Using Sensored And Sensorless Control (back EMF zero crossing etection)*, Dept. of Electrical Engg. Govt. Engineering College, Thrissur, 2012
4. K. Giridharan, *Implementation Of A Brushless Dc Motor As A Virtual Motor*, Department of Electrical Engineering, VIT University, India. 2013
5. Steffy, S. Assly. *Analysis And Simulation Of Speed Control Of PMSBLDC MOTOR by PI Controller*, Sri Shakthi Institute of Engineering and Technology, Coimbatore, India, 2011
6. S. Baldursson, *BLDC Motor Modelling and Control–A MATLAB/Simulink Implementation*, Master Thesis, May, 2005.
7. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan)* Jilid 1, Erlangga, Jakarta, 1995
8. Muhammad Azzumar. *“Pemodelan dan Simulasi Brushless DC Motor Kecil Untuk Aplikasi Aktuator Sirip Roket”* Skripsi UI 2012

LAMPIRAN

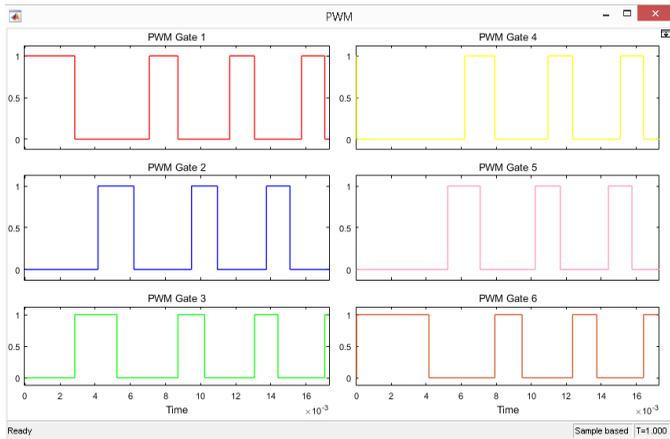
PWM simulasi pertama



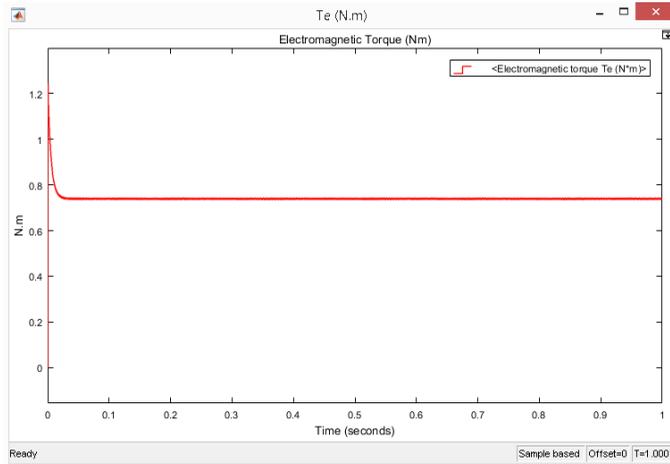
Torsi Elektromagnetik simulasi pertama



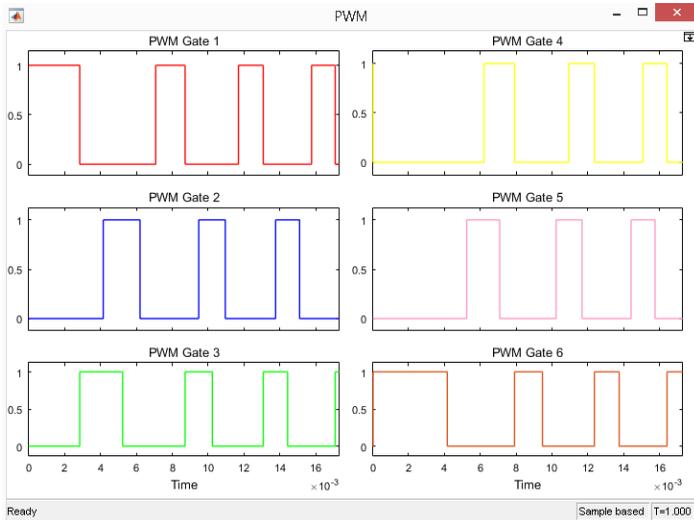
PWM simulasi kedua



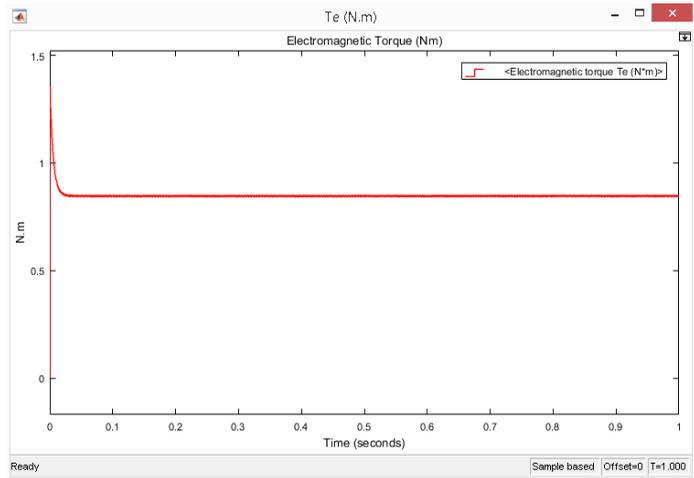
Torsi Elektromagnetik simulasi kedua



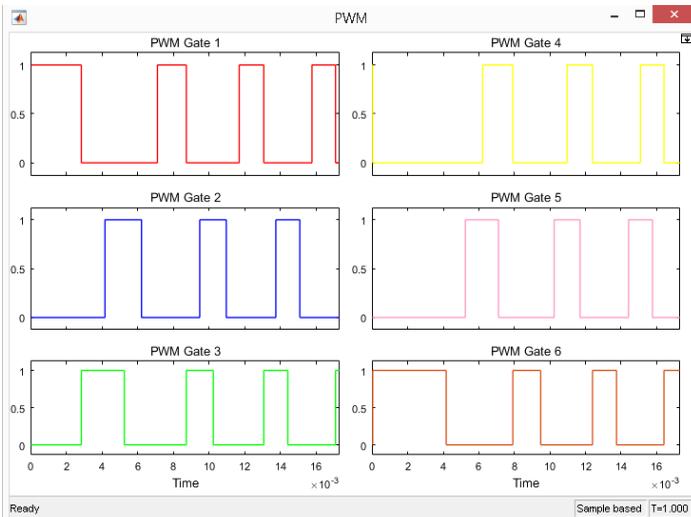
PWM simulasi ketiga



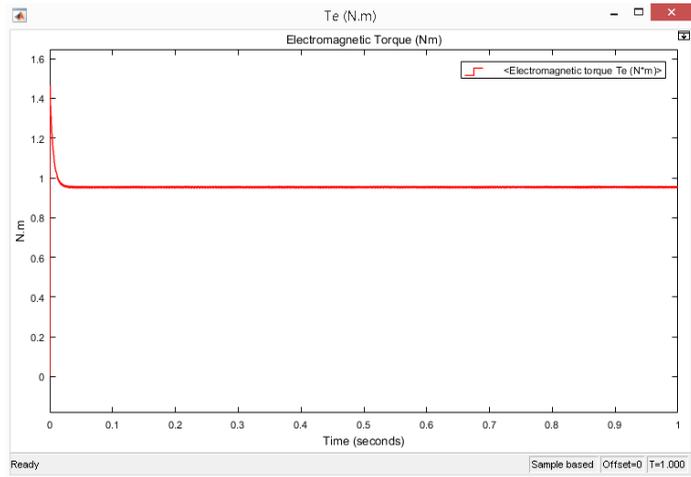
Torsi Elektromagnetik simulasi ketiga



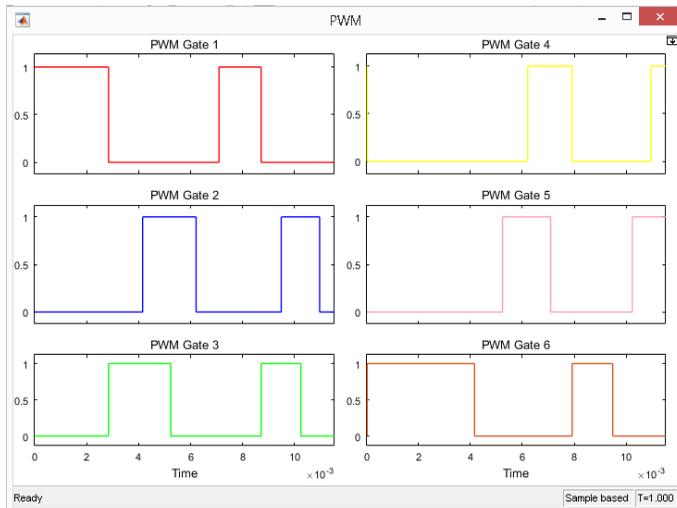
PWM simulasi keempat



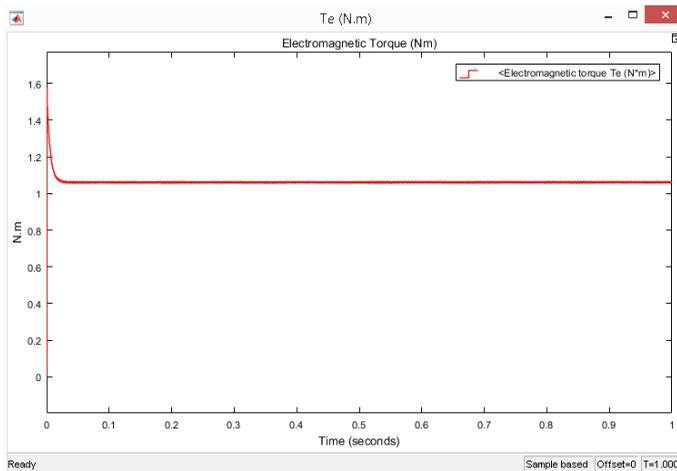
Torsi elektromagnetik simulasi keempat



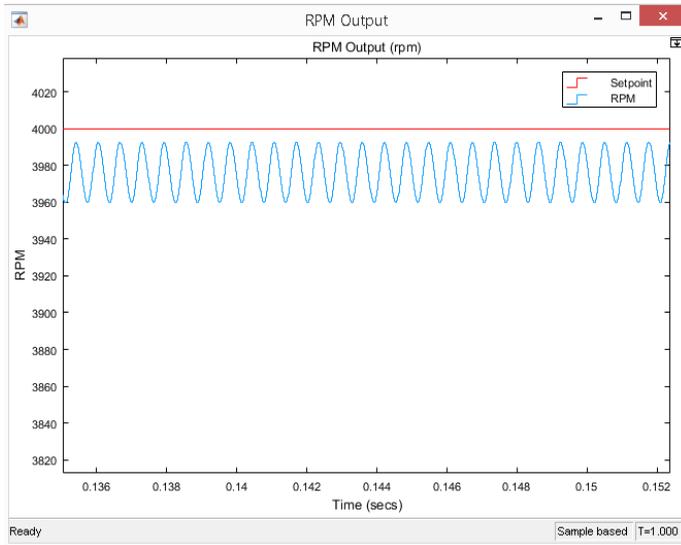
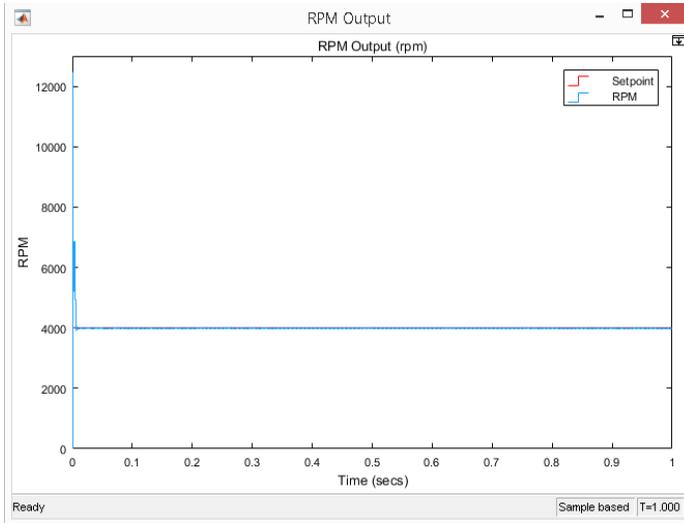
PWM simulasi kelima



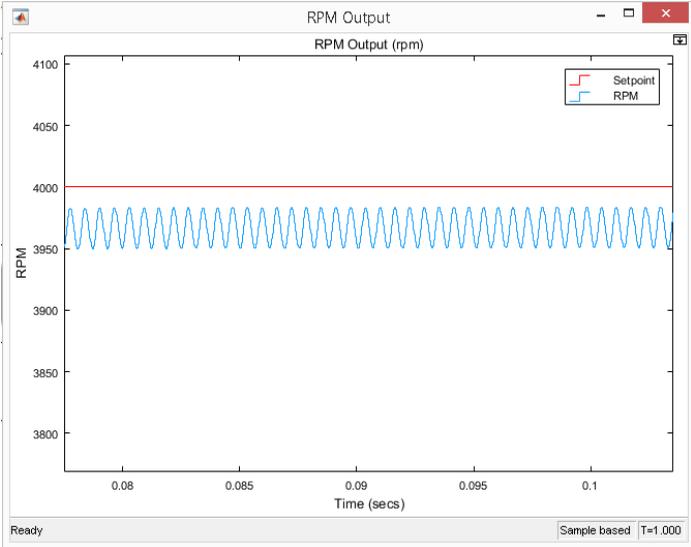
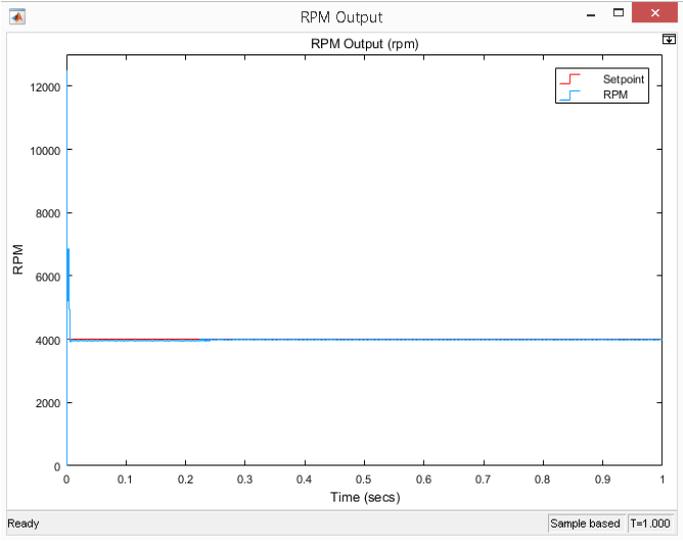
Torsi Elektromagnetik simulasi kelima



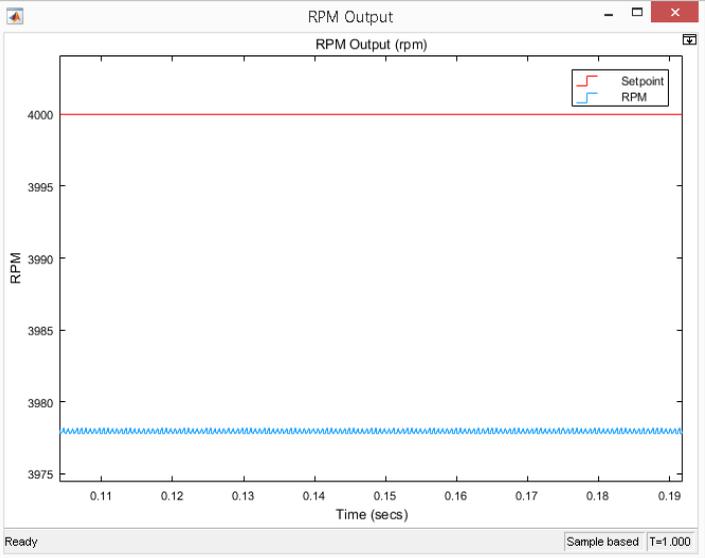
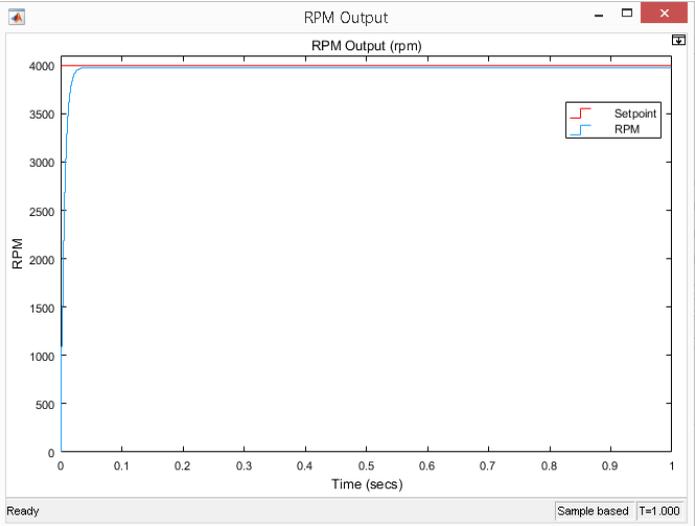
Kontroler P



Kontroler PI



Kontroler PD



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Bojonegoro, 11 Juni 1996, merupakan anak bungsu dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN Sidomukti 1, SMPN 1 Baureno, dan MAN 1 Bojonegoro. Pada tahun 2014 Penulis diterima di Jurusan D3 Teknik Mesin FV-ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2114 030 080. Sistem Pengendalian Dasar merupakan bidang studi yang dipilih penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Selama duduk di bangku kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam organisasi. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Menjadi staff BSO Jundullah HMDM FfV-ITS Periode 2015-2016. PT Semen Indonesia plant Tuban merupakan tempat kerja praktek penulis selama satu bulan pada tanggal 01 Agustus s/d 31 Agustus 2016 di bidang perawatan mesin.

Pelatihan yang pernah diikuti penulis : Pelatihan Karya Tulis Ilmiah ITS (2014), Pelatihan Motor Bakar HMDM FV-ITS (2014), Pelatihan LKMM Pra-Tingkat Dasar (Pra-TD) FTI-ITS (2014). Selain pelatihan penulis juga mengikuti beberapa lomba seperti lomba karya tulis ilmiah di tingkat kampus serta pernah mengikuti PKM lima bidang.

Email: rosyid2330@gmail.com