



TUGAS AKHIR - TE141599

**PENGATURAN KECEPATAN SPINDLE MESIN BUBUT
DENGAN KONTROLER PID AGAR KECEPATAN POTONG
BENDA-KERJA TETAP KONSTAN**

Hendri Budi Santoso
NRP 07111340000153

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Mochammad Rameli

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE141599

**SPEED CONTROL OF SPINDLE OF TURNING MACHINE
WITH PID CONTROLLER IN ORDER CUTTING SPEED OF
THE WORKPIECE REMAINS CONSTANT**

Hendri Budi Santoso
NRP 0711134000153

Supervisor
Dr. Ir. Mochammad Rameli

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Pengaturan kecepatan Spindle Mesin Bubut dengan kontroler PID agar keepatan potong Benda-kerja tetap konstan**” adalah merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 29 Januari 2018

Hendri Budi Santoso
Nrp 07111340000153

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**PENGATURAN KECEPATAN SPINDLE MESIN BUBUT
DENGAN KONTROLER PID AGAR KECEPATAN POTONG
BENDA-KERJA TETAP KONSTAN**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh

Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Teknik Pengaturan

Departemen Teknik Elektro

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Mochammad Rameli

195412271981031002



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PENGATURAN KECEPATAN SPINDLE MESIN BUBUT DENGAN KONTROLER PID AGAR KECEPATAN POTONG BENDA-KERJA TETAP KONSTAN

Hendri Budi Santoso – 07111340000153

Pembimbing : Dr. Ir. Mochammad Rameli

ABSTRAK

Mesin bubut merupakan suatu jenis mesin perkakas yang dalam proses kerjanya memotong atau menyayat benda kerja yang berputar dengan menggunakan mata potong pahat sebagai alat untuk memotong. Bagian mesin bubut yang memutar benda kerja adalah *Spindle*. Penggerak *Spindle* yang digunakan pada penelitian ini adalah Motor DC penguat terpisah. Dalam proses pemotongan benda kerja terjadi variasi kedalaman potong yang mengakibatkan variasi kecepatan putar *Spindle*. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan bahwa dengan menerapkan kontroler PID *step-response* sistem memiliki *overshoot* 11,03% dan bila terjadi variasi kedalaman mata potong paha maka kecepatan *spindle* dapat dikembalikan ke keadaan *steady-state*. Semakin dalam kedalaman mata potong pahat maka semakin besar *recovery time*-nya.

Kata kunci : *Spindle* mesin bubut, Motor DC, dan kontroler PID.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

SPEED CONTROL OF SPINDLE OF TURNING MACHINE WITH PID CONTROLLER IN ORDER CUTTING SPEED OF THE WORK-PIECE REMAIN CONSTANT

Hendri Budi Santoso – 07111340000153

Supervisor : Dr. Ir. Mochammad Rameli

ABSTRACT

Turning machine is a kind of machine tool that in the process of working cut a rotating workpiece by using cutting chisel as a tool to cut. The lathe part that rotates the workpiece is Spindle. The Spindle drive used in this study is a separate excited DC motor. In the process of cutting the workpiece there is a variation of cutting depth which resulted in spindle rotation speed variation. Based on the simulation results it is found that by applying PID controller on Spindle system that spindle rotation speed response has overshoot about 11,03% and if there are variation on depth of cut the spindle speed can be maintain at steady-state value. The deeper depth of cut then the larger recovery time.

Keywords : *Spindle of turning machine, DC motor, and PID controller.*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Pengaturan kecepatan *spindle* mesin bubut dengan kontroler PID agar kecepatan potong benda-kerja tetap konstan”** Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih atas segala bantuan dan dukungannya yang telah diberikan selama proses pembuatan tugas akhir ini kepada :

1. Orang tua tercinta dan kerabat yang senantiasa memberikan doa serta dukungan.
2. Bapak Mochammad Rameli selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan pengarahan dan motivasi dalam mengerjakan tugas akhir ini.
3. Seluruh staf pengajar dan karyawan di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
4. Rekan-rekan asisten laboratorium Teknik Sistem Pengaturan dan angkatan 2013.
5. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari masih mungkin banyak kekurangan dalam tugas akhir ini sehingga kritik dan saran untuk perbaikan tugas akhir ini sangat diperlukan. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 29 Januari 2018

Hendri Budi Santoso
NRP 07111340000153

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	2
1.5 Sistematika	2
1.6 Relevansi	3
BAB 2 DASAR TEORI	5
2.1 Motor DC (<i>Direct Current</i>).....	5
2.1.1 Prinsip Kerja Motor DC.....	6
2.1.2 Jenis-Jenis Motor DC.....	8
2.2 Mesin Bubut	13
2.3 Kontroler PID	14
2.3.1 Kontroler Proporsional.....	15
2.3.2 Kontroler Integral	15
2.3.3 Kontroler Differensial.....	15
2.4 Operational Amplifiers.....	15
2.4.1 Op-amp dengan konfigurasi Inverting	16
2.4.2 Op-amp dengan konfigurasi <i>Non-inverting</i>	17
2.4.3 Op-amp sebagai <i>subtractor</i>	18

2.4.4 Op-amp sebagai integrator dan differensiator	18
2.5 Metode identifikasi sistem.....	20
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM.....	23
3.1 Perumusan Sistem <i>Spindle</i> Mesin Bubut	23
3.2 Identifikasi Sistem <i>Spindle</i>	24
3.3 Perancangan Sistem Pengaturan	26
3.3.1 Perancangan Pembangkit PWM Dan Driver	27
3.3.2 Perancangan Sensor Kecepatan	32
3.3.3 Perancangan <i>Error Detector</i>	32
3.3.4 Perancangan Kontroler PID.....	33
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA	37
4.1 Pengujian Komponen.....	37
4.2 Pengujian Loop Tertutup.....	41
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1 Kesimpulan.....	45
2.2 Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	47
LAMPIRAN	49
Lampiran 1. Data Pengukuran Tegangan Masukan Dan Keluaran Driver	49
Lampiran 2. Perhitungan penguatan pada Pembangkit PWM dan Driver	49
Lampiran 3. Akuisisi data	50
Lampiran 4. Simulasi Pada Simulink	52
RIWAYAT HIDUP	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema sederhana motor DC	5
Gambar 2.2 Ilustrasi motor DC sederhana.....	6
Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen motor DC penguat terpisah.....	8
Gambar 2.4 Karakteristik kecepatan-torsi motor DC penguat terpisah	10
Gambar 2.5 Rangkaian ekuivalen motor DC shunt.....	11
Gambar 2.6 Karakteristik kecepatan-torsi pada motor DC shunt	11
Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen motor DC seri	12
Gambar 2.8 Karakteristik kecepatan-torsi motor DC shunt	12
Gambar 2.9 Bagian-bagian mesin bubut	13
Gambar 2.10 Struktur kontroler PID.....	14
Gambar 2.11 Konfigurasi inverting pada Op-amp.....	16
Gambar 2.12 Konfigurasi non-inverting pada Op-amp.....	17
Gambar 2.13 Op-amp sebagai differensiator	19
Gambar 2.14 Rangkaian skematik differensiator.....	19
Gambar 2.15 Step-response sistem untuk menentukan t_i , TU dan TN	20
Gambar 3.1 Sistem spindle mesin bubut	23
Gambar 3.2 step-response pada spindle mesin bubut.....	24
Gambar 3.3 step-response kecepatan spindle disertai garis singgung titik belok.....	25
Gambar 3.4 Perbandingan step-response data asli dan step-response hasil identifikasi	26
Gambar 3.5 Pin-pin pada IC SG3524N.....	27
Gambar 3.6 Rangkaian dalam IC SG3524N.....	28
Gambar 3.7 Rangkaian Pembangkit sinyal PWM.....	29
Gambar 3.8 Rangkaian driver	30
Gambar 3.9 Rangkaian pengkondisian sinyal untuk pembangkit sinyal PWM	31
Gambar 3.10 Rangkaian error detector.....	33
Gambar 3.11 Rangkaian elektronik kontroler PID.....	33
Gambar 3.12 Blok diagram sistem pengaturan spindle mesin bubut ...	34
Gambar 4.1 Diagram pengujian error detector	37
Gambar 4.2 Diagram pengujian Pembangkit PWM dan Driver	38
Gambar 4.3 Grafik hubungan tegangan masukan Pembangkit PWM dan keluaran Driver	39

Gambar 4.4	Perbandingan data pengukuran dan garis pendekatan.....	40
Gambar 4.5	Diagram pengujian tachogenerator	40
Gambar 4.6	Gambar pengujian sistem loop tertutup.....	42
Gambar 4.7	Respons sistem dengan kedalaman potong yang bervariasi	42
Gambar 4.8	Sinyal kontrol dengan variasi kedalaman potong	43

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 penentuan n dan y_i	21
Tabel 3.1 Deskripsi tiap pin out SG3524N.....	28
Tabel 4.1 Hasil pengujian <i>error detector</i>	37
Tabel 4.2 Data pengukuran kecepatan putar dan tegangan keluaran tachogenerator	41

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

Bab ini mengantarkan pembaca untuk dapat menjawab pertanyaan mengapa, apa yang diteliti, untuk apa suatu penelitian dilakukan. Jawaban pertanyaan tersebut akan diuraikan pada bab ini yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika dan relevansi.

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan industri manufaktur, menghasilkan produk yang semakin berkualitas sangat diperlukan. Dalam industri manufaktur skala menengah mesin bubut konvensional masih sering digunakan sebagai alat produksinya. Mesin bubut adalah salah satu jenis mesin perkakas yang pada prinsip kerjanya yaitu memutar benda kerja kemudian benda kerja tersebut disayat dan / atau dipotong dengan menggunakan mata potong pahat. Kualitas dari hasil pembubutan dapat ditentukan dari tingkat kehalusan produk. Hasil pembubutan dengan tingkat kehalusan yang baik sangat penting karena hasil pembubutan seringkali merupakan komponen-komponen mekanik yang digunakan untuk konstruksi suatu sistem mekanik. Sehingga produk hasil pembubutan dengan tingkat kehalusan yang baik dapat mempercepat waktu pemasangan komponen dan menghindari proses pemasangan komponen tambahan. Selain itu, tingkat kehalusan juga mempengaruhi gesekan permukaan, refleksi cahaya, transmisi panas, kemampuan mendistribusikan dan menahan minyak pelumas, dan lain sebagainya.

Dalam proses penyayatan atau pemotongan benda kerja (proses pembubutan) terjadi perubahan kedalaman potong untuk mendapatkan produk dengan bentuk tertentu. Perubahan kedalaman potong ini akan mengakibatkan perubahan kecepatan putar pada *spindle*. Semakin dalam kedalaman potong mengakibatkan semakin turun kecepatan putar *spindle* yang mengakibatkan terjadi perubahan juga pada kecepatan potong benda. Penurunan kecepatan potong akan mempengaruhi tingkat kehalusan hasil pembubutan. Sehingga pada mesin bubut diperlukan kontroler untuk mengatur kecepatan putar *spindle* mesin bubut sedemikian hingga kecepatan-potong benda dapat dipertahankan sesuai pada level tertentu.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan permasalahan pada Tugas Akhir ini adalah penurunan kecepatan potong benda kerja pada mesin bubut akibat semakin dalamnya kedalaman mata potong pahat.

1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini yaitu menerapkan kontroler PID sehingga didapatkan kecepatan potong benda kerja pada mesin bubut tetap konstan.

1.4 Metodologi

Metodologi pada kegiatan penelitian tugas akhir ini mencakup studi literatur, identifikasi *plant*, perancangan sistem, dan uji coba. Studi literatur dilakukan dengan membaca buku dan penelitian yang relevan dengan topik tugas akhir ini. Tahap yang selanjutnya yaitu identifikasi *plant* yang dilakukan dengan melakukan akuisisi data dari *step response* kecepatan *spindle* mesin bubut pada keadaan *open-loop*. Data yang didapatkan kemudian digunakan untuk mendapatkan fungsi alih dari *spindle* mesin bubut. Pada tahap perancangan sistem, dilakukan perancangan komponen-komponen yang diperlukan untuk membangun sistem pengaturan. Komponen-komponen tersebut adalah sensor kecepatan, kontroler PID, pembangkit sinyal PWM, driver motor dan *power supply*. Selanjutnya, dilakukan pengujian untuk menguji respon sistem telah sesuai dengan spesifikasi atau belum.

1.5 Sistematika

Penulis membagi laporan penelitian ini menjadi lima bab yang terhubung satu sama lain. Hal ini untuk menghindari kesalahan interpretasi terhadap isi yang terdapat di dalam laporan. Penjelasan tentang masing-masing bab dibuat dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika dan relevansi.

Bab 2 Dasar Teori

Bab ini membahas tinjauan pustaka terkait dengan Mesin bubut, Motor DC, Kontroler PID, dan Op-amp.

Bab 3 Perancangan Sistem

Bab ini membahas perancangan sistem secara keseluruhan yang mencakup perancangan PWM, Driver motor, Kontroler PID, serta diagram blok sistem pengaturan *spindle*.

Bab 4 Pengujian dan Analisa

Pada bab ini dibahas mengenai hasil yang didapatkan berikut analisisnya.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

1.6 Relevansi

Kualitas dari hasil pembubutan benda kerja sangat penting untuk didapatkan. Kualitas hasil pembubutan dipengaruhi oleh kecepatan putar *Spindle* Mesin bubut. Sehingga sangat penting untuk menjaga kecepatan putar *Spindle* pada level yang diinginkan. Pada penelitian ini, diharapkan akan didapatkan kecepatan *Spindle* yang dapat dipertahankan pada level tertentu dengan kedalaman potong yang bervariasi.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

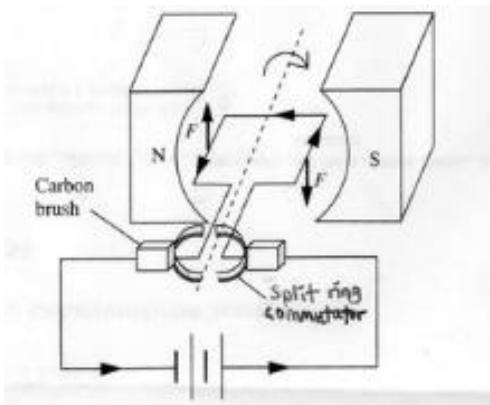
BAB 2

DASAR TEORI

Pada bab ini akan dibahas teori-teori terkait dengan topic penelitian ini. Teori-teori tersebut dikaji sebagai penunjang penelitian yang dilakukan.

2.1 Motor DC (*Direct Current*)

Motor DC atau Motor arus searah adalah motor yang menggunakan sumber tegangan DC sebagai catu dayanya. Motor DC sering digunakan pada sistem yang memerlukan torsi-mula yang tinggi dan variasi kecepatan yang lebar. Secara umum, Motor DC dapat digambarkan sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.1



Gambar 2.1 Skema sederhana motor DC

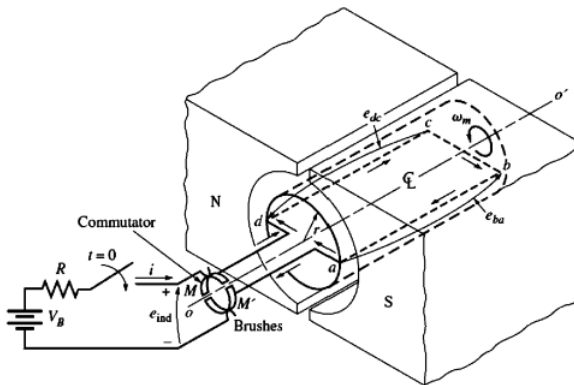
Dari gambar 2.1 dapat kita lihat bahwa secara umum, motor DC memiliki komponen-komponen utama sebagai berikut:

- a. Stator
Berfungsi sebagai sumber fluks magnetik. Stator dapat berupa magnet permanen atau kumparan yang menghasilkan medan magnetik bila dialiri arus listrik.
- b. Rotor
Rotor merupakan bagian dari Motor yang berputar

- c. *Brushes* (Sikat)
Berfungsi sebagai penghubung antara catu daya dan rotor sehingga memungkinkan mengalirnya arus menuju rotor melalui brushes.
- d. Komutator
Komutator berfungsi sebagai penyearah putaran rotor [1].

2.1.1 Prinsip Kerja Motor DC

Untuk memahami prinsip kerja motor DC digunakan ilustrasi sebuah motor DC sederhana yang ditunjukkan oleh **Error! Reference source not found.**. Misalkan sebuah motor DC terdiri dari rotor yang merupakan suatu *loop* konduktor yang dapat berputar pada porosnya dan stator yang merupakan magnet permanen sebagai sumber medan magnetnya. Bagian yang berputar pada motor disebut rotor dan bagian motor yang diam disebut stator.



Gambar 2.2 Ilustrasi motor DC sederhana

Bila rotor terhubung dengan sumber tegangan listrik maka berdasarkan hukum Lorentz akan timbul gaya pada rotor yang besarnya sebanding

dengan arus yang melalui konduktor dan medan magnet [1]. Besarnya gaya Lorentz adalah

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (2.1)$$

dimana i , l , dan B secara berturut-turut adalah arus yang melalui konduktor, panjang konduktor, dan medan magnet. Besarnya torsi yang diakibatkan oleh suatu gaya adalah

$$\tau = rF \sin\theta \quad (2.2)$$

dimana θ adalah sudut antara $\mathbf{r}$ dan $\mathbf{F}$. Untuk mengetahui total torsi yang bekerja pada rotor maka dapat kita buat beberapa bagian pada rotor yaitu bagian ab, bc, cd dan da.

- Bagian ab : gaya yang bekerja pada bagian ab adalah $F_{ab} = ilB$ (arah arus dan medan magnet saling tegak lurus) sehingga besarnya torsi yang bekerja pada bagian ab adalah $\tau_{ab} = rilB$ (melawan arah jarum jam)
- Bagian bc : besarnya gaya yang bekerja pada bagian bc adalah nol karena arus dan medan magnet searah. Dengan demikian pada bagian bc torsi yang bekerja adalah nol.
- Bagian cd : besarnya gaya yang bekerja pada bagian cd sama besar dengan gaya yang bekerja pada bagian ab namun memiliki arah yang berlawanan karena arah arus berlawanan. Namun torsi yang bekerja pada bagian ini arah dan besarnya sama.
- Bagian da : pada bagian da besarnya gaya dan torsi adalah nol karena arah arus dan arah medan magnet berlawanan.

Sehingga total torsi yang bekerja pada rotor adalah

$$\tau = 2rilB \quad (2.3)$$

atau dapat juga dinyatakan dalam fluks magnetik sebagai

$$\tau = \frac{2}{\pi} \phi i \quad (2.4)$$

dimana ϕ adalah fluks magnetic yang merupakan hasil perkalian titik antara medan magnet dan luas permukaan konduktor efektif yang

dilaluinya. Di lapangan, rotor pada motor DC merupakan lilitan sehingga besarnya torsi pada motor DC adalah

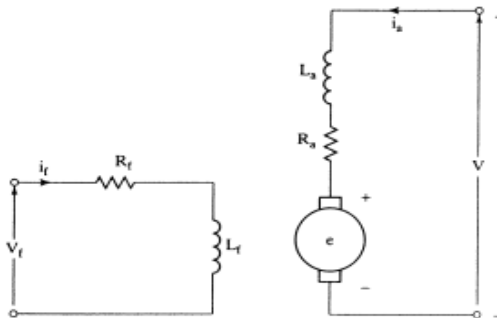
$$\tau = K\phi i \quad (2.5)$$

2.1.2 Jenis-Jenis Motor DC

Motor DC memiliki beberapa jenis dengan karakteristik yang berbeda. Jenis – jenis motor DC diantaranya Motor DC penguat terpisah, Motor DC shunt, Motor DC seri, dan Motor DC kompon.

2.1.2.1 Motor DC penguat terpisah

Motor DC penguat terpisah memiliki rangkaian ekuivalen sebagai berikut.



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen motor DC penguat terpisah

Pada motor DC penguat tepisah seperti **Error! Reference source not found.**, rangkaian sumber fluks magnetik terpisah dari rotor sehingga untuk mengatur kecepatan atau torsi pada rotornya dapat dilakukan dengan mengatur tegangan / arus pada kumparan jangkar atau mengatur arus pada kumparan medan. Persamaan yang berlaku pada motor DC penguat terpisah dapat kita turunkan sebagai berikut.

Pada sisi jangkar, berlaku hukum kirchoff I, sehingga

$$\sum V = 0 \quad (2.6)$$

$$-V_T + i_A R_A + L_A \frac{di_A}{dt} + e_A = 0 \quad (2.7)$$

Besarnya gaya gerak listrik (ggl) rotor sebanding dengan fluks magnetik dan kecepatan putar rotor sehingga

$$e_A = K_T \omega \quad (2.8)$$

Sehingga persamaan (2.7) dapat dituliskan kembali menjadi

$$-V_T + i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_T \omega = 0 \quad (2.9)$$

dalam transformasi laplace dapat dituliskan sebagai

$$-V_T(s) + I_a(s)R_a + sL_a I_a(s) + K_T \Omega(s) = 0 \quad (2.10)$$

Pada rotor torsi yang bekerja yaitu torsi yang dibangkitkan oleh arus DC dan torsi akibat gesekan yang arahnya selalu berlawanan dengan arah putar. Persamaan untuk torsi pada rotor yaitu

$$\sum \tau = J \frac{d^2 \omega}{dt^2} \quad (2.11)$$

$$K_T i_a - B \omega = J \frac{d^2 \omega}{dt^2} \quad (2.12)$$

Dalam transformasi laplace dapat dituliskan

$$K_T I_a(s) - sB \Omega(s) = s^2 J \Omega(s) \quad (2.13)$$

dengan menggunakan persamaan (6) dan (9) maka didapatkan

$$\frac{\Omega(s)}{V_T(s)} = \frac{K_T}{Js^2 + Bs + K_T^2} \quad (2.14)$$

Dimana

V_T = tegangan terminal (V)

i_a = arus pada kumparan jangkar (A)

R_A = resistansi kumparan jangkar (Ohm)

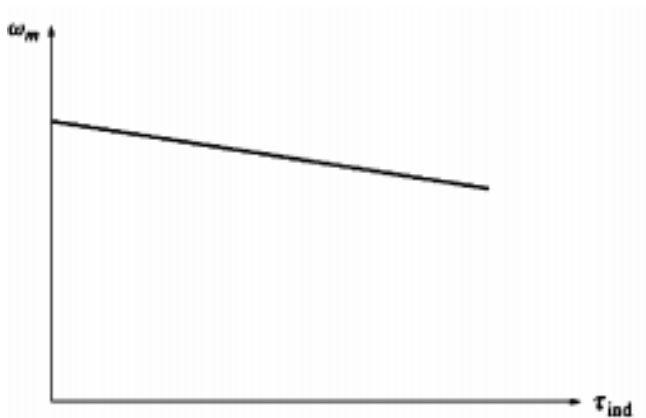
L_a = induktansi kumparan jangkar (H)

ω = kecepatan putar rotor (rad/s)

B = koefisien gesek viskos pada rotor (N.m/rad/s)

J = Momen inersia rotor ($Kg \ m^2$)

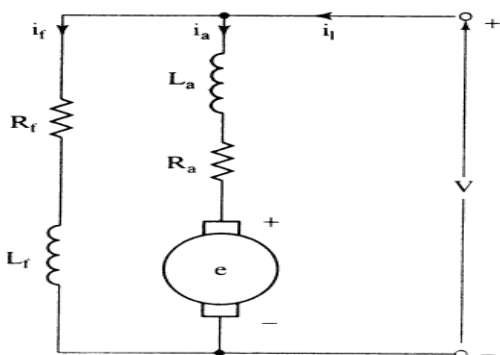
Karakteristik dari motor DC penguat terpisah yaitu semakin besar torsi pada rotor maka semakin turun kecepatan putar rotor. Hal ini dapat digambarkan pada **Error! Reference source not found.**



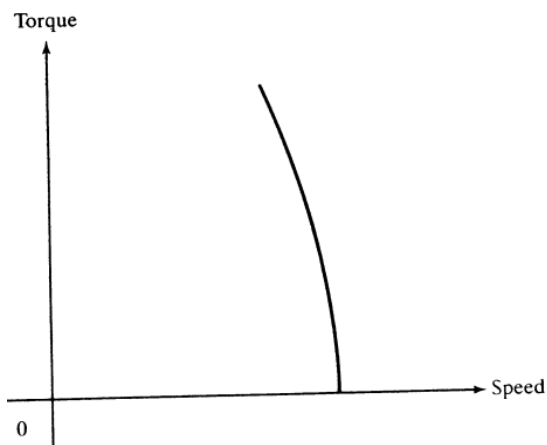
Gambar 2.4 Karakteristik kecepatan-torsi motor DC penguat terpisah

2.1.2.2 *Motor DC Shunt*

Motor DC shunt memiliki rangkaian ekuivalen ditunjukkan pada gambar 2.6. Pada motor DC shunt kumparan medan mendapatkan catu daya yang sama dengan catu daya pada jangkar sehingga besarnya arus pada jangkar akan mempengaruhi besarnya arus pada kumparan medan. Kumparan jangkar dan kumparan medan terhubung secara paralel. Sehingga motor DC shunt cocok untuk operasi dengan masukan tegangan konstan. Karakteristik kecepatan-torsi pada motor DC shunt dengan masukan tegangan konstan ditunjukkan gambar 2.6.



Gambar 2.5 Rangkaian ekuivalen motor DC shunt

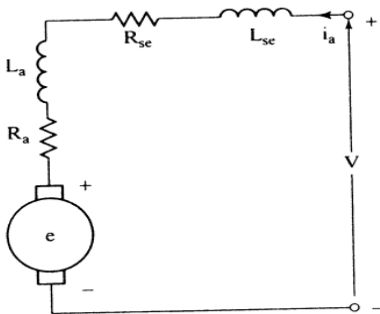


Gambar 2.6 Karakteristik kecepatan-torsi pada motor DC shunt

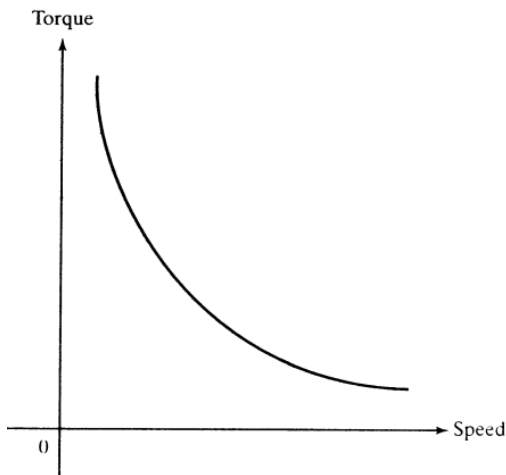
2.1.2.3 Motor DC Seri

Pada motor DC seri, kumparan jangkar dan kumparan medan terhubung secara seri. Rangkaian ekuivalen untuk motor DC seri ditunjukkan oleh **Error! Reference source not found.** sedangkan untuk karakterisik tegangan-torsi motor DC seri ditunjukkan **Error! Reference**

source not found.. Pada **Error! Reference source not found.** dapat kita lihat bahwa torsi-mula pada motor DC seri besar sehingga motor ini cocok untuk operasi yang memerlukan torsi mula yang besar. Metode yang cocok untuk mengatur kecepatan motor jenis ini yaitu dengan mengatur masukan tegangan pada motor.



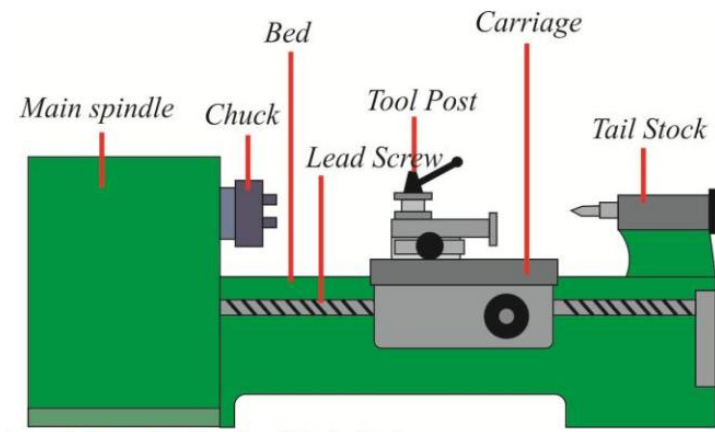
Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen motor DC seri



Gambar 2.8 Karakteristik kecepatan-torsi motor DC shunt

2.2 Mesin Bubut

Mesin bubut merupakan suatu jenis mesin perkakas yang proses kerjanya yaitu memutar benda kerja dan menggunakan mata potong pahat sebagai alat penyayat benda kerja tersebut [2]. Bagian mesin bubut yang berguna untuk memutar benda kerja adalah *spindle* yang dikopel dengan sebuah motor listrik. Gambar 2.9 menunjukkan gambar mesin bubut disertai dengan bagian-bagiannya. Berikut ini merupakan bagian-bagian pada mesin bubut:



Gambar 2.9 Bagian-bagian mesin bubut

- a. *Main Spindle*: bagian mesin bubut yang berfungsi sebagai tempat bagi Spindle.
- b. *Chuck* : bagian yang berfungsi untuk mencekam benda kerja.
- c. *Bed* : berfungsi untuk menahan kedudukan dan sebagai media gerak *carriage*. Bed terbuat dari dua pilah plat baja.
- d. *Lead Screw* : merupakan batang baja dengan uliran sehingga dapat digunakan sebagai penggerak carriage pada saat proses pemotongan
- e. *Tailstock* : *Tailstock* berfungsi sebagai penyangga benda kerja pada saat proses pemotongan sehingga posisi benda kerja lebih kokoh [2].

Terdapat dua proses dalam melakukan pemotongan benda kerja yaitu pemotongan kasar dan *finishing*. Pada proses pemotongan kasar dilakukan pemotongan benda kerja sedikit demi sedikit sedemikian hingga mendekati bentuk dan ukuran benda kerja yang diinginkan. Kemudian dilakukan *finishing* yaitu memperhalus benda kerja setelah melewati pemotongan kasar [6]. Pada proses pemotongan, terdapat parameter yang perlu diperhatikan yaitu kecepatan potong yang didefinisikan oleh persamaan 2.15

$$C_s = \frac{\pi dn}{1000} \quad (2.15)$$

dimana

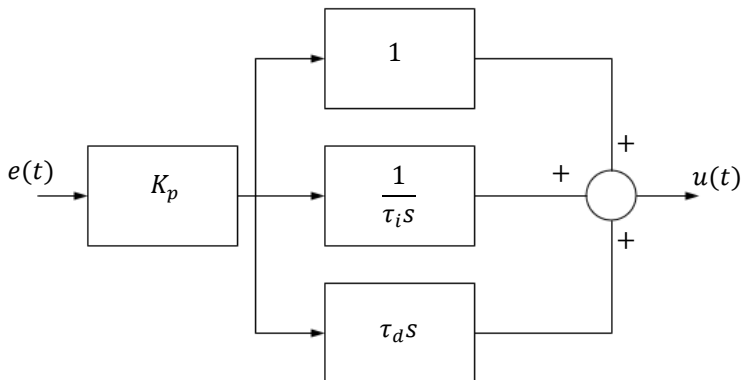
C_s = kecepatan potong

d = diameter benda kerja (mm)

n = kecepatan putar *spindle* (rpm)

2.3 Kontroler PID

Kontroler PID merupakan salah satu kontroler yang banyak digunakan di industri. Kontroler PID memiliki struktur yang sederhana sehingga kontroler ini mudah untuk diimplementasikan. **Error! Reference source not found.** menunjukkan struktur kontroler PID. Pada kontroler PID, sinyal kesalahan digunakan untuk membangkitkan sinyal kontrol yaitu kombinasi dari aksi kontrol proporsional, aksi kontrol integral, dan aksi kontrol derivative.



Gambar 2.10 Struktur kontroler PID

2.3.1 Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional memberikan aksi kontrol yang proporsional terhadap sinyal kesalahan. Persamaan xx menunjukkan persamaan sinyal kontrol yang dihasilkan oleh sinyal kesalahan. Kontroler proporsional berfungsi untuk mempercepat respon sistem, semakin besar gain proporsional maka semakin cepat respon sistem, namun hingga pada nilai gain tertentu dapat menyebabkan respon sistem berosilasi.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.16)$$

2.3.2 Kontroler Integral

Kontroler integral memberikan aksi kontrol yang proporsional terhadap integral sinyal kesalahan. Kontroler integral menghilangkan error steady-state namun mengakibatkan respon sistem lebih lambat. Hubungan antara aksi kontrol integral dengan sinyal kesalahan ditunjukkan oleh persamaan (2.17)

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (2.17)$$

2.3.3 Kontroler Differensial

Kontroler differensial memberikan aksi kontrol yang proporsional dengan differensial dari sinyal kesalahan. Hubungan antara aksi kontrol differensial dan sinyal kesalahan ditunjukkan oleh persamaan (2.18)

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.18)$$

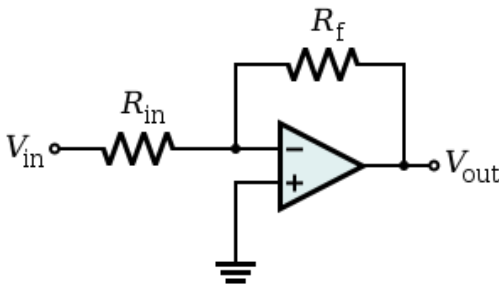
2.4 Operational Amplifiers

Operational Amplifier atau sering disebut sebagai *op-amp* merupakan sebuah rangkaian penguat yang banyak digunakan sebagai penguat sinyal audio, filter aktif, comparator, buffer, dan aplikasi elektronika analog lainnya. Op amp dapat berupa rangkaian yang terdiri dari beberapa komponen atau dapat juga berupa sebuah IC (Integrated Circuit), namun dalam aplikasinya sering dijumpai op amp berupa IC. Op amp memiliki dua buah input yaitu *inverting input* dan *non-inverting input*, selain itu *Op-amp* juga memiliki koneksi untuk catu daya dan

seringkali memiliki sebuah keluaran. Gambar 2.11 menunjukkan simbol skematik untuk Op-amp. Seringkali desain rangkaian Op-amp memiliki umpan balik. Untuk keperluan amplifier, digunakan Op-amp dengan umpan balik pada *Inverting input* atau sering disebut *Negative feedback*. Sedangkan untuk keperluan comparator, digunakan Op-amp dengan umpan balik pada *Non-inverting input* atau sering juga disebut *Positive feedback*. Berikut ini akan dibahas Op-amp dengan *Negative feedback* beserta beberapa aplikasinya.

2.4.1 Op-amp dengan konfigurasi Inverting

Pada konfigurasi ini, *inverting input* merupakan saluran untuk sinyal masukan sedangkan *non-inverting input* terhubung dengan *ground*. **Error! Reference source not found.** menunjukkan rangkaian skematik untuk konfigurasi *Inverting*.



Gambar 2.11 Konfigurasi inverting pada Op-amp

Untuk mendapatkan hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran, perlu kita pendekatan Op-amp ideal yaitu :

- Ketika *negative feedback* digunakan pada Op-amp yang ideal, maka selisih tegangan antara *inverting* dan *non-inverting* input adalah nol.
- Tidak ada arus yang mengalir pada kedua terminal masukan.

Berdasarkan asumsi Op-amp ideal kita dapatkan dua informasi yaitu tegangan pada *inverting input* adalah nol dan arus yang mengalir melalui R_{in} dan R_f adalah sama, sehingga kita dapatkan persamaan 2.19 sebagai berikut

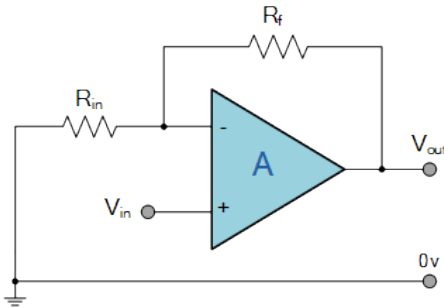
$$\frac{V_{in}-0}{R_{in}} = \frac{0-V_{out}}{R_f} \quad (2.19)$$

Dengan demikian hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran untuk konfigurasi ini adalah

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} V_{in} \quad (2.20)$$

2.4.2 Op-amp dengan konfigurasi *Non-inverting*

Pada konfigurasi ini, *Non-inverting input* merupakan saluran untuk sinyal masukan sedangkan *inverting input* terhubung ke ground melalui R_{in} . Gambar 2.12 menunjukkan rangkaian skematik untuk konfigurasi ini. Hubungan antara tegangan masukan dan tegangan keluaran kita dapatkan sebagai berikut.



Gambar 2 12 Konfigurasi non-inverting pada Op-amp

Untuk Op-amp ideal, tegangan pada *non-inverting* dan *inverting input* adalah sama sehingga tegangan pada *inverting input* sebesar V_{in} . Selain itu, besarnya arus yang mengalir pada R_{in} dan R_f juga sama karena tidak ada arus yang mengalir pada *inverting* dan *non-inverting input*. Berdasarkan informasi tersebut kita dapatkan persamaan sebagai berikut

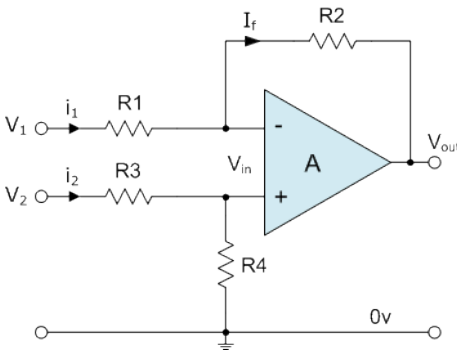
$$\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = \frac{(V_{out} - V_{in})}{R_f}$$

Sehingga kita dapatkan

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_{in}}\right) V_{in}$$

2.4.3 Op-amp sebagai *subtractor*

Rangkaian Op-amp yang digunakan sebagai subtractor merupakan pengembangan dari dua konfigurasi dasar diatas. Rangkaian subtractor ini dapat digunakan sebagai error detector pada suatu system pengaturan. Gambar 2.13 menunjukkan rangkaian skematik dari subtractor.



Gambar 2.13. Rangkaian skematik subtractor

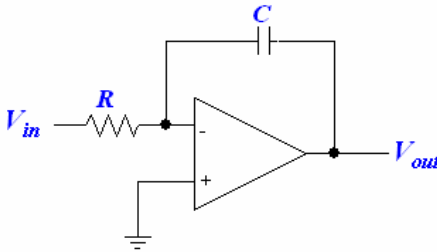
Dengan menggunakan asumsi op-amp ideal, maka kita dapatkan besarnya tegangan keluaran yang ditunjukkan oleh persamaan (2.21)

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (2.21)$$

Dengan $R_2 = R_4$ dan $R_1 = R_3$

2.4.4 Op-amp sebagai integrator dan differensiator

Pada rangkaian integrator, tegangan keluaran rangkaian sebanding dengan integral dari tegangan masukan. Rangkaian integrator dapat diaplikasikan untuk implementasi kontroler PID analog. Gambar 2.14 menunjukkan rangkaian skematik untuk rangkaian integrator.



Gambar 2.13 Op-amp sebagai differensiator

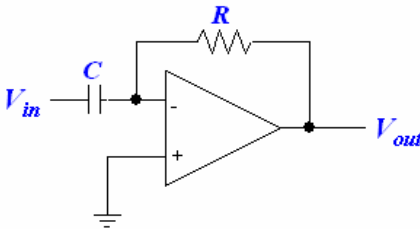
Dengan asumsi Op-amp ideal maka kita dapatkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{V_{in}-0}{R} = C \frac{d(0-V_{out})}{dt}$$

Sehingga

$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_{in} dt$$

Selain itu, Op-amp juga digunakan sebagai differensiator. Gambar 2.15 menunjukkan rangkaian skematik dari differensiator



Gambar 2.14 Rangkaian skematik differensiator

Dengan asumsi op-amp ideal, maka kita dapatkan persamaan 2.2.2 sebagai berikut

$$C \frac{d(V_{in}-0)}{dt} = \frac{0-V_{out}}{R} \quad (2.22)$$

Sehingga kita dapatkan

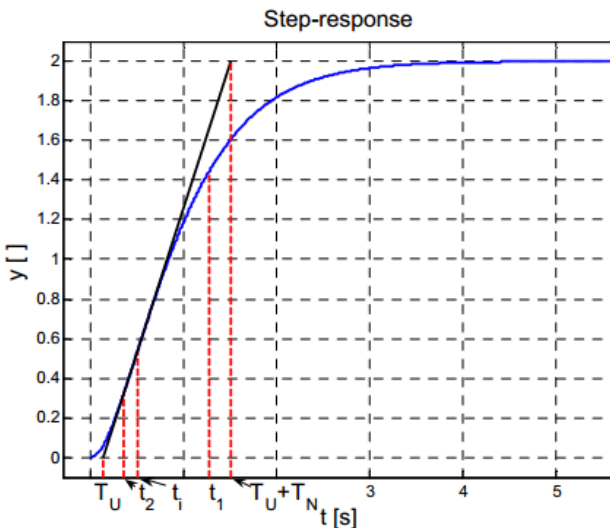
$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \frac{dV_{in}}{dt} \quad (2.23)$$

2.5 Metode identifikasi sistem

Pada tugas akhir ini metode identifikasi sistem yang digunakan yaitu metode metode strejc. Pada metode strejc, fungsi alih pendekatan untuk suatu *step response* sistem adalah

$$G_{st}(s) = \frac{K}{(\tau_{st}s+1)^n} \quad (2.24)$$

Metode ini menggunakan bantuan garis singgung pada titik belok *step-response* sistem seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.15 Step-response sistem untuk menentukan t_i , T_U dan T_N

Dimana T_U merupakan titik pada sumbu waktu ketika garis singgung memotong garis $y = 0$ sedangkan $T_N + T_U$ merupakan titik pada sumbu waktu ketika garis singgung memotong garis steady-state. Kemudian nilai τ_{st} dan n ditentukan dengan langkah berikut :

- Tentukan perbandingan T_U dan T_N

$$\tau = \frac{T_U}{T_N}.$$
- Berdasarkan nilai τ pilih nilai τ_a yang terdekat pada tabel 2.2 untuk dapat menentukan nilai τ_{st} dan n .

Tabel 2.1 penentuan n dan y_i

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ_a	0,104	0,218	0,319	0,41	0,493	0,57	0,642	0,709	0,773
y_i	0,264	0,327	0,359	0,371	0,384	0,394	0,401	0,407	0,413

- Berdasarkan nilai τ_a tentukan nilai y_i yang sesuai kemudian tentukan nilai t_i pada *step-response*.
- Tentukan nilai τ_{st} dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\tau_{st} = \frac{t_i}{n-1} \quad (2.25)$$

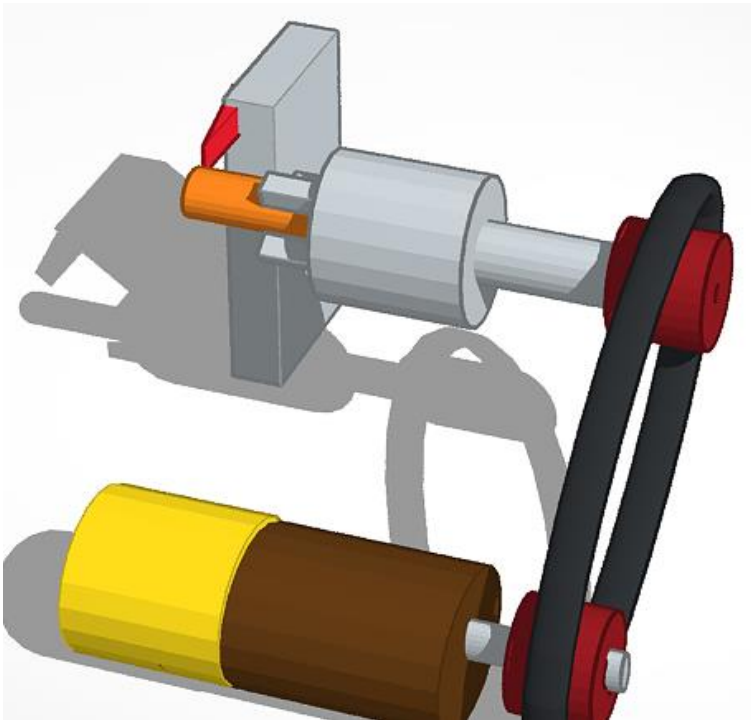
[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

3.1 Perumusan Sistem *Spindle* Mesin Bubut

Pada penelitian ini, plant yang digunakan yaitu mesin bubut dengan focus pada bagian *Spindle* mesin bubut. *Spindle* merupakan bagian mesin bubut yang berguna untuk memutar benda kerja. Gambar 3.1 menunjukkan sistem *Spindle* pada mesin bubut.



Gambar 3 1 Sistem spindle mesin bubut

Sistem *spindle* pada mesin bubut terdiri dari beberapa komponen, diantaranya yaitu Motor DC penguat terpisah sebagai penggerak utama

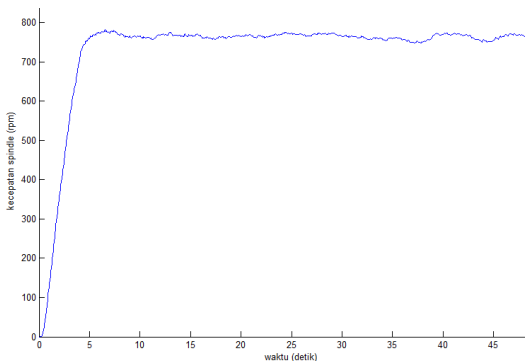
pada *spindle* , pulley sebagai penghubung antara poros Motor DC dan poros *Spindle*, *Chuck* berfungsi untuk mencekam benda kerja. Pada system spindle ini, motor DC yang digunakan adalah motor DC penguat terpisah dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Tipe : Motor DC Ametek,
- Kode : 115079 – 161508,
- Tegangan terminal : 38 V,
- Daya Maksimal : 0,48 HP,
- Kecepatan maksimal : 800 rpm.

sedangkan untuk pulley, kedua pulley yaitu pulley pada poros motor DC dan pulley pada poros spindle memiliki diameter 1 cm.

3.2 Identifikasi Sistem *Spindle*

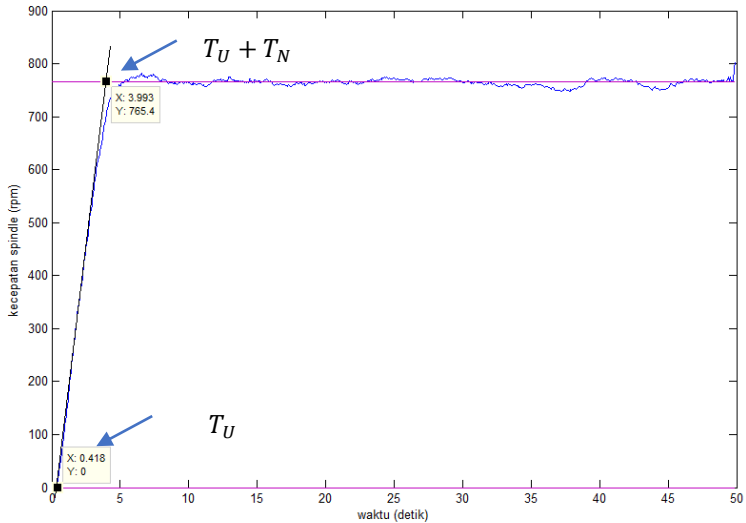
Proses identifikasi dilakukan dengan mendapatkan respon kecepatan spindle ketika diberi masukan sinyal *step* kemudian dilakukan analisa terhadap respon tersebut. Sinyal *step* yang digunakan adalah tegangan terminal pada motor sebesar 23 V. Metode yang digunakan untuk memperoleh fungsi alih dari sistem spindle adalah metode Strejc. Gambar 3.2 menunjukkan *step-response* pada *spindle* mesin bubut.



Gambar 3.2 *step-response* pada spindle mesin bubut

Setelah didapatkan *step-response* kecepatan *spindle* kemudian dilakukan identifikasi dengan langkah sebagai berikut :

- 1) Buat garis yang menyinggung titik belok pada *step-response* seperti pada gambar 3.3



Gambar 3.3 *step-response* kecepatan *spindle* disertai garis singgung titik belok

- 2) Tentukan T_U dan T_N
Gambar 3.3 menunjukkan bahwa $T_U = 0,418$ sehingga $T_N = 3,845$

- 3) Tentukan nilai τ
$$\tau = \frac{T_U}{T_N} = \frac{0.418}{3.845} = 0,108 \quad (3.1)$$

- 4) Berdasarkan τ tentukan nilai n dan y_i terdekat dengan menggunakan tabel 2.1.
Nilai τ_a terdekat dengan τ adalah 0,104 sehingga $n = 2$ dan $y_i = 0,264$

- 5) Berdasarkan y_i tentukan nilai t_i yaitu waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai $y_i \times y_{ss}$

$y_i \times y_{ss} = 0,264 \times 765,4 \approx 202,06$ sehingga dengan menggunakan data *step-response* didapatkan $t_i = 1,323$

6) Tentukan τ_{st}

$$\tau_{st} = \frac{t_i}{n-1} = \frac{1.323}{2-1} = 1,323 \quad (3.2)$$

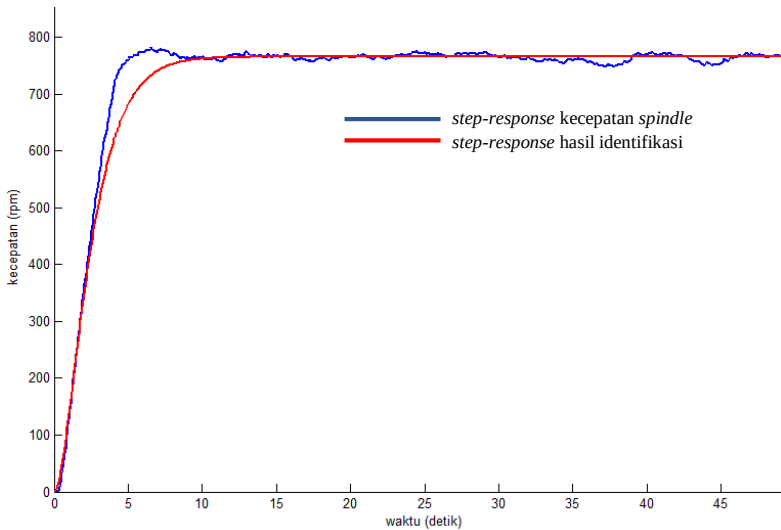
7) Tentukan K

$$K = \frac{y_{ss}}{x_{ss}} = \frac{765.4}{23} = 33,278 \quad (3.3)$$

dengan demikian fungsi alih untuk *spindle* mesin bubut pada tugas akhir ini adalah

$$G_s(s) = \frac{33,278}{(1,323s+1)^2} \quad (3.4)$$

Gambar 3.4 menunjukkan perbandingan data *step-response* kecepatan *spindle* dengan *step-response* hasil identifikasi



Gambar 3.4 Perbandingan step-response data asli dan step-response hasil identifikasi

3.3 Perancangan Sistem Pengaturan

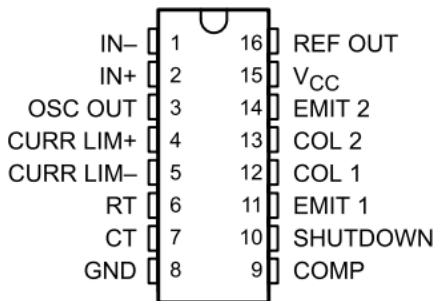
Setelah pada langkah sebelumnya diketahui sistem kerja dan fungsi alih sistem maka langkah selanjutnya yaitu merancang sistem pengaturan

yang meliputi perancangan sensor, perancangan sistem pembangkit sinyal PWM, driver dan perancangan kontroler PID.

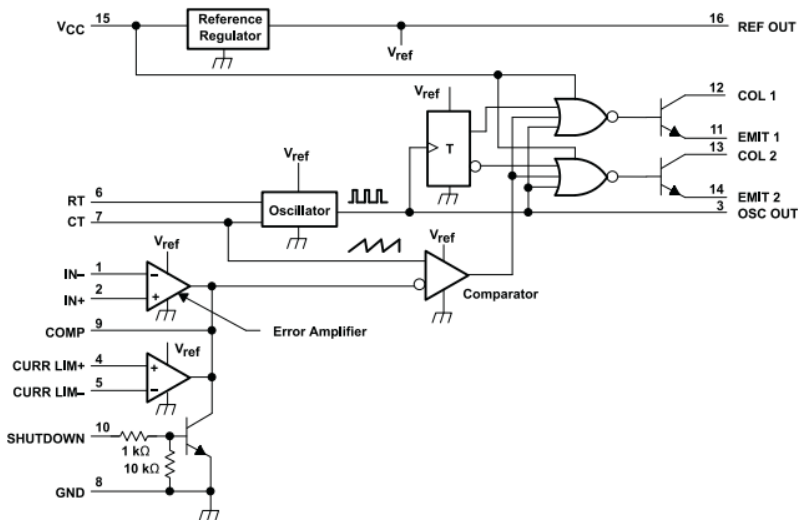
3.3.1 Perancangan Pembangkit PWM Dan Driver

Pada sistem pengaturan yang dirancang pada penelitian ini diperlukan driver karena tegangan sinyal kontrol dari kontroler PID nilainya terlalu kecil untuk dapat digunakan sebagai masukan tegangan Motor DC. Driver yang dirancang ini memerlukan sinyal PWM sebagai masukannya. Perancangan *Driver* menggunakan beberapa transistor diantaranya BD 137, BD138 , TIP 3055 dan TIP 2955. Transistor-transistor ini kemudian dirangkai dengan konfigurasi *H-bridge*.

SG3524N merupakan *fixed-frequency PWM (Pulse-Width-Modulation)* yang sering digunakan untuk rangkaian *Voltage Regulator*. Besarnya frekuensi dapat ditentukan dengan menentukan nilai dari RT dan CT. Gambar 3.2 menunjukkan pin-pin pada IC SG3524N sedangkan gambar 3.3 menunjukkan rangkaian dalam dari ICSG3524N.



Gambar 3.5 Pin-pin pada IC SG3524N



Gambar 3 6 Rangkaian dalam IC SG3524N

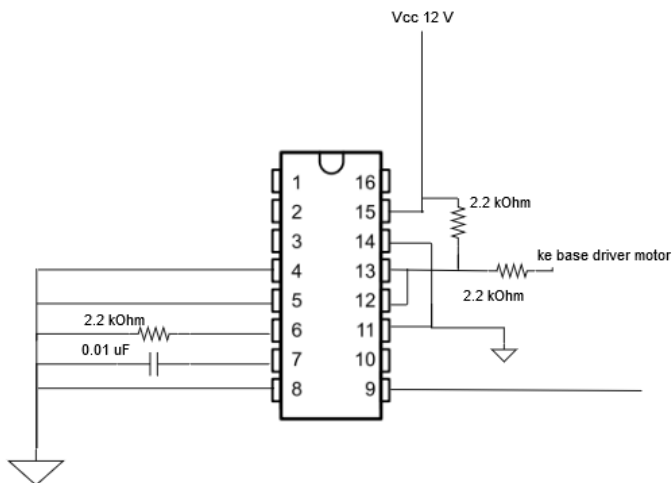
Besarnya duty cycle dari keluaran PWM ditentukan dari sinyal masukan COMP. Sinyal COMP ini kemudian dibandingkan dengan sinyal gergaji di comparator yang kemudian diteruskan ke dua buah gate NOR secara paralel. Perlu diperhatikan bahwa Duty Cycle total terbagi dua pada dua gerbang NOR. Sehingga untuk mendapatkan total *duty cycle* yang dibutuhkan maka kedua *output* dihubungkan ke beban secara paralel. Table 3.1 menunjukkan Deskripsi dari masing-masing pin out pada IC SG3524N

Tabel 3.1 Deskripsi tiap pin out SG3524N

No.	Pin	I/O	Deskripsi
1.	IN-	I	Inverting input error amplifier
2.	IN+	I	Non-inverting error amplifier
3.	Osc out	O	Keluaran dari osilator
4.	Curr lim+	I	Non-inverting input pembatas arus
5.	Curr lim-	I	Inverting input pembatas arus

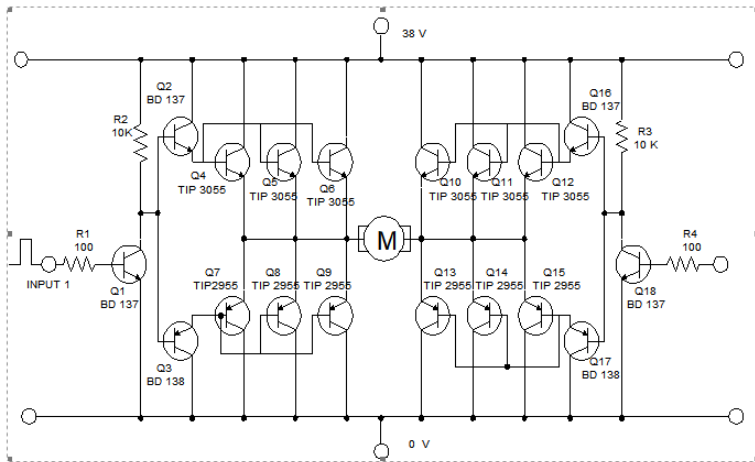
6.	RT	-	Terminal untuk resistor yang berguna sebagai pengatur frekuensi osilator
7.	CT	-	Terminal untuk kapasitor yang berfungsi sebagai pengatur frekuensi osilator
8.	GND	-	Ground
9.	Comp	I	Pin untuk kompensasi error amplifier
10.	Shutdown	I	Pin untuk mematikan kerja IC
11.	Emit 1	O	Emitter dari BJT 1
12.	Col 1	O	Collector dari BJT 1
13.	Col 2	O	Collector dari BJT 2
14.	Emit 2	O	Emitter dari BJT 2
15.	Vcc	-	Catu daya
16.	Ref Out	O	Pin dengan keluaran tegangan 5V

Berikut ini merupakan rangkaian PWM generator yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.7 Rangkaian Pembangkit sinyal PWM

Pada rangkaian driver terdapat dua buah terminal masukan di base transistor BD137. Namun pada penelitian ini hanya salah satu masukan yang digunakan karena pada penelitian ini kami membatasi pengaturan kecepatan *Spindle* untuk satu arah saja. Sinyal masukan pada *driver* berupa sinyal PWM. Gambar 3.8 menunjukkan rangkaian *Driver* yang digunakan pada penelitian ini. Pasangan transistor daya TIP 3055 dan 2955 diparalel dengan pasangan transistor daya yang lain supaya rangkaian driver dapat mensuplai arus lebih besar untuk motor.



Gambar 3.8 Rangkaian driver

Prinsip kerja dari driver ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

- Ketika sinyal PWM masukan bernilai 1 maka transistor Q1 aktif mengakibatkan arus tidak mengalir ke Q2 dan Q3 sehingga transistor daya Q4, Q5, dan Q6 tidak aktif. Namun pada penelitian ini terminal masukan pada Q18 tidak digunakan sehingga transistor daya Q10, Q11, dan Q12 selalu aktif. Pada keadaan ini motor akan berputar.
- Ketika sinyal PWM masukan bernilai 0 maka transistor Q1 tidak aktif sehingga transistor daya Q4, Q5, dan Q6 aktif. Hal ini mengakibatkan tegangan pada kedua terminal keluaran driver sebesar 38 V terhadap

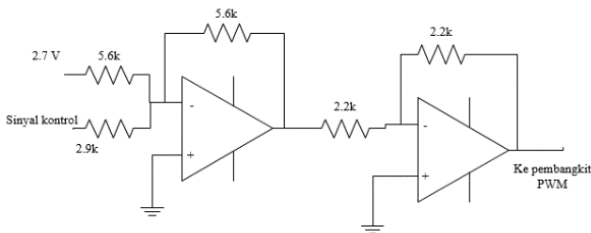
ground sehingga tegangan diantara keduanya bernilai 0 V. Pada keadaan ini motor tidak berputar.

Untuk mengetahui besarnya penguatan tegangan pada Driver maka dilakukan pengujian. Pengujian ini dilakukan dengan cara memberikan tegangan masukan yang bervariasi kemudian dilakukan pengukuran tegangan pada sisi masukan dan sisi keluaran. Berdasarkan data yang didapatkan, dapat dilihat pada gambar 3.9 bahwa keluaran tegangan linear terhadap masukan tegangan pada kisaran masukan tegangan 2.7 volt hingga 5.6 volt. Sehingga diperlukan rangkaian pengkondisian sinyal supaya keluaran tegangan dapat linear terhadap masukan tegangan kisaran tegangan yang diinginkan yaitu 0 V hingga 5.6 volt. Dengan demikian rangkaian pengkondisian sinyal yang diperlukan harus memenuhi persamaan 3.6 sebagai berikut

$$v_{in} = \frac{2,9}{5,6} u + 2,9 . \quad (3.6)$$

Dimana v_{in} adalah tegangan masukan ke pembangkit sinyal PWM dan u adalah tegangan sinyal kontrol. Gambar 3.9 menunjukkan rangkaian pengkondisian sinyal yang memenuhi persamaan 3.6. Sehingga gain untuk gabungan pembangkit sinyal PWM dan Driver adalah

$$K_{driver} = \frac{2,9}{5,6} \times 10,5514 = 5,464 \quad (3.7)$$



Gambar 3 9 Rangkaian pengkondisian sinyal untuk pembangkit sinyal PWM

3.3.2 Perancangan Sensor Kecepatan

Pada penelitian ini digunakan tachogenerator sebagai sensor kecepatannya. Tachogenerator berfungsi untuk mengubah sinyal kecepatan menjadi sinyal tegangan. Besarnya keluaran tegangan pada tachogenerator sebanding dengan kecepatan putar tachogenerator. Persamaan 3.5 menunjukkan hubungan keluaran tegangan tachogenerator dan kecepatan putarnya.

$$V_{tacho} = K_{tacho} \omega \quad (3.7)$$

Untuk mengetahui nilai K_{tacho} maka dilakukan kalibrasi, berdasarkan proses kalibrasi ini didapatkan nilai K_{tacho} sebesar 0.0049 V/rpm atau 0.0468 V/rad/s. Proses kalibrasi akan disampaikan pada bab 4.

3.3.3 Perancangan Error Detector

Sebelum melakukan perancangan kontroler PID, dilakukan perancangan rangkaian elektronik untuk *error detector* yaitu rangkaian yang memiliki keluaran selisih antara setpoint dan sinyal umpan balik. Gambar 3.xx menunjukkan rangkaian elektronik untuk *error detector*. Keluaran tegangan untuk rangkaian ini dinyatakan oleh persamaan berikut.

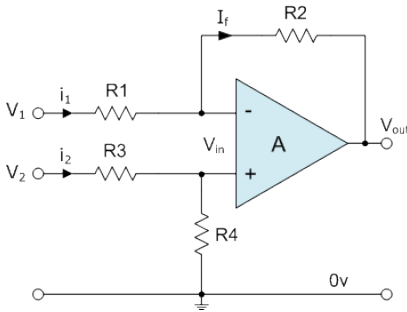
$$v_{out} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) (v_1 - v_2) \quad (3.8)$$

dengan

$$R_1 = R_3 \text{ dan } R_4 = R_2$$

Bila ditentukan $R_2 = R_1$ maka persamaan (3.6) menjadi

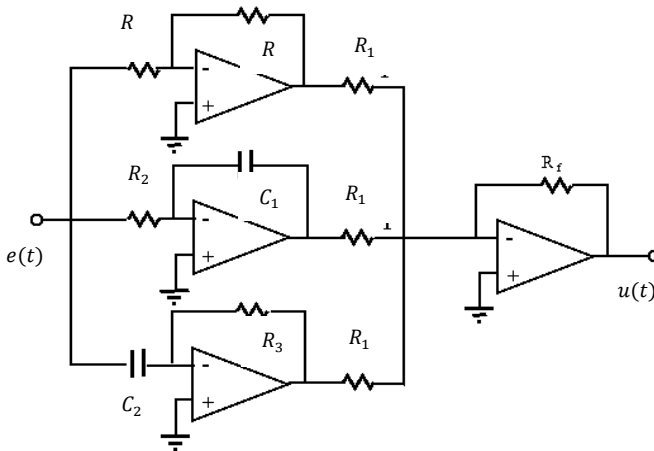
$$V_{out} = V_1 - V_2 \quad (3.9)$$



Gambar 3.10 Rangkaian *error detector*

3.3.4 Perancangan Kontroler PID

Kontroler PID yang digunakan pada penelitian ini merupakan kontroler PID analog yang diimplementasikan dengan menggunakan rangkaian elektronik *Op-Amp*. Gambar 3.xx menunjukkan rangkaian elektronik untuk kontroler PID. Nilai-nilai komponen pasif pada rangkaian ini dapat ditentukan berdasarkan parameter kontroler PID.



Gambar 3.11 Rangkaian elektronik kontroler PID

Fungsi alih untuk rangkaian pada gambar 3.11 ditunjukkan oleh persamaan (3.10)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_f}{R_1} \left(1 + \frac{1}{R_2 C_1 s} + R_3 C_2 s \right) \quad (3.10)$$

Fungsi alih untuk kontroler PID dinyatakan dengan

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (3.11)$$

Sehingga kita dapatkan hubungan parameter-parameter pada kontroler PID dengan komponen-komponen pasif pada rangkaian elektronik kontroler PID sebagai berikut.

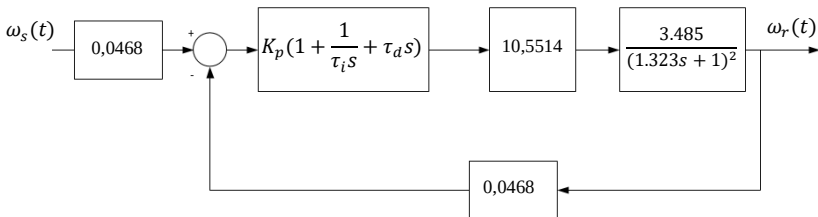
$$K_p = \frac{R_f}{R_1} \quad (3.12)$$

$$\tau_i = R_2 C_1 \quad (3.13)$$

$$\tau_d = R_3 C_2 \quad (3.14)$$

Setelah kita ketahui hubungan parameter-parameter kontroler PID dengan komponen-komponen pada rangkaian elektronik kontroler PID maka langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai pada parameter-parameter PID. Penentuan nilai parameter-parameter PID dilakukan dengan metode analitik. Pada perancangan sistem pengaturan ini, kecepatan *spindle* dinyatakan dalam satuan rad/s sehingga fungsi alih sistem dinyatakan dalam persamaan 3.15

$$G_s(s) = \frac{3.485}{(1.323s+1)^2} \quad (3.15)$$



Gambar 3.12 Blok diagram sistem pengaturan spindle mesin bubut

Fungsi alih untuk sistem pada gambar 3.12 adalah

$$\frac{\Omega_r(s)}{\Omega_s(s)} = \frac{\left(K_{tachometer} K_{driver} K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \frac{3.485}{(1.323s + 1)^2}\right)}{1 + K_{tachometer} K_{driver} K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \frac{3.485}{(1.323s + 1)^2}}$$

bila diinginkan sistem diatas menjadi orde 1 dengan *settling time* 5% sebesar 2 detik maka

$$\tau_i \tau_d = 1,323^2 \text{ dan } \tau_i = 2 \times 1,323$$

Sehingga

$$\tau_d = 0,5 \times 1,323; K_p = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_i}{3.485 K_{tachometer} K_{driver}} \right)$$

Sehingga didapatkan kontroler PID sebagai berikut

$$G_c(s) = 4.635 \left(1 + \frac{1}{2.646s} + 0.6615s \right)$$

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA

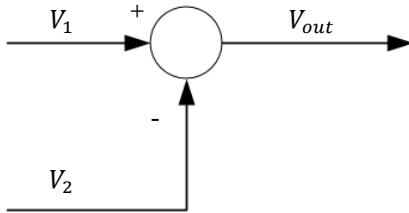
Pengujian dilakukan dengan memberi gangguan pada step respon sistem pengaturan yang telah diimplementasikan. Gangguan yang diberikan berupa kedalaman mata pahat. Sebelum dilakukan pengujian keseluruhan sistem, dilakukan pengujian dan pengukuran pada tiap-tiap komponen seperti *error detector*, driver, dan lain sebagainya.

4.1 Pengujian Komponen

Pada bagian ini dibahas pengujian pada komponen-komponen sistem pengaturan yang telah dirancang. Komponen yang diuji meliputi *error detector*, tachogenerator, dan gabungan pembangkit PWM dan Driver.

4.1.1 Pengujian *Error Detector*

Pengujian pada *error detector* dilakukan dengan memberikan variasi tegangan pada kedua masukan kemudian dilakukan pengukuran pada keluarannya. Gambar 4.1 menunjukkan diagram pengujian pada *error detector*. Hasil pengujian disajikan dalam tabel 4.1.



Gambar 4.1 Diagram pengujian error detector

Tabel 4.1 Hasil pengujian error detector

V_1	V_2	V_{out}
5,45	2,16	3,92

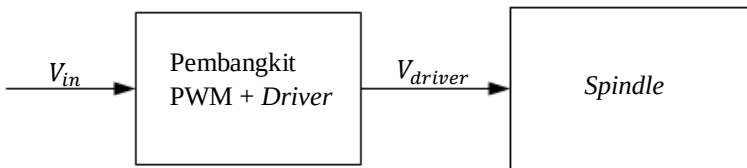
545	2,52	2,93
5,45	2,75	2,71
4,50	2,75	1,76
4,50	2,16	2,35
4,74	2,39	2,35
4,74	2,63	2,11

Dari tabel 4.1 dapat kita lihat bahwa keluaran pada *error detector* sudah sesuai dengan yang seharusnya yaitu

$$V_{out} = V_1 - V_2 \quad (4.1)$$

4.1.2 Pengujian Pembangkit PWM Dan Driver

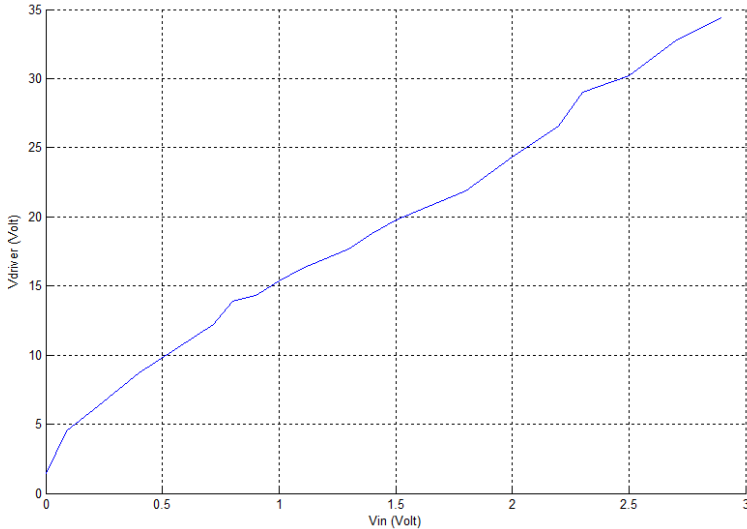
Pada pengujian gabungan pembangkit PWM dan Driver dilakukan pengukuran tegangan keluaran pada *driver* dengan tegangan masukan yang bervariasi. Keluaran driver dihubungkan dengan beban motor DC yang merupakan penggerak *spindle* untuk menghindari adanya kesalahan pengukuran akibat pembebanan pada *driver*. Gambar 4.2 menunjukkan diagram pengujian untuk gabungan pembangkit PWM dan *Driver*.



Gambar 4.2 Diagram pengujian Pembangkit PWM dan Driver

Berdasarkan hasil pengukuran tegangan pada masukan pembangkit PWM dan keluaran *driver* maka didapatkan data pengukuran yang

ditunjukkan pada gambar 4.3. Gambar 4.3 menunjukkan hubungan tegangan masukan pembangkit PWM dan tegangan keluaran *driver*.



Gambar 4.3 Grafik hubungan tegangan masukan Pembangkit PWM dan keluaran Driver

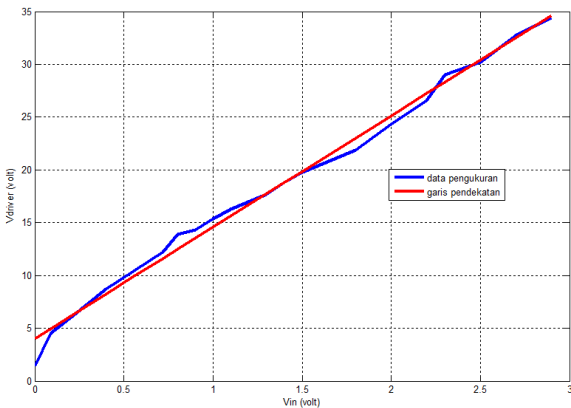
dapat dilihat bahwa grafik hubungan antara tegangan masukan pembangkit PWM dan keluaran *driver* menyerupai garis lurus. Besarnya penguatan pada komponen ini merupakan gradien dari garis lurus diatas. Persamaan garis lurus pada grafik diatas dapat didekati dengan persamaan 4.2

$$V_{out} = K_{driver}V_{in} + V_0 \quad (4.2)$$

Nilai K_{driver} dan V_0 dapat ditentukan berdasarkan data pengukuran. Perhitungan untuk menemukan nilai K_{driver} dan V_0 terlampir. Berdasarkan data pengukuran maka didapatkan

$$K_{driver} = 10,5514 \text{ dan } V_0 = -24,4624$$

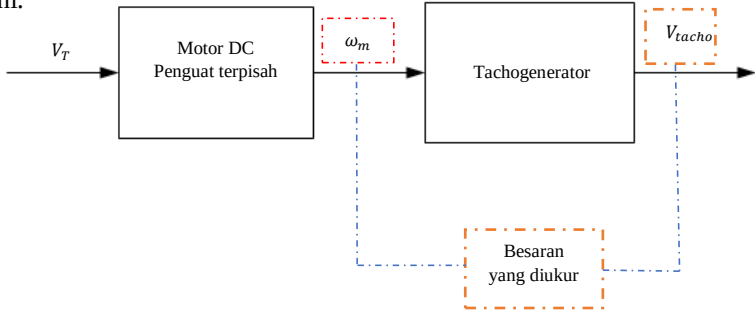
Sehingga besarnya penguatan pada gabungan pembangkit PWM dan *Driver* adalah 10,5514. Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan grafik data pengukuran dan grafik pendekatan.



Gambar 4.4 Perbandingan data pengukuran dan garis pendekatan

4.1.3 Pengujian Tachogenerator

Pada pengujian tachogenerator dilakukan pengukuran tegangan keluaran dan kecepatan putar tachogenerator. Tachogenerator dikopel dengan motor DC pada *spindle* sehingga untuk mengubah kecepatan putar tachogenerator dapat dilakukan dengan mengubah tegangan terminal pada motor DC. Tabel 4.3 menunjukkan hasil pengukuran dari pengujian ini.



Gambar 4.5 Diagram pengujian tachogenerator

Tabel 4.2 Data pengukuran kecepatan putar dan tegangan keluaran tachogenerator

$\omega_m (rpm)$	$V_{tachometer} (Volt)$	$K_{tachometer} = \frac{V_{tachometer}}{\omega_m} \left(\frac{V}{rpm} \right)$
735,6	3,72	0,0050
790,7	3,94	0,0049
819,9	4,12	0,0050
782,1	3,9	0,0049
836,2	4,19	0,0050
813,9	4,13	0,0050
889	4,43	0,0049
945	4,72	0,0049
877,3	4,42	0,0050
838,1	4,31	0,0051
810,6	4,04	0,0049
786,3	3,43	0,0043
$K_{tachometer}$ rata-rata		0,0049

Hubungan tegangan keluaran pada tachogenerator dan kecepatan putarnya dapat dinyatakan oleh persamaan 4.3

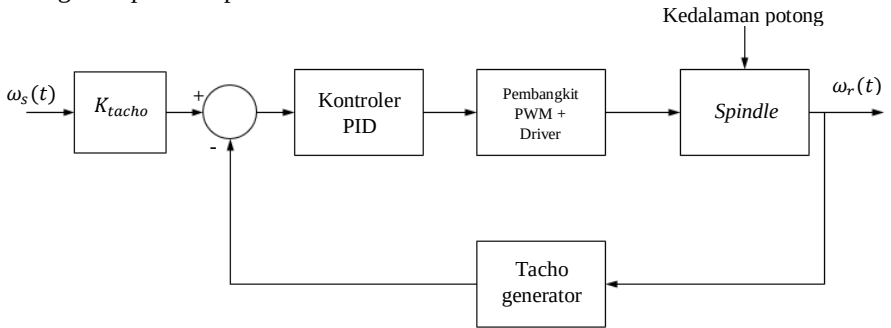
$$V_{tachometer} = K_{tachometer} \omega_m \quad (4.3)$$

Untuk menentukan nilai $K_{tachometer}$ dapat ditentukan dengan menghitung nilai rata-rata $K_{tachometer}$ pada setiap sampel data. Nilai $K_{tachometer}$ yang didapatkan adalah sekitar 0,0049 V/rpm atau 0,0468 V/rad/s.

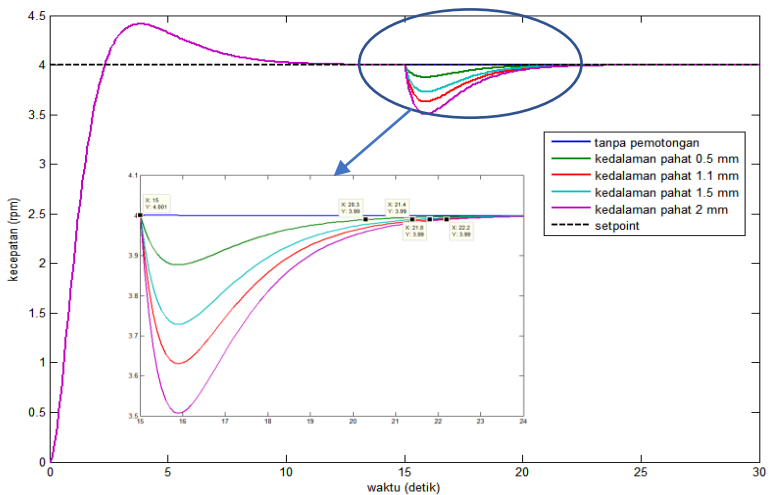
4.2 Pengujian Loop Tertutup

Pada pengujian loop tertutup dilakukan pengujian sistem pengaturan *spindle* dengan masukan sinyal *step*. Pengujian ini dilakukan dalam kondisi tanpa beban dan berbeban dengan beban pada *spindle* yang bervariasi. Beban pada *spindle* berupa kedalaman mata potong pahat pada benda kerja. Kedalaman mata potong pahat pada pengujian ini yaitu 0.5

mm, 1.1 mm, 1.5 mm, dan 2 mm. Diagram pengujian ditunjukkan pada gambar 4.6. Kemudian pada gambar 4.7 ditunjukkan respons sistem dengan *setpoint* 4 rpm.



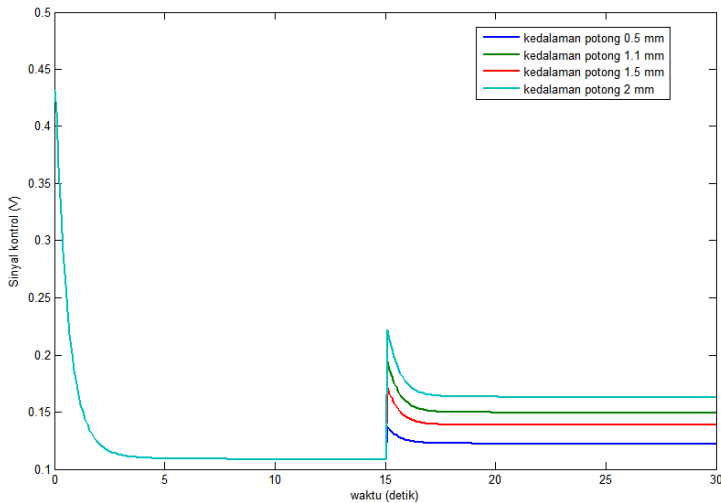
Gambar 4.6 Gambar pengujian sistem loop tertutup



Gambar 4.7 Respons sistem dengan kedalaman potong yang bervariasi

Pada gambar 4.7 dapat kita lihat bahwa pada keadaan tanpa pemotongan, respons sistem memiliki *overshoot* sedangkan pada

perancangan kontroler yang telah dilakukan, respons sistem diharapkan tidak memiliki *overshoot*. Besarnya *overshoot* adalah 11,03%. Hal ini dapat terjadi karena berdasarkan hasil identifikasi sistem, *spindle* pada penelitian ini merupakan sistem orde dua dengan pole kembar yang berarti sistem *spindle* merupakan sistem yang memiliki sifat *critically damped*. Sehingga ketika diberikan kontroler PID pada sistem maka dapat terjadi *overshoot*.



Gambar 4.8 Sinyal kontrol dengan variasi kedalaman potong

Pada gambar 4.7 juga dapat dilihat bahwa ketika terjadi pemotongan akan terjadi penurunan kecepatan *spindle* sesaat. Semakin dalam mata potong pahat maka akan semakin besar penurunan kecepatan *spindle*. Selain itu, semakin dalam mata potong pahat maka akan semakin besar juga *recovery time* sistem. *Recovery time* ketika kedalaman mata potong pahat 0.5 mm, 1.1 mm, 1.5 mm, dan 2 mm secara berturut-turut adalah 5.3 detik, 6.4 detik, 6.8 detik dan 7.2 detik. Hal ini terjadi karena ketika terjadi pemotongan maka akan timbul torsi yang arahnya berlawanan dengan arah putar *spindle*, semakin besar kedalaman pahat maka semakin besar torsi lawan yang dihasilkan, sehingga akan semakin besar penurunan kecepatan *spindle*. Ketika penurunan kecepatan terjadi, maka sinyal kesalahan akan semakin besar yang mengakibatkan sinyal kontrol

dari kontroler juga akan semakin besar sehingga pada akhirnya respon sistem dapat kembali ke *steady-state*. Grafik sinyal kontrol ditampilkan pada gambar 4.8.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Kontroler PID dapat mempertahankan kecepatan *spindle* meskipun terjadi perubahan kedalaman potong.
2. Semakin besar kedalaman potong maka semakin besar penurunan kecepatan sesaat *spindle*.
3. Semakin besar kedalaman potong maka semakin *Recovery time*.
4. *Step response* yang pada sistem pengaturan *spindle* memiliki *overshoot* 11,03%

2.2 Saran

Untuk peneltian selanjutnya, sebaiknya dipilih kontroler yang dapat melakukan adaptasi terhadap perubahan beban.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. S. Kumar, A. Shetty, dan A. Shetty, “effect of spindle and feed rate on surface roughness of Carbon Steels in CNC turning,” dalam *International conference on Modeling, Optimization, and Computing (ICMOC 2012)*, Moodbidri, 2012.
- [2] W. Sumbodo, Teknik Produksi Mesin Industri Jilid 2, Direktorat Sekolah Menengah Kejuruan Departemen Pendidikan Nasional, 2008
- [3] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, New York: Mcgraw-Hill, 2005.
- [4] Pujiono, Rangkaian Elektronika Analog, Yogyakarta : Graha ilmu, 2012.
- [5] K.J. Astrom dan T. Hagglund, PID Controllers : Theor, Design, and Tuning, Instrument society of America, 1995.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengukuran Tegangan Masukan Dan Keluaran Driver

V_{in}	V_{out}	V_{in}	V_{out}
0	1.46	1.3	17.7
0.0880	4.52	1.4	18.8
0.2274	6.37	1.5	19.8
0.4	8.7	1.8	21.9
0.5550	10.4	2.0	24.3
0.7170	12.2	2.2	26.6
0.8	13.9	2.3	29
0.9	14.3	2.5	30.2
1.1	15.4	2.7	32.7
1.2	16.3	2.9	34.4

Lampiran 2. Perhitungan penguatan pada Pembangkit PWM dan Driver

Persamaan garis pendekatannya adalah

$$V_{out} = K_{driver}V_{in} + V_0 \quad (L.1)$$

Dimana K_{driver} dan V_0 merupakan konstanta. Untuk sebanyak n data maka persamaan di atas dapat dibentuk menjadi

$$V_{out}(1) = K_{driver}V_{in}(1) + V_0 \quad (L.2)$$

$$\begin{aligned}
V_{out}(2) &= K_{driver}V_{in}(2) + V_0 \\
V_{out}(3) &= K_{driver}V_{in}(3) + V_0 \\
&\vdots \\
V_{out}(n) &= K_{driver}V_{in}(n) + V_0
\end{aligned}$$

Kemudian bila diubah dalam bentuk vektor dan matriks akan menjadi
 $\vec{v} = A\vec{u}$ (L.3)

Dimana

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} V_{out}(1) \\ V_{out}(2) \\ V_{out}(3) \\ \vdots \\ V_{out}(n) \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} V_{in}(1) & 1 \\ V_{in}(2) & 1 \\ V_{in}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ V_{in}(n) & 1 \end{bmatrix}; \vec{u} = \begin{bmatrix} K_{driver} \\ V_0 \end{bmatrix}$$

Solusi untuk persamaan (3) adalah

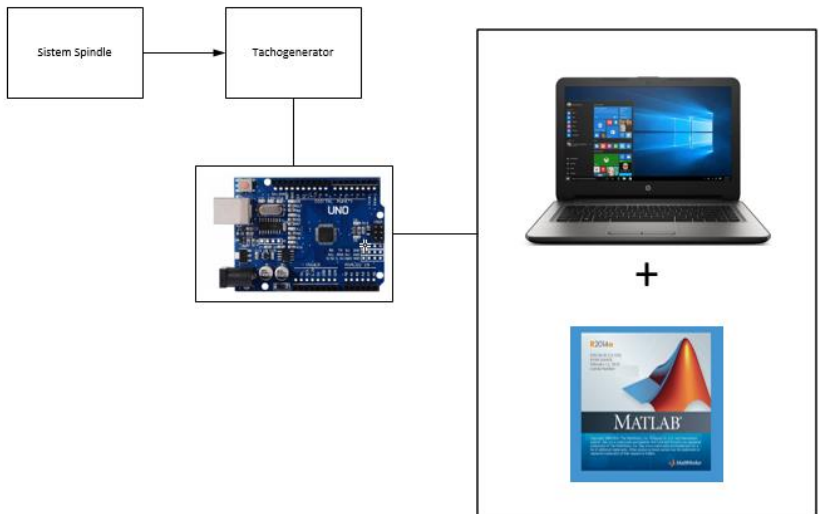
$$\vec{u} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{v} \quad (L.4)$$

Dengan memasukan data pengukuran ke persamaan (L.4) maka didapatkan

$$K_{driver} = 10.5514 \text{ dan } V_0 = -24.4624$$

Lampiran 3. Akuisisi data

Pada tugas akhir ini, untuk mendapatkan data *step-response* sistem, digunakan arduino uno sebagai *hardware*-nya. Tachogenerator dikopel dengan motor DC yang merupakan penggerak *spindle*. Tachogenerator berfungsi untuk mengkonversi sinyal kecepatan dari *spindle* menjadi tegangan. Besarnya tegangan yang terbangkit pada tachogenerator kemudian dibaca oleh arduino uno untuk disimpan di komputer. Diagram untuk akuisisi data ditunjukkan oleh gambar 1.



Gambar L.1 Diagram untuk konfigurasi akuisisi data

Program matlab yang digunakan untuk akuisisi data adalah berikut:

```

clear all
close all
clc;
a=arduino('COM3', 'uno');
tmax=50;
figure(1)
grid on;
title('speed response data acquisition')
xlabel('time(s)'),ylabel('Tachometer Voltage (V)')
axis([0 tmax+1 -0.5 0.5]);
k=0;v=0;t=0;
tic
while toc<=tmax
    k=k+1;
    v(k)=readVoltage(a,0);
end

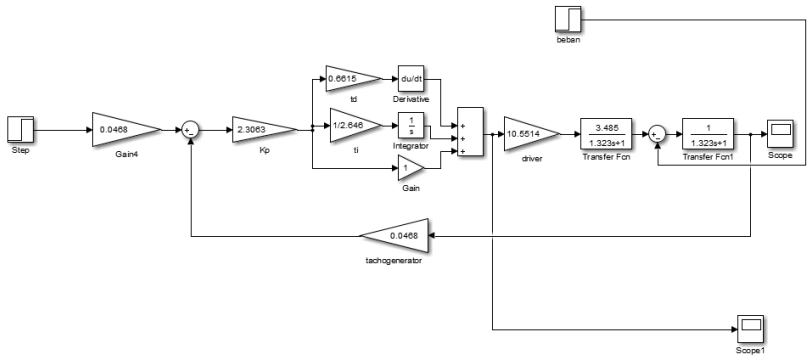
```

```

t(k)=toc;
if k>1
    line([t(k-1) t(k)], [v(k-1) v(k)]);
    drawnow
end
end
v=v';
t=t';

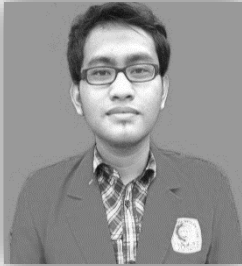
```

Lampiran 4. Simulasi Pada Simulink



Gambar L.2 Simulasi sistem pengaturan *Spindle*

RIWAYAT HIDUP



Hendri Budi Santoso, lahir di Sendangretno pada tanggal 20 Juni 1995. Putra tunggal Rohmatin dan Salipan. Setelah menempuh pendidikan formal di SD N1 Sendangretno, SMP Muhammadiyah 1 Sendangagung dan SMA Muhammadiyah 1 Metro, penulis melanjutkan studi S1 jurusan Teknik di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan mengambil Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan. Pada awal bulan Januari 2018, penulis mengikuti ujian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.