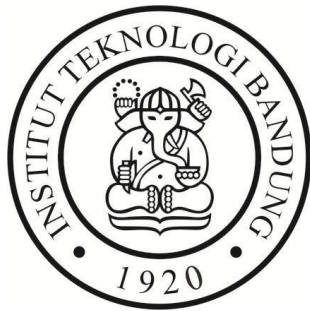


PETUNJUK PRAKTIKUM

PRAKTIKUM

SISTEM KENDALI

EL3215



**Laboratorium Sistem
Kendali dan Komputer**

**Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung**

2024

MODUL PRAKTIKUM SISTEM KENDALI



Disusun Oleh:

Ahmad Musthafa Al Ghifari

Arief Syaichu Rohman

LABORATORIUM SISTEM KENDALI DAN KOMPUTER
SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG

2023/2024

Kata Pengantar

Praktikum sistem kendali merupakan salah satu praktikum yang diselenggarakan oleh Laboratorium Sistem Kendali dan Komputer (LSKK) Insitut Teknologi Bandung. Praktikum ini dimaksudkan untuk memberikan pembelajaran dan pengalaman mengenai aplikasi sistem kendali kepada mahasiswa.

Pada semester pertama tahun ajaran 2023/2024, praktikum sistem kembali dilaksanakan dengan kit motor DC *feedback* untuk modul 1 dan 2. Modul 3 dan 4 menggunakan kit motor DC Quanser.

Mulai sejak praktikum semester 2 tahun ajaran 2021/2022, sudah disusun modul praktikum baru. Namun dengan adanya perubahan perkuliahan menjadi *full-offline*, dilakukan penyesuaian terhadap praktikum sistem kendali, dengan tetap mengambil praktik yang dirasa baik dari praktikum semester sebelumnya. Oleh karena itu, modul 1-3 dikembalikan seperti sebelum pandemi, dan modul 4 dilakukan sistem pengendalian *remote* seperti pada tiga semester lalu.

Penyusun berterima kasih sebesar-besarnya kepada dosen-dosen di lingkungan LSKK, terutama kepada Bapak Arief Syaichu Rohman, Ph.D, yang telah memberikan arahan dan masukan dalam penyusunan modul praktikum ini.

Akhir kata, semoga modul praktikum ini bisa menjadi petunjuk bagi praktikan dalam melaksanakan kegiatan praktikum sistem kendali.

Bandung, Februari 2024

Penyusun

Daftar Isi

1. Kata Pengantar	2
2. Daftar Isi	3
3. Modul 1 Pemodelan	4
4. Modul 2 Sistem Kendali Kecepatan.....	18
5. Modul 3 Sistem Kendali Posisi.....	25
6. Modul 4 Implementasi Sistem Kendali Motor DC Menggunakan LabVIEW.....	34
7. Daftar Pustaka.....	46

Modul 1

PEMODELAN

1.1 Tujuan

Tujuan dari percobaan ini adalah memahami konsep pemodelan untuk sistem pengendalian motor DC. Agar pemahaman dari konsep pemodelan motor bisa tercapai, maka dalam percobaan ini diharapkan mampu untuk:

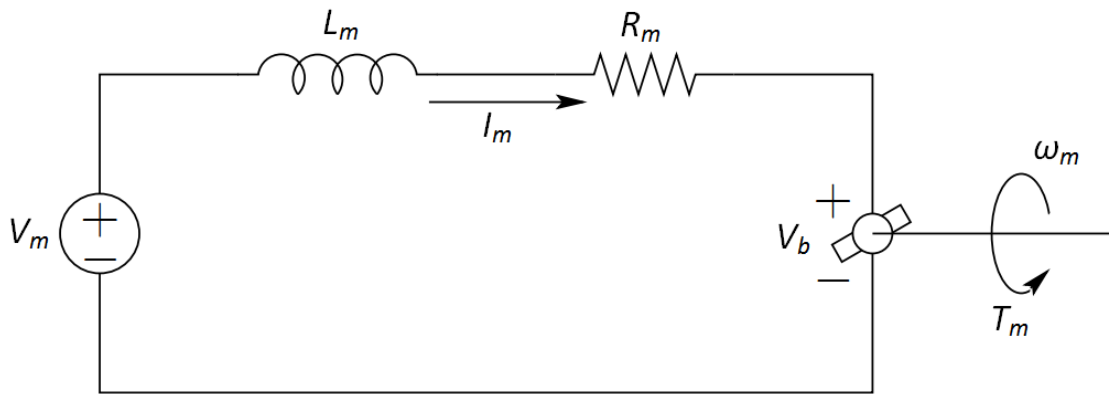
- a. Memahami sistem dan komponen sistem MS-150.
- b. Mengenal kegunaan dan karakteristik alat-alat praktikum MS-150.
- c. Memahami model rangkaian motor DC secara umum.
- d. Mendapatkan parameter-parameter model sistem MS-150.
- e. Mendapatkan fungsi transfer model sistem MS-150.

1.2 Dasar Teori

1.2.1 Motor DC

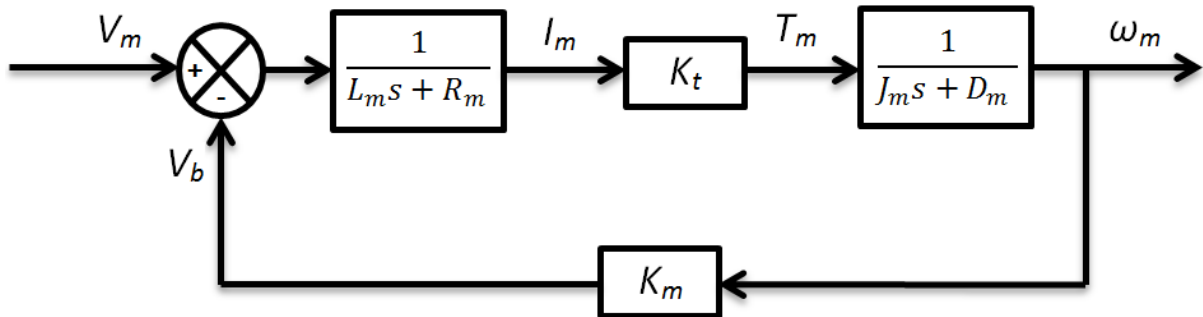
Motor adalah mesin yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi gerakan mekanik rotasional. Motor DC sendiri merupakan salah satu jenis motor yang menggunakan energi listrik arus searah atau *direct current* untuk kemudian diubah menjadi gerakan rotasional. Motor DC terdiri dari stator dan rotor. Stator adalah bagian yang tidak bergerak (statis) dan rotor adalah bagian yang berputar. Dari jenis komutasinya, motor DC dibedakan menjadi dua, yaitu motor DC tanpa sikat (*brushless*) dan motor DC dengan sikat (*brushed*). Motor DC dengan sikat sendiri dibedakan menjadi 5 berdasarkan cara medan magnet dibangkitkan, yaitu konfigurasi seri (*series*), paralel (*shunt*), campuran (*compound*), eksitasi terpisah (*separately excited*) dan magnet tetap. Masing-masing konfigurasi memiliki karakteristik (kelebihan dan kekurangan) yang berbeda-beda. Untuk praktikum sistem kendali ini digunakan motor DC dengan sikat.

Agar motor DC bisa dikendalikan dengan suatu pengendali tertentu, terlebih dahulu perlu diketahui karakteristik-karakteristik apa saja yang dimiliki oleh motor tersebut. Pemodelan merupakan salah satu proses untuk mengetahui model matematika dari suatu sistem yang akan dikendalikan (kendalian). Sebelum merancang pengendali motor, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menurunkan persamaan model dinamika dari motor. Biasanya model tersebut dinyatakan dalam bentuk fungsi transfer (*transfer function*). Gambar berikut adalah model rangkaian motor DC dengan eksitasi terpisah:



Gambar 1.1 Model Rangkaian Motor DC

V_m adalah tegangan masukan ke motor, L_m adalah induktansi motor, R_m adalah resistansi motor, I_m adalah arus yang mengalir pada motor, V_b adalah tegangan gaya gerak listrik balik atau *back electromotive force (back emf)*, T_m adalah torsi yang dihasilkan oleh motor, dan ω_m adalah kecepatan putaran rotor. Asumsikan fluks magnetik yang digunakan adalah tetap, maka hubungan antara T_m dan I_m adalah berbanding lurus dengan faktor pengali K_t , yaitu konstanta momen. Hubungan antara V_b dan ω_m juga berbanding lurus dengan faktor pengali K_m , yang disebut juga sebagai konstanta gaya gerak listrik balik. Pada bagian mekanik, motor memiliki redaman/gesekan yang direpresentasikan oleh D_m dan inersia rotor yang direpresentasikan oleh J_m .



Gambar 1.2 Diagram Blok Sistem Motor DC

Secara umum, dalam domain Laplace, hubungan antara tegangan masukan motor V_m dengan kecepatan putaran rotor ω_m dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K_t}{J_m L_m s^2 + (J_m R_m + D_m L_m) s + R_m D_m + K_m K_t} \quad (1.1)$$

Pada umumnya, L_m cukup kecil bila dibandingkan dengan R_m , sehingga persamaan (1.1) dapat disederhanakan menjadi berikut:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{\frac{K_t}{R_m D_m}}{\frac{J_m}{D_m} s + 1} \quad (1.2)$$

Persamaan (1.2) bisa dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut:

$$\frac{\omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1.3)$$

1.2.1 Modular Servo System MS-150

Modular Servo System MS -150 merupakan suatu sistem modular buatan FEEDBACK yang

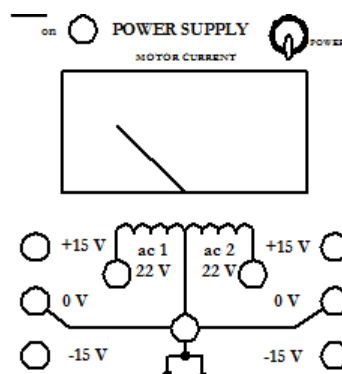
akan digunakan dalam praktikum ini. MS-150 terdiri dari:

- Unit Op-Amp OA-150A
- Unit Attenuator AU-150B
- Unit Pre-Amp PA-150C
- Servo Amplifier SA-150D
- Power Supply PS-150E
- Motor DC dan Tachogenerator MT-150F
- Potensiometer Input IP-150H
- Potensiometer Output OP-150K
- Load Unit (berupa Rem Magnetik (*eddy current brake*) dan Lempeng Inersia)

Deskripsi dari tiap-tiap modul di atas adalah sebagai berikut:

1. Power Supply PS-150E

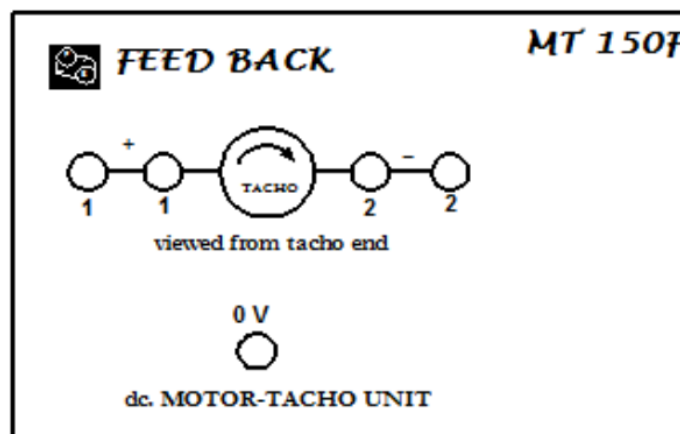
Unit ini menyediakan tegangan dc teregulasi sebesar +15 V dan -15 V serta tegangan ac sebesar 22 V. Unit ini juga memberikan tegangan DC 24 volt 2A tak teregulasi untuk menggerakkan motor, dihubungkan menggunakan konektor 8 jalur ke servo amplifier, karena unit servo amplifier inilah yang mengatur motor.



Gambar 1.3 Power Supply

2. Motor DC dan Tachogenerator MT-150F

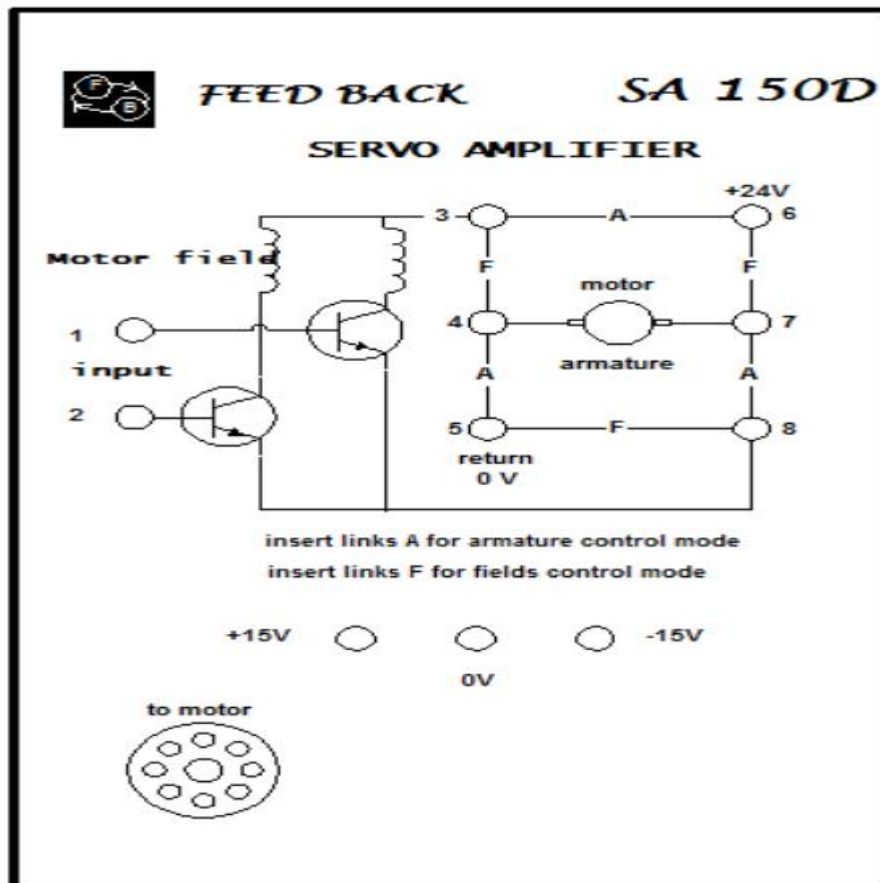
Berupa motor DC dengan kumparan medan terpisah, memiliki perpanjangan sumbu putar utama yang dapat dipasangi rem magnetik atau lempengan inersia. Terdapat juga sumbu putar tambahan dengan kecepatan 1:30 kali kecepatan putar sumbu utama. Sumbu tambahan ini biasa digunakan dalam sistem pengaturan posisi. Dalam unit ini terdapat pula sebuah tachogenerator dengan magnet permanen yang menghasilkan tegangan sebanding dengan kecepatan putar sumbu utama. Catu daya diperoleh melalui servo amp menggunakan konektor 8 jalur. Catu ini diatur besarnya oleh tegangan masukan servo amplifier. Besar arus ke kumparan motor dapat dilihat dari ampermeter di Power Supply PS-150E. Untuk menghindari panas yang berlebihan pada kumparan motor, jangan mengoperasikan motor pada batas arus 2 A lebih dari satu menit.



Gambar 1.4 Motor DC dan Tachogenerator MT-150F

3. Servo Amplifier SA-150D

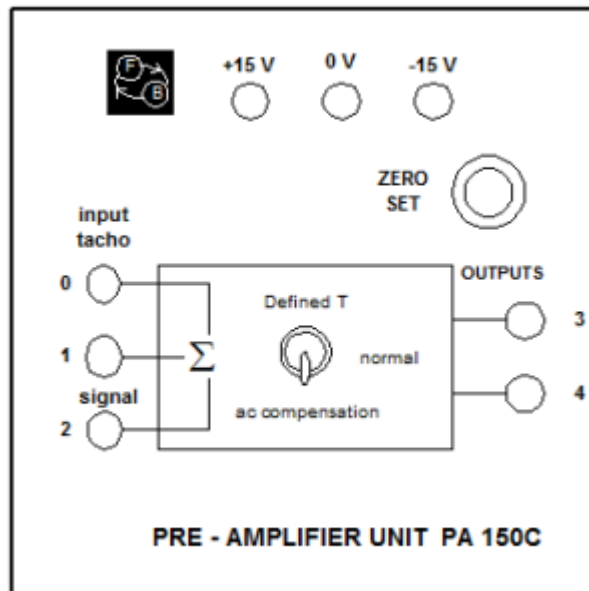
Merupakan alat yang akan mengatur arah dan besar putaran motor, tergantung tegangan masukan servo amplifier (terminal 1 dan 2). Di panel depan terdapat terminal-terminal yang harus dihubungkan sesuai mode pengaturan motor yang diinginkan: pengendali jangkar (*armature-control*) atau pengendali medan (*field-control*). Motor akan berputar jika salah satu terminal masukan servo amplifier diberi tegangan positif. Jika terminal yang lain diberi tegangan positif, motor akan berputar ke arah yang berlawanan. Jika diberi tegangan negatif motor tidak berputar.



Gambar 1.5 Amplifier

4. Unit Pre-Amp. PA-150C

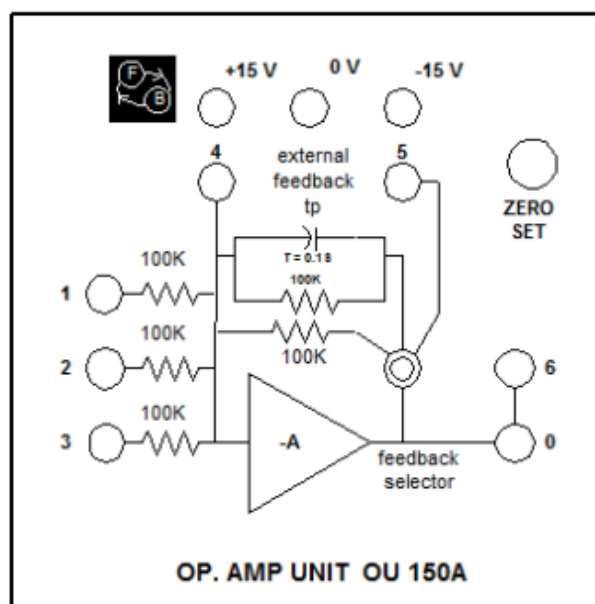
Memiliki 3 terminal masukan dan 2 terminal keluaran. Sinyal-sinyal yang masuk terminal masukan dijumlahkan (misalkan sebagai V_{in}). Jika V_{in} positif, terminal keluaran sebelah atas akan memberikan tegangan positif sebesar $K_{amp} \times V_{in}$ (K_{amp} adalah penguatan Pre-Amp), sementara terminal keluaran bawah memberikan tegangan mendekati nol. Jika V_{in} negatif, hal yang sebaliknya terjadi. Terminal keluaran bawah positif, terminal atas mendekati nol. Jika kedua terminal keluaran Pre-Amp. dihubungkan ke kedua terminal masukan Servo-Amp, akan diperoleh mekanisme yang mengatur arah putaran motor, tergantung dari tanda (+/-) tegangan masukan Pre-Amp. Hal ini sangat diperlukan dalam praktikum sistem kendali, terutama sistem kendali posisi. Potensiometer zero offset digunakan untuk mengatur agar pada saat masukan nol, tegangan keluaran sedekat mungkin ke nol. Pada unit ini tidak dilakukan pengukuran karena tidak digunakan dalam praktikum.



Gambar 1.6 Unit Pre-Amp. PA-150C

5. Unit Op-Amp. OA-150A

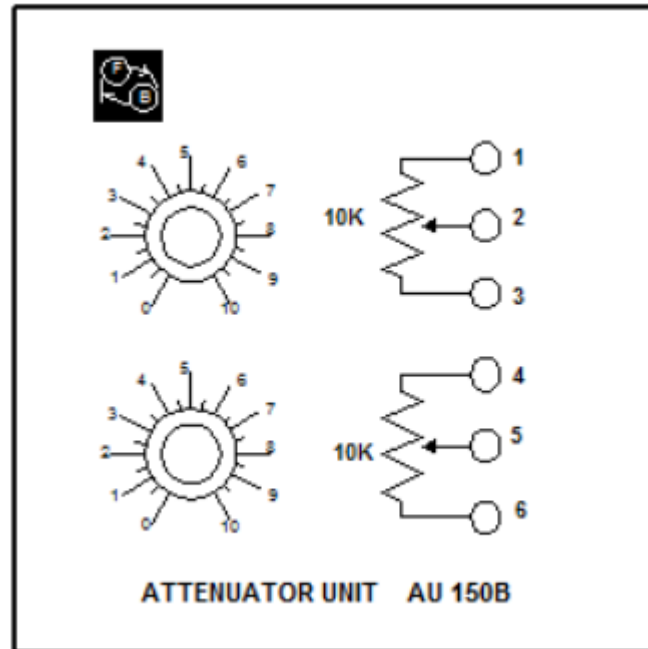
Berupa rangkaian penguat operasional dengan konfigurasi inverting. Terdapat feedback selector yang dapat membuat unit ini berfungsi sebagai penjumlah, integrator penjumlah (summing integrator), atau rangkaian lain tergantung pada umpan balik yang dipasang. Potensiometer zero offset digunakan untuk mengatur agar pada saat masukan nol, tegangan keluaran juga nol. Pada praktikum ini, unit ini biasa digunakan sebagai komparator atau error detector. Pada waktu menggunakan Op-Amp sebagai error detector (komparator), pastikan bahwa kedua tegangan input Op-Amp berlawanan tanda. Hal ini untuk meyakinkan bahwa umpan balik yang terbentuk adalah umpan balik negatif.



Gambar 1.7 Unit Op-Amp. OA-150A

6. Unit Attenuator AU-150B

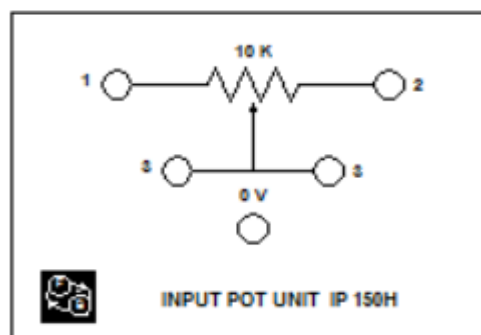
Berupa 2 buah potensiometer putar 10K. Dipergunakan sebagai pengontrol tegangan (biasanya sebagai masukan acuan dalam sistem kontrol pada motor), jika dihubungkan ke sumber tegangan atau sebagai pengontrol penguatan jika dihubungkan dengan unit amplifier (menggunakan potensio sebagai pembagi tegangan).



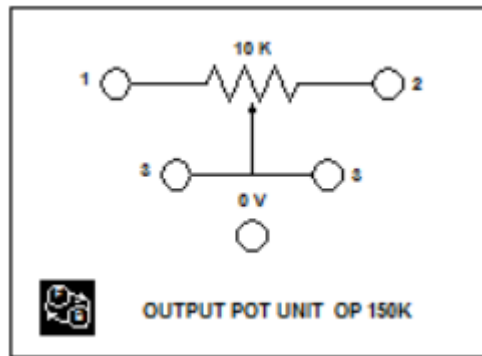
Gambar 1.8 Unit Attenuator AU-150B

7. Potensiometer Input IP-150H dan Output OP-150K

Berupa potensiometer putar 10K dilengkapi dengan skala yang menyatakan sudut putaran. Dipergunakan dalam percobaan pengaturan posisi sebagai transduser posisi (angular) ke tegangan listrik. IP-150H memiliki perputaran maksimum $+150^\circ$ dan -150° , digunakan untuk memberikan posisi referensi. OP-150K memiliki perputaran yang tak terbatas, dipasang pada sumbu tambahan motor menggunakan push-on coupling untuk mengamati posisi keluaran dalam praktikum kontrol posisi. Pada unit ini tidak dilakukan pengukuran karena tidak digunakan dalam praktikum.



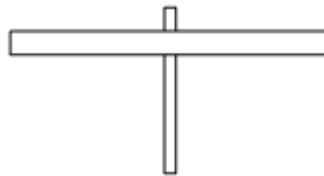
Gambar 1.9 Potensiometer Input IP-150H



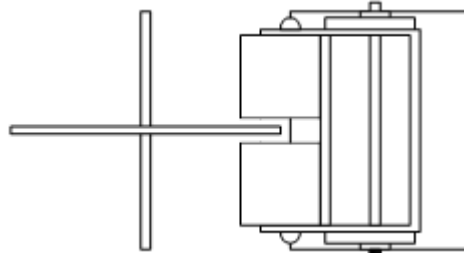
Gambar 1.10 Potensiometer Output OP-150K

8. Unit Beban (Load Unit) LU-150L

Terdiri dari lempengan inersia, lempeng aluminium tipis, dan rem magnetik. Lempengan inersia dipasang pada sumbu putar motor dan menambah inersia motor. Jika lempeng aluminium tipis dipasangkan dan dibuat berputar pada celah magnet rem magnetik, akan timbul efek pengereman. Efek pengereman ini digunakan untuk mensimulasikan pembebanan pada motor. Besarnya pengereman tergantung pada posisi magnet.



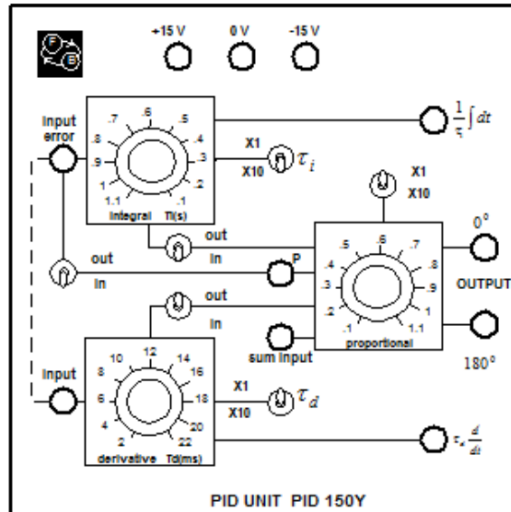
Gambar 1.11 Lempengan Inersia



Gambar 1.12 Rem Magnetik

9. Unit Kontroler PID PID-150Y

Terdiri dari 3 bagian utama: penguat inverting sebagai kontroler proporsional, inverting integrator sebagai kontroler integral, inverting differensiator sebagai kontroler derivative. Masing-masing mempunyai terminal keluaran terpisah. Parameter masing-masing kontroler dapat diatur dengan potensiometer yang tersedia. Terdapat selektor in/out yang mengatur konfigurasi keseluruhan kontroler ini. Penggunaan PID secara lebih rinci akan dibahas terpisah.



Gambar 1.13 Kontroler PID, PID-150Y

1.3 Alat dan Komponen yang Digunakan

1. Modul Servo System MS-150
2. Multimeter
3. Osiloskop/recorder XY
4. Kabel jumper.
5. Stopwatch.
6. Buku catatan laboratorium.

1.4 Tugas Pendahuluan

1. Berdasarkan gambar 1.1, turunkan model persamaan motor DC dalam domain Laplace sehingga diperoleh diagram blok pada gambar 1.2 dan diperoleh persamaan (1.1).
2. Jika diketahui persamaan gerak dari sistem orde-1 : $2 y'(t) + 5 y(t) = x(t)$, dengan $y'(0) = y(0) = 0$. Tentukan :
 - a. Fungsi alih persamaan diatas, jika input-nya adalah $X(s)$ dan output-nya $Y(s)$.
 - b. Besar penguatan (K) dan konstanta waktu (τ).
 - c. Tentukan fungsi alih sistem setelah diberi masukan step.
3. Lihat persamaan (1.2). Apabila $V_m(s)$ adalah masukan step sebesar V_s dan $\omega_m(s) = V_{tcg}(s)/K_{tcg}$, maka tentukan respon V_{tcg} dalam domain waktu dan gambarkan respon waktunya.
4. Turunkan persamaan sinyal output dan gambarkan pada domain waktu apabila sistem yang direpresentasikan oleh persamaan (1.2) diberi input berupa sinyal impuls.
5. Buat *flowchart* langkah praktikum pada modul ini.

1.5 Percobaan

1.5.1 Pengenalan Alat

Persiapan

1. Pasang tiap unit yang akan dipakai dalam praktikum ini di atas *baseplate* magnetik.
2. Unit yang tidak terpakai tidak dihubungkan ke catu daya.
3. Hubungkan unit daya Power Supply PS-150 dengan sumber tegangan jala-jala 220 V AC.

Unit Power Supply dan Atenuator

4. Ukur tegangan keluaran Power Supply PS-150E. Jika tidak sesuai dengan yang seharusnya, laporkan pada Asisten.
5. Hubungkan Attenuator Unit AU-150B dengan Power Supply PS-150E. Hubungan tersebut harus sedemikian sehingga:
 - keluaran AU berupa tegangan DC variabel 0 V sampai +15 V.
6. Dapatkan hubungan antara posisi potensio dengan tegangan keluarannya. Dengan mengambil beberapa data, gambarlah hubungan tersebut. Tentukan apakah potensio tersebut cukup linear. Catatlah di buku catatan.

Menjalankan Motor

7. Buatlah hubungan sesuai dengan gambar 1.14. Keluaran AU (tegangan DC variabel 0 s/d +15 V) dihubungkan ke terminal 1 (input) Servo Amplifier SA-150D. Posisi awal potensio AU di posisi nol.



Gambar 1.14 Hubungan sistem untuk menjalankan motor

8. Ubah perlahan-lahan posisi potensio sampai motor mulai bergerak. Perhatikan arah putaran motor. Naikkan tegangan input Servo-Amp (dengan mengubah posisi potensio) dan perhatikan pengaruhnya pada putaran motor.
9. Ulangi langkah 7 dan 8, tetapi dengan keluaran AU dihubungkan ke terminal 2 (input) SA-150D. Perhatikan arah putaran motor.
10. Ulangi langkah 7 dan 8, tetapi dengan keluaran AU berupa tegangan dc variabel dari 0 s/d -15 V. Apakah motor dapat berputar? Jelaskan fenomena yang diperoleh di buku catatan.

Unit Op-Amp

11. Jalankan motor dengan memberikan input melalui Atenuator AU-150B. Beri catu daya ke Op Amp Unit OU-150A. Selektor feedback pada posisi paling kiri (sebagai penjumlah).

12. Buatlah hubungan sesuai dengan gambar 1.15. Keluaran Atenuator AU berupa tegangan DC variable dari 0 V s/d +15 V. (kedua keluaran Atenuator AU dimasukkan ke input Op Amp Unit OU). Apakah motor dapat berputar?



Gambar 1.15 Hubungan sistem untuk unit Op-Amp

13. Buat rangkaian seperti di atas, tetapi dengan keluaran Atenuator Unit berupa tegangan DC variable dari 0 s/d -15 V. Apakah motor dapat berputar?
14. Buat rangkaian seperti di atas, kali ini dengan menggunakan kedua potensio pada Atenuator Unit AU, sedemikian sehingga keduanya mampu menghasilkan tegangan DC variable dari -15 V sampai +15 V. Catat posisi potensio pada saat tegangan keluarannya 0 V. Hubungkan keluaran kedua potensio tersebut ke terminal-terminal masukan Op Amp Unit OU.
15. Atur posisi potensio 1 dan 2 pada AU sehingga tegangan keluarannya 0 V. Atur potensio *zero setting* pada Op Amp Unit OU sehingga tegangan keluaran Op Amp Unit OU nol. Pengaturan *zero setting* ini harus selalu dilakukan untuk percobaan-percobaan berikutnya.
16. Posisi potensio 1 tidak diubah (tetap menghasilkan 0 V). Atur posisi potensio 2 sehingga motor bergerak dengan kecepatan sedang.
17. Sekarang cobalah mengubah posisi potensio 1 (potensio 2 tetap seperti di atas) sehingga motor berhenti bergerak. Ukur tegangan keluaran potensio 1 dan 2.
18. Beri analisis singkat mengenai apa yang sudah dikerjakan.

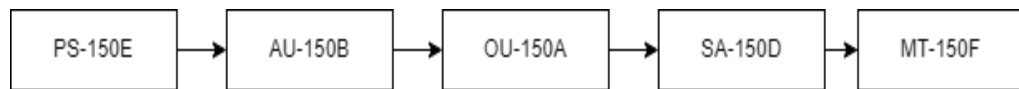
Tachogenerator

19. Pasang lempengan alumunium tipis pada sumbu tambahan motor. Jalankan motor dengan memberikan input melalui Attenuator Unit AU.
20. Dengan menggunakan stopwatch, hitung waktu yang dibutuhkan motor untuk berputar 30 kali. Ukur tegangan keluaran tachogenerator (ingat putaran sumbu tambahan dibanding dengan sumbu utama 1:30).
21. Ulangi langkah 20 untuk beberapa macam tegangan input. Minimal 3 kali pengulangan dengan nilai tegangan input yang berbeda-beda.
22. Plot karakteristik tachogenerator (tegangan keluaran dalam Volt sebagai fungsi putaran dalam rad/detik).
23. Dari percobaan ini akan diperoleh K_{tcg} yang diperlukan pada percobaan selanjutnya. Catat data yang diperoleh lalu perhitungan di buku catatan.

1.5.2 Pengukuran Fungsi Transfer Melalui Pengukuran Fisik

Penentuan Resistansi Motor

24. Hubungkan rangkaian seperti pada Gambar 1.16 berikut ini. Keluaran Atenuator AU berupa tegangan DC yang bisa diubah-ubah dari 0 sampai -15 V (Jangan digunakan hingga -15V, batasi kira-kira setengahnya). Terminal terminal pada Servo Amplifier SA dihubungkan untuk konfigurasi pengaturan jangkar (Rangkaian Armature (A) yang sudah terhubung).
25. Keluaran AU berupa tegangan DC yang bisa diubah-ubah dari 0 V sampai -15 V. Terminal terminal pada SA dihubungkan untuk konfigurasi pengaturan jangkar.



Gambar 1.16 Hubungan sistem untuk penentuan resistansi motor

26. Atur potensiometer Atenuator AU pada posisi 0V (tegangan keluaran AU = 0 V). Nyalakan unit catu daya. Ubah kedudukan potensio sampai motor berputar pada putaran rendah (V_{tcg} kira-kira 5 V).
27. Bebani motor dengan rem magnetik sampai tidak berputar. **Jaga arus motor tidak melebihi arus maksimum 2 A (turunkan tegangan input bila perlu)**. Harga arus motor dilihat dari amperemeter di Power Supply PS-150E.
28. Catat harga tegangan keluaran Atenuator AU (V_m) dan arus motor (I_m) pada buku catatan. Ulangi langkah di atas untuk beberapa nilai keluaran Attenuator AU yang berbeda. Hitung resistansi jangkar R_m menggunakan rumus: $R_m = V_m/I_m$.

Penentuan Induktansi Motor

29. Rangkaian dan prosedur percobaan seperti di atas (percobaan penentuan resistansi motor), tetapi keluaran Atenuator AU berupa tegangan AC yang bisa diubah-ubah dari 0 V sampai 22 V.
30. Motor pada keadaan diam karena dibebani. Ukur $V_{m(rms)}$ dan $I_{m(rms)}$. Catat pada buku catatan. Ulangi langkah di atas untuk beberapa nilai keluaran Atenuator AU yang berbeda. Impedansi jangkar Z_m diperoleh dengan menggunakan rumus: $Z_m = V_{m(rms)}/I_{m(rms)}$.
31. Induktansi jangkar L_m dihitung dengan menggunakan harga R_m yang didapat dari percobaan penentuan resistansi motor, Z_m , dan frekuensi tegangan jala-jala (50 Hz). Gunakan rumus berikut:

$$L_m = \frac{\sqrt{Z_m^2 - R_m^2}}{2\pi f}$$

Penentuan Konstanta Back-emf

32. Rangkaikan sistem seperti pada percobaan penentuan resistansi motor. Motor berputar bebas tanpa pembebanan rem magnetik.
33. Jalankan motor sampai mencapai keadaan tunak (*steady state*).
34. Ukur: V_m (yang baru), I_m (yang baru), dan tegangan tachogenerator. Catat pada buku catatan. Ulangi langkah di atas untuk beberapa nilai keluaran AU yang berbeda. Harga ω didapat dari tegangan tachogenerator. Konstanta *back-emf* K_m : $K_m = V_b/\omega$, sedangkan $V_{\text{tacho}} = K_{\text{tcg}} \cdot \omega$, dengan K_{tcg} diperoleh dari percobaan tachogenerator.

Penentuan Konstanta Torsi

35. Dengan menggunakan persamaan kekekalan energi (daya mekanis = daya listrik - rugi-rugi resistansi), yaitu:

$$T\omega = K_t I_m \omega = V_m I_m - I_m^2 R_m$$

maka konstanta momen kopel K_t dapat diperoleh melalui persamaan:

$$K_t = (V_m - I_m R_m)/\omega$$

sehingga diperoleh hubungan:

$$K_t = K_m$$

Penentuan Koefisien Gesekan

36. Koefisien gesekan D_m diperoleh dengan menggunakan rumus: $D_m = K_t I_m / \omega$. Lakukan perhitungan singkat pada buku catatan. Dapatkan nilai koefisien gesekan motor.

Penentuan Momen Inersia

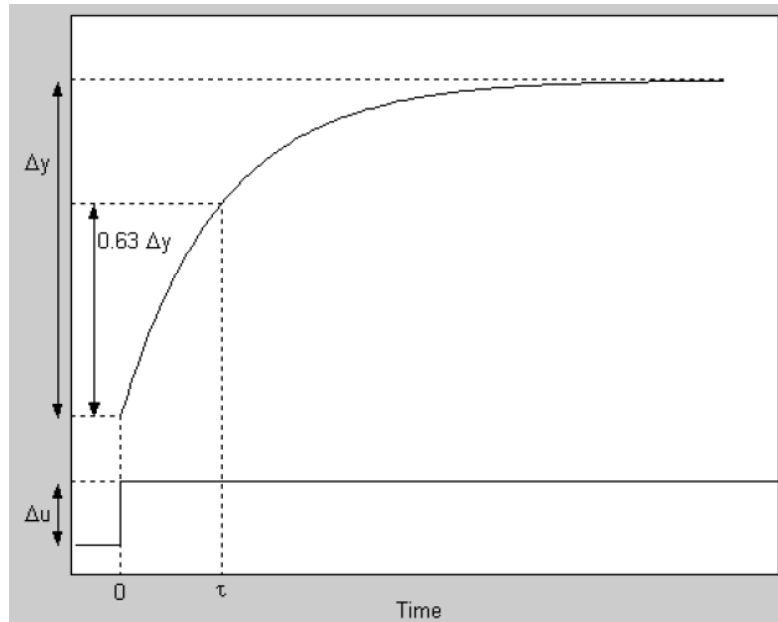
37. Penentuan momen inersia diperoleh dengan melalui respon waktu tegangan tachogenerator terhadap masukan step. Lakukan penentuan fungsi transfer secara grafis terlebih dahulu. Kemudian, melalui persamaan (1.2), dengan harga-harga yang telah dicari sebelumnya, maka akan didapatkan besarnya momen inersia motor. Lakukan perhitungan singkat pada buku catatan.

1.5.3 Penentuan Fungsi Transfer Secara Grafis

Untuk melakukan percobaan ini, lihat Gambar 1.20. Dengan menggunakan persamaan (1.3), maka nilai K dan τ bisa diperoleh melalui hubungan:

$$K = \left(\frac{\Delta y}{\Delta u} \right) / K_{TCG}$$

dengan nilai τ diperoleh saat respon sistem mencapai 63% nilai keadaan tunaknya (lihat Gambar 1.17).



Gambar 1.17 Penentuan model secara grafik

38. Catat besarnya konstanta waktu τ , Δu , dan Δy pada buku catatan. Dapatkan nilai K .
39. Dengan menggunakan persamaan (1.3), turunkan fungsi transfer motor.

Modul 2

SISTEM KENDALI KECEPATAN

2.1 Tujuan

Tujuan dari percobaan ini adalah memahami konsep pengendalian kecepatan motor DC. Agar pemahaman dari konsep pengendalian motor bisa tercapai, maka dalam percobaan ini diharapkan mampu untuk:

- Memahami konsep sistem pengendalian kecepatan motor DC secara umum, baik sistem lingkaran terbuka maupun sistem lingkaran tertutup.
- Memahami sistem pengendali PID (khususnya pengendali PI) untuk pengendalian kecepatan motor DC.
- Mampu melakukan analisis kinerja terhadap suatu sistem kontrol.

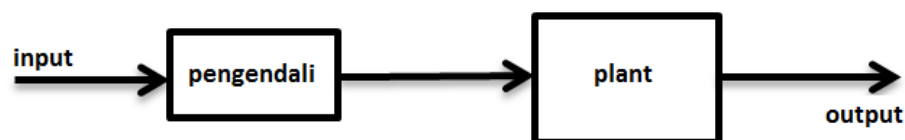
2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pengendalian Kecepatan

Dari percobaan modul sebelumnya telah didapat model motor DC yang memberikan hubungan antara tegangan input motor V_m dengan kecepatan putaran motor ω_m dalam domain Laplace sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut:

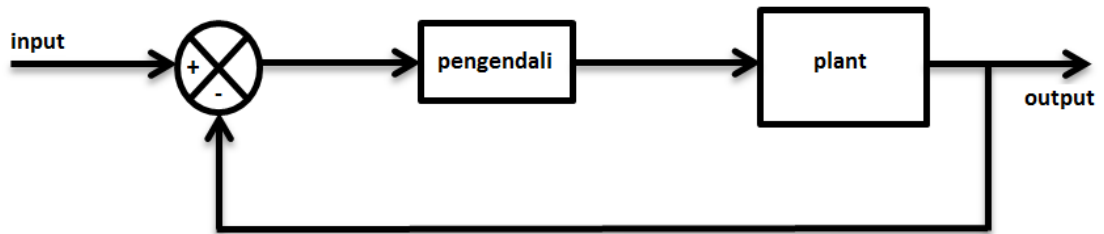
$$\frac{\omega_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

Pada dasarnya terdapat dua jenis sistem pengendalian, yaitu pengendalian lingkaran terbuka dan pengendalian lingkaran tertutup. Pada pengendalian lingkaran terbuka, keluaran sistem tidak diumpan balikkan untuk dibandingkan dengan sinyal referensi. Berikut ini adalah gambar diagram blok sistem pengendalian lingkaran terbuka:



Gambar 2.1 Diagram blok sistem pengendalian lingkaran terbuka

Sedangkan pada pengendalian lingkaran tertutup, keluaran sistem diumpan balikkan untuk dibandingkan dengan sinyal referensi. Hal ini berguna agar keluaran sistem bisa sesuai dengan sinyal referensi. Gambar diagram blok sistem pengendalian lingkaran tertutup bisa dilihat pada Gambar 2.2. Sebelum melakukan perancangan suatu sistem pengendalian, baik lingkaran terbuka atau lingkaran tertutup, kestabilan sistem harus menjadi bahasan yang dikaji terlebih dahulu. Kita harus mengetahui pada rentang mana



Gambar 2.2 Diagram blok sistem pengendalian lingkaran tertutup

pengendali yang kita desain bisa menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Hal ini penting mengingat pengendali yang kita rancang harus bisa menjamin agar sistem pengendalian tetap stabil sehingga *plant* yang dikendalikan tidak rusak. Salah satu metode dasar dalam menganalisis kestabilan dari suatu sistem adalah menggunakan *Kriteria Stabilitas Routh (Routh Stability Test)*. Metode *Routh Stability Test* dapat dipelajari pada referensi nomor (6) dan (8).

2.2.2 Pengendali PID

Sistem pengendali PID (Proporsional Integral Derivatif) merupakan suatu sistem pengendali yang digunakan secara luas di berbagai bidang industri. Pengendali PID terdiri dari 3 komponen pengendali, yaitu proporsional, integral, dan derivatif.

A. Proporsional

Dalam domain waktu kontinyu, hubungan antara sinyal error e dengan sinyal kontrol u dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.2)$$

Dari persamaan (2.1) terlihat bahwa pengendali proporsional menghasilkan sinyal kontrol berupa sinyal error yang dikalikan (proporsional) dengan konstanta proporsional K_p . Pengendali proporsional digunakan untuk memperbesar penguatan dan mempercepat respon transien.

B. Integral

Dalam pengendali integral, nilai error e diumpankan sebagai laju perubahan sinyal kontrol u sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.3)$$

Pengendali integral berfungsi untuk menghilangkan galat atau *steady state error* meskipun juga dapat menyebabkan terjadinya *overshoot* dan osilasi yang mengakibatkan keadaan tunak lama dicapai.

C. Derivatif

Pengendali derivatif akan memberikan suatu sinyal kontrol u yang bersesuaian dengan laju perubahan sinyal error e sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

Pengendali ini digunakan untuk mempercepat respon transien meskipun memiliki kekurangan, yaitu dapat meningkatkan derau sistem.

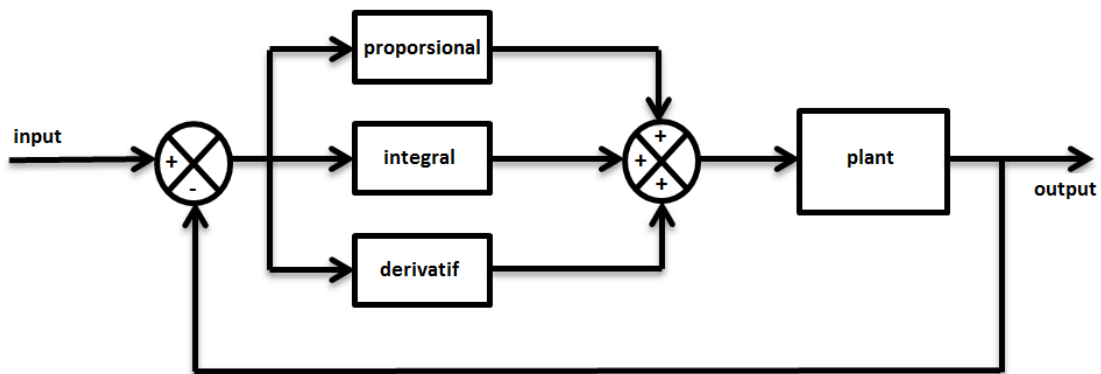
Sistem pengendali PID bisa berupa kombinasi antara proporsional, integral, dan derivatif, bergantung pada respon sistem yang diinginkan. Apabila ketiga jenis pengendali tersebut digunakan, maka persamaan yang menyatakan antara sinyal error e dengan sinyal kontrol u dalam domain waktu kontinyu adalah:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Dalam domain Laplace dinyatakan sebagai:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.6)$$

Berikut ini adalah diagram blok sistem secara umum yang menggunakan pengendali PID:



Gambar 2.3 Diagram blok sistem lingkaran tertutup dengan pengendali PID

2.3 Alat dan Komponen yang Digunakan

1. Modular Servo System Ms-150
2. Multimeter.
3. Osiloskop/recorder XY.
4. Kabel jumper.
5. Stopwatch.
6. Buku Catatan Laboratorium

2.4 Tugas Pendahuluan

1. Jelaskan prinsip kerja sistem pengendalian lingkaran tertutup.
2. Dengan kendalian yang didefinisikan pada persamaan (1.2) dan pengendali PID yang merupakan bentuk khusus dari persamaan (2.5), gambarlah diagram blok skema sistem kendali kecepatan motor DC dengan pengendali PID. Turunkan juga fungsi transfer

sistem lingkaran tertutupnya. Dengan nilai R_m , D_m , J_m , dan K_t yang diperoleh dari percobaan sebelumnya, turunkan fungsi transfer sistem tertutupnya secara lengkap.

3. Modelkan pengendali Kp dan motor dengan matlab simulink dengan nilai $K_p = 2$. Simulasikan dengan dan tanpa block saturasi. Jelaskan perbedaannya.
4. Buatlah *flowchart* dari langkah praktikum ini.

2.5 Percobaan

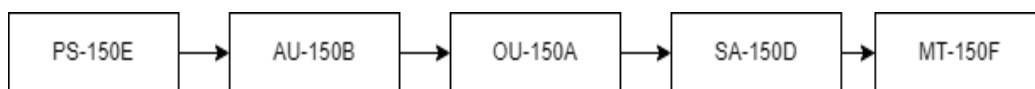
2.5.1 Persiapan

Persiapan

1. Pasang tiap unit yang akan dipakai dalam praktikum ini di atas *baseplate* magnetik.
2. Unit yang tidak terpakai tidak dihubungkan ke catu daya.
3. Hubungkan unit daya Power Supply PS-150E dengan sumber tegangan jala-jala 220 V AC.

Rangkaian Open Loop (Lingkaran Terbuka)

4. Buatlah hubungan sesuai dengan gambar 2.4.
5. Terminal pada Servo Amplifier SA-150D dihubungkan untuk membentuk konfigurasi motor kendali jangkar (*armature*).
6. Keluaran Attenuator Unit berupa tegangan DC variabel dari 0 V s/d +15 V. Apakah motor dapat berputar? Berikan analisis.



Gambar 2.4 Hubungan Sistem Untuk Error Detector.

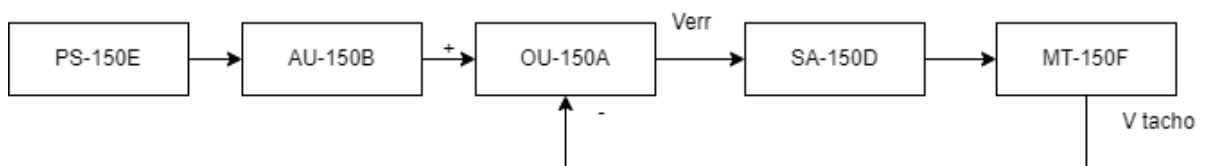
7. Buat rangkaian seperti di atas, tetapi dengan keluaran Attenuator AU berupa tegangan DC variabel dari 0 s/d -15 V. Apakah motor dapat berputar? Berikan analisis di buku catatan.
8. Petunjuk: agar tidak mengganti rangkaian, praktikum dapat dilanjutkan ke langkah 12 (Sistem Pengendali Kecepatan Lingkaran Terbuka) terlebih dahulu.

Rangkaian Close Loop (Lingkaran Tertutup)

9. Buatlah hubungan sesuai dengan gambar 2.5. Keluaran Attenuator Unit berupa tegangan DC variabel dari 0 V s/d +15 V.

10. Umpan balik yang dibentuk haruslah berupa umpan balik negatif. Caranya:

- Atur agar motor berputar dengan kecepatan sedang pada konfigurasi lingkaran terbuka.
- Ukur dan tentukan tanda (+/-) tegangan masukan op-amp. Dari sini dapat ditentukan tanda (+/-) tegangan tachogenerator yang harus diberikan sebagai umpan balik.
- Hubungkan salah satu terminal tachogenerator dengan 0 V. Ukurlah tegangan terminal lain (terhadap 0 V). Jika polaritasnya sesuai dengan yang diinginkan, hubungkan terminal ini ke masukan op-amp. Jika tidak, balikkan hubungan terminal tachogenerator (atau jika putaran motor meninggi, hubungan yang terbentuk adalah umpan balik positif. Balikkan hubungan terminal tachogenerator).



Gambar 2.5 Hubungan Sistem Untuk Error Detector (Lingkaran Tertutup).

11. Perhatikan perilaku motor apabila kecepatannya meningkat, plot pada osiloskop tegangan motor dan input, serta dapatkan waktu motor mencapai steady state. Ulangi dengan 3 variasi nilai tegangan set point dan berikan analisa.

2.5.2 Sistem Pengendalian Kecepatan

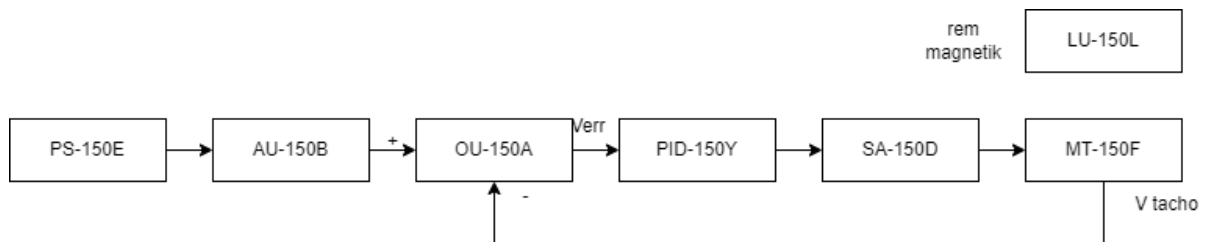
Pengendalian Open Loop (Lingkaran Terbuka)

12. Rangkaian dan keterangan lain seperti pada percobaan persiapan pengendalian lingkaran terbuka (Gambar 2.4). Umpan balik negative dilepas (tegangan tachogenerator tidak dihubungkan ke unit Op-Amp).
13. Putar potensio pada Attenuator AU pelan-pelan sampai motor tepat berputar. Ukur tegangan keluaran AU pada saat ini. Dapatkan data tegangan *deadband*.
14. Saklar pada posisi terbuka. Atur potensio agar tegangan keluaran Attenuator AU sebesar 6V sampai 7 V (harus konsisten, jika sekarang dipilih harga 6 Volt, maka demikian pula untuk percobaan-percobaan berikutnya).
15. Jalankan *osiloskop* dengan *timebase* cukup cepat sedemikian sehingga keadaan peralihan mudah diamati namun masih terdapat cukup waktu sehingga keadaan tunak dapat dicapai. Amati respon motor pada osiloskop. Catat hasilnya lalu lakukan analisis. Tutup saklar.
16. Dapatkan grafik respon waktu tegangan tachogenerator (kecepatan) dengan motor tanpa beban dan input berupa fungsi step.
17. Ubah selektor *timebase* osiloskop XY ke posisi yang lebih lambat (harus cukup lambat untuk melakukan langkah-langkah di bawah ini).

18. Posisi rem pada P_0 (garis paling pertama). Tutup saklar-1 dan dapatkan respon waktu V_{tacho} . Setelah mencapai keadaan tunak (*steady-state*), ubah posisi rem ke skala baru ($P_1 = P_0 + 1$).
19. Perhatikan perubahan pada respon waktu. Setelah mencapai keadaan tunak, ubah kembali posisi rem ke skala baru lagi ($P_2 = P_1 + 1$).
20. Cobalah lakukan hal ini sampai tiga atau empat kali perubahan posisi rem. Setiap kali, tunggu sampai respon waktu mencapai keadaan tunak.
21. Kembalikan rem ke posisi awalnya.
22. Catat grafik yang didapat dari percobaan pembebanan ini, lalu lakukan analisis.

Pengendalian Close Loop (Lingkar Tertutup)

23. Rangkaian dan keterangan lain seperti pada percobaan persiapan pengendalian lingkaran tertutup (Gambar 2.6). Tegangan tachogenerator diberikan sebagai umpan balik negatif ke unit Op-Amp.



Gambar 2.6 Diagram sistem pengendalian kecepatan

24. Umpan balik yang dibentuk haruslah berupa umpan balik negatif. Caranya:
 - Atur agar motor berputar dengan kecepatan sedang pada konfigurasi lingkaran terbuka.
 - Ukur dan tentukan tanda (+/-) tegangan masukan op-amp. Dari sini dapat ditentukan tanda (+/-) tegangan tachogenerator yang harus diberikan sebagai umpan balik.
 - Hubungkan salah satu terminal tachogenerator dengan 0 V. Ukurlah tegangan terminal lain (terhadap 0 V). Jika polaritasnya sesuai dengan yang diinginkan, hubungkan terminal ini ke masukan op-amp. Jika tidak, balikkan hubungan terminal tachogenerator (atau jika putaran motor meninggi, hubungan yang terbentuk adalah umpan balik positif. Balikkan hubungan terminal tachogenerator).
25. Dalam mode lingkaran tertutup, ulangi langkah 10 sampai 17
26. PID150Y diatur sehingga menjadi pengendali proporsional dengan $K_p = 2$, lalu ulangi langkah 10 sampai 17. Dapatkan grafik berikut:
 - Sebelum dilakukan pembebanan, grafik yang didapatkan adalah grafik **set point** dan grafik tegangan **tachometer**
 - Setelah pembebanan (langkah 14 sampai 17) grafik yang didapat pada osiloskop adalah grafik tegangan **error** dan **respon sistem terhadap pembebanan**.
27. Ulangi langkah 23 dengan nilai $K_p = 4$. Bandingkan dan lakukan analisis.

28. Selanjutnya, PID-150Y diatur menjadi pengendali PI dengan $K_p = 1$ dan *integral time* $\tau_i=0.2$ detik, lalu ulangi langkah 23. Catat dan lakukan analisis.
29. Ulangi langkah 25 dengan nilai *integral time* sebesar 0.6 detik.

Modul 3

SISTEM KENDALI POSISI

3.1 Tujuan

Tujuan dari percobaan ini adalah memahami konsep pengendalian posisi motor DC. Agar pemahaman dari konsep pengendalian motor bisa tercapai, maka dalam percobaan ini diharapkan mampu untuk:

- Memahami konsep sistem pengendalian posisi motor DC secara umum.
- Memahami sistem pengendali PID (khususnya proporsional) beserta karakteristiknya khususnya untuk sistem pengendalian posisi motor DC.
- Mengimplementasikan sistem pengendalian posisi motor DC menggunakan komponen analog.

3.2 Dasar Teori

3.2.1 Pengendalian Posisi

Berdasarkan fungsi transfer motor yang telah diperoleh dari percobaan pada modul sebelumnya, maka hubungan antara tegangan input motor V_m dengan posisi sudut motor θ_m dalam domain Laplace sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut:

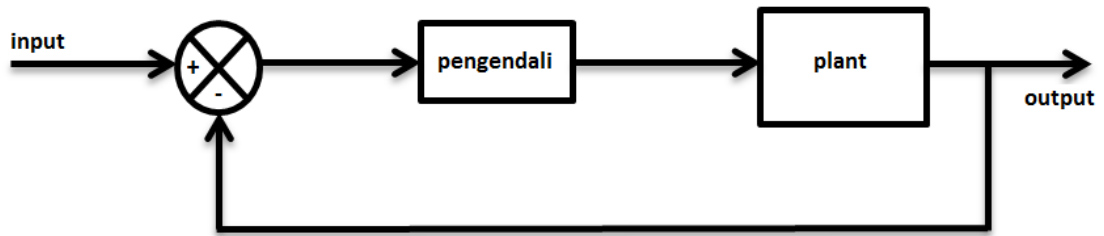
$$\frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{\tau s^2 + s} \quad (3.1)$$

Pada dasarnya terdapat dua jenis sistem pengendalian, yaitu pengendalian lingkaran terbuka dan pengendalian lingkaran tertutup. Pada pengendalian lingkaran terbuka, keluaran sistem tidak diumpanbalikkan untuk dibandingkan dengan sinyal referensi. Hal ini bisa menimbulkan kesalahan keadaan tunak. Berikut ini adalah gambar diagram blok sistem pengendalian lingkaran terbuka:



Gambar 3.1 Diagram blok sistem pengendalian lingkaran terbuka

Sedangkan pada pengendalian lingkaran tertutup, keluaran sistem diumpan balik untuk dibandingkan dengan sinyal referensi. Hal ini bertujuan agar keluaran sistem bisa sama dengan nilai referensi. Dengan kata lain, kesalahan keadaan tunak bisa diminimalkan. Berikut ini adalah gambar diagram blok sistem pengendalian lingkaran tertutup:



Gambar 3.2 Diagram blok sistem pengendalian lingkaran tertutup

3.2.2 Pengendali PID

Sistem pengendali PID (Proporsional Integral Derivatif) merupakan suatu sistem pengendali yang digunakan secara luas di berbagai bidang industri. Pengendali PID terdiri dari 3 komponen pengendali, yaitu proporsional, integral, dan derivatif.

D. Proporsional

Dalam domain waktu kontinu, hubungan antara sinyal error e dengan sinyal kontrol u dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.2)$$

Dari persamaan (3.2) terlihat bahwa pengendali proporsional menghasilkan sinyal kontrol berupa sinyal error yang dikalikan (proporsional) dengan konstanta proporsional K_p . Pengendali proporsional digunakan untuk memperbesar penguatan dan mempercepat respon transien.

E. Integral

Dalam pengendali integral, nilai error e diumpungkan sebagai laju perubahan sinyal kontrol u sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.3)$$

Pengendali integral berfungsi untuk menghilangkan galat atau *steady state error* meskipun juga dapat menyebabkan terjadinya *overshoot* dan osilasi yang mengakibatkan keadaan tunak lama dicapai.

F. Derivatif

Pengendali derivatif akan memberikan suatu sinyal kontrol u yang bersesuaian dengan laju perubahan sinyal error e sebagaimana dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

Pengendali ini digunakan untuk mempercepat respon transien meskipun memiliki kekurangan, yaitu dapat meningkatkan derau sistem.

Sistem pengendali PID bisa berupa kombinasi antara proporsional, integral, dan derivatif, bergantung pada respon sistem yang diinginkan. Apabila ketiga jenis pengendali tersebut

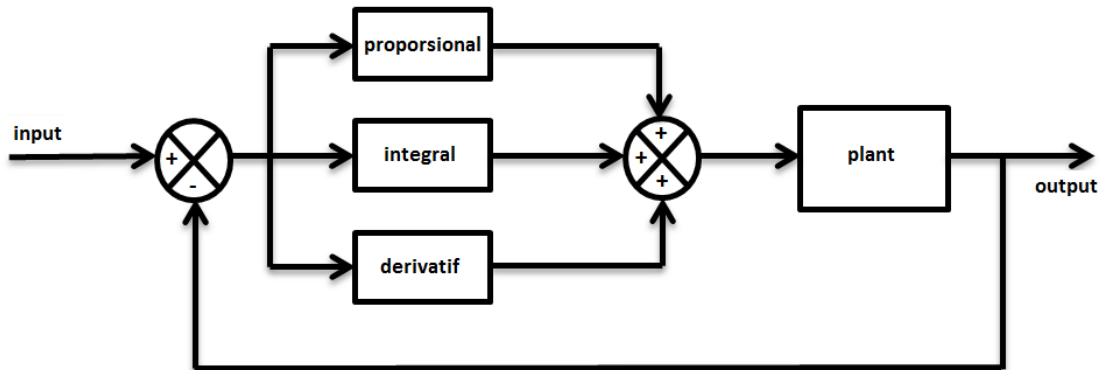
digunakan, maka persamaan yang menyatakan antara sinyal error e dengan sinyal kontrol u dalam domain waktu kontinyu adalah:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Dalam domain Laplace dinyatakan sebagai:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.6)$$

Berikut ini adalah diagram blok sistem secara umum yang menggunakan pengendali PID:



Gambar 3.3 Diagram blok sistem lingkaran tertutup dengan pengendali PID

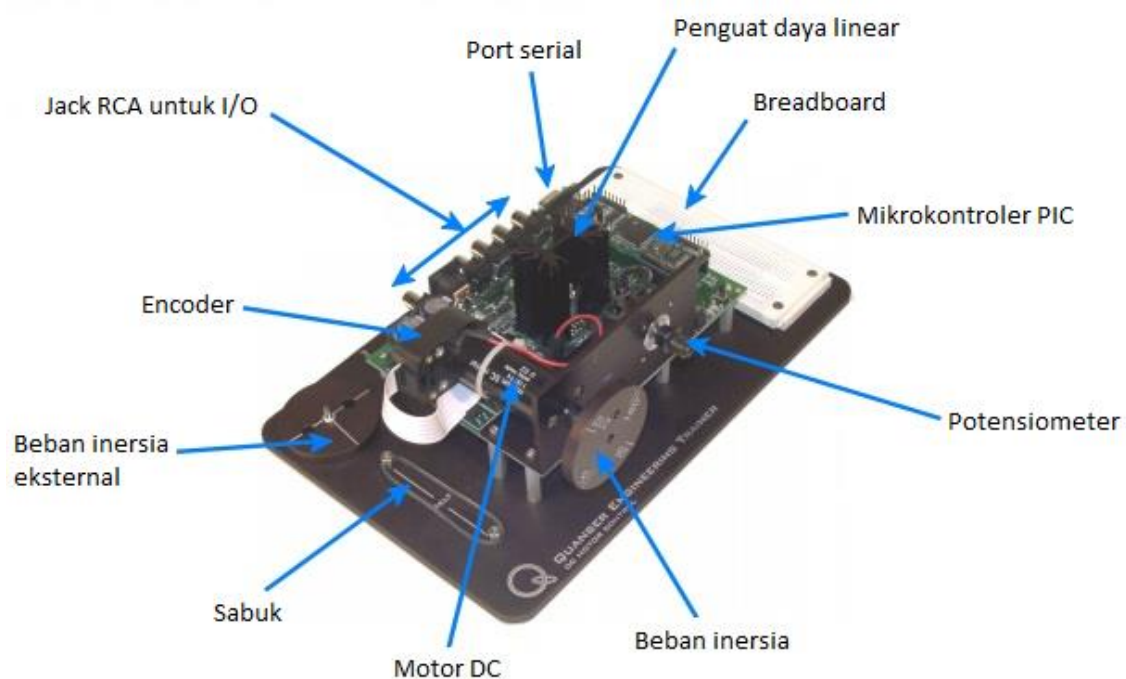
3.2.3 DCMCT Quanser

DCMCT (*Direct Current Motor Control Trainer*) Quanser merupakan suatu kit dari Quanser berupa sistem motor DC yang dilengkapi dengan fitur-fitur sebagai berikut:

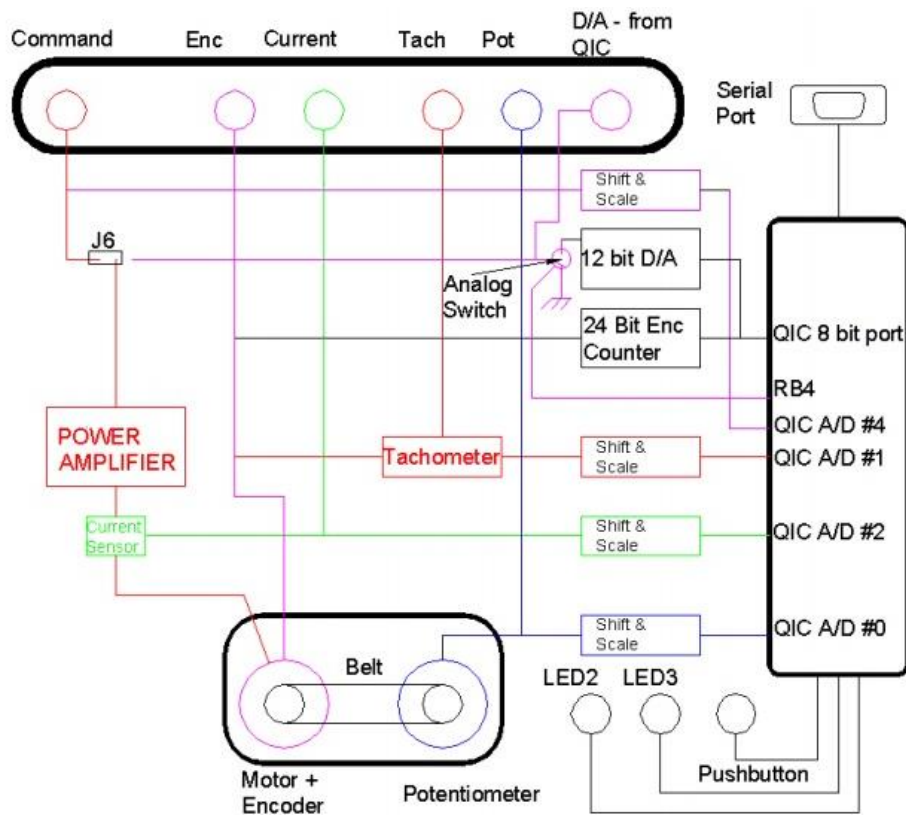
- a. Motor DC dengan sikat *graphite*
Motor ini memiliki inersia rotor yang cukup kecil (sebesar $1,16 \times 10^{-6}$ Kg.m²) dengan friksi yang rendah. Beban inersia yang ditambahkan pada motor memiliki massa 0,068 kg dengan jari-jari sebesar 2,48 cm.
- b. *Optical encoder* resolusi tinggi
Encoder optik *quadrature* dengan resolusi 24 bit.
- c. Sistem penguat daya linear
Penguat daya linear atau *linear power amplifier* digunakan untuk menggerakkan motor. Masukan ke penguat dapat dikonfigurasi melalui jack RCA bertuliskan *Command*. Rentang tegangan yang dibolehkan yang masuk ke *Command* adalah ± 5 V dengan penguatan 3 V/V dan kapasitas arus maksimal 1,5 A.
- d. *Breadboard*
Breadboard digunakan apabila dikehendaki untuk memasang rangkaian pengendali analog menggunakan komponen-komponen elektronika.
- e. Tachometer dan potensiometer
Tachometer digunakan untuk memperoleh sinyal pengukuran kecepatan analog. Sinyal analog proporsional dengan kecepatan motor. Sinyal ini dapat diperoleh pada jack RCA berlabelkan *Tach*. Tegangan keluaran *Tach* adalah ± 5 V. Resolusi tachometer adalah 667 rpm/V.

- f. Potensiometer digunakan untuk memperoleh sinyal pengukuran posisi analog. Penting untuk diperhatikan bahwa masa pakai potensiometer adalah sebanyak 10.000.000 putaran. Dengan keterbatasan tersebut, maka penting untuk memastikan bahwa potensiometer tidak berputar terlalu cepat, sehingga pada saat sensor potensiometer tidak diperlukan, maka *belt* atau sabuk penghubung antara motor dengan potensiometer harus dilepas. Sinyal keluaran dari potensiometer juga tersedia pada jack RCA bertuliskan *Pot*. Potensiometer ini memiliki hambatan maksimal sebesar 10 k Ω dan mampu mengukur sudut dari 0° hingga 350° dengan resolusi 39°/V. Tegangan keluaran sinyal ini sebesar $\pm 4,7$ V.
- g. Sensor arus analog
Sensor arus ini digunakan untuk mengetahui besarnya arus yang mengalir pada motor. Keluaran dari sensor ini berupa tegangan sebesar ± 5 V dan tersedia pada jack RCA berlabelkan *Current*. Sensor arus ini memiliki resolusi sebesar 0,556 A/V dengan toleransi sebesar $\pm 10\%$.
- h. Mikrokontroler PIC
Digunakan untuk mengendalikan motor secara digital tanpa menggunakan PC.
- i. Konektor USB dan RS232
Sebagai antarmuka antara DCMCT dengan perangkat digital seperti PC dan mikrokontroler.

Berikut ini adalah *layout* dan diagram dari sistem DCMCT Quanser:

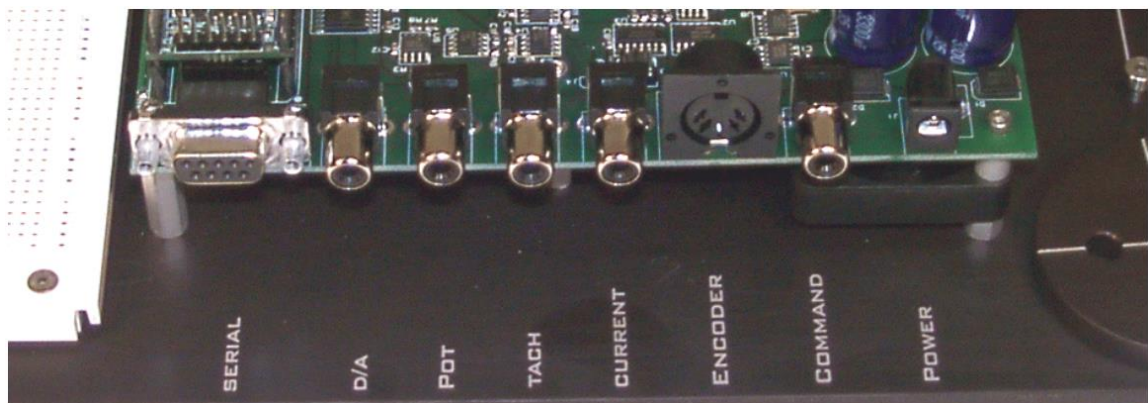


Gambar 3.4 *Layout* dari sistem DCMCT Quanser



Gambar 3.5 Diagram dari sistem DCMCT Quanser

Sedangkan berikut ini adalah susunan masukan dan keluaran (I/O) atau *input/output* pada jack RCA:



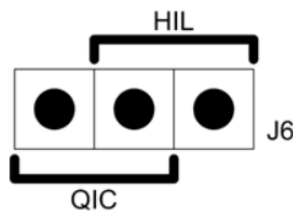
Gambar 3.6 Susunan I/O pada jack RCA

Untuk aplikasi sistem pengendali yang diimplementasi menggunakan rangkaian elektronika analog, sistem DCMCT Quanser menyediakan koneksi I/O yang serupa pada jack RCA (khusus untuk *Current* agak sedikit berbeda) yang dapat diakses pada J11 dan sumber tegangan DC ± 5 V dan ± 12 V pada J4. Konfigurasi I/O pada J11 dan J4 dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 3.7 Konfigurasi J4 dan J11

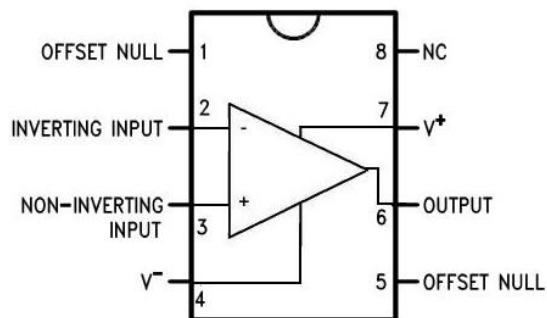
DCMCT Quanser memiliki dua mode operasi, yaitu HIL (*Hardware In the Loop*) dan QIC (*Quanser Integrated Controller*). DCMCT Quanser hanya bisa dioperasikan dalam satu mode saja. Untuk konfigurasi mode kerja DCMCT Quanser bisa dilakukan dengan mengubah koneksi jumper pada J6 sebagai berikut:



Gambar 3.8 Konfigurasi J6

3.2.4 Penguat Operasional LM741

Penguat operasional (*operational amplifier*) digunakan untuk mengimplementasikan sistem pengendali analog. Komponen penguat operasional yang digunakan adalah tipe LM741. Komponen ini menerima suplai tegangan maksimal sebesar ± 22 V dengan tegangan input maksimal sebesar ± 15 V. Berikut ini adalah konfigurasi pin LM741. Karakteristik lengkap dari LM741 dapat dipelajari pada *datasheet*.



Gambar 3.9 Konfigurasi pin LM741^[1]

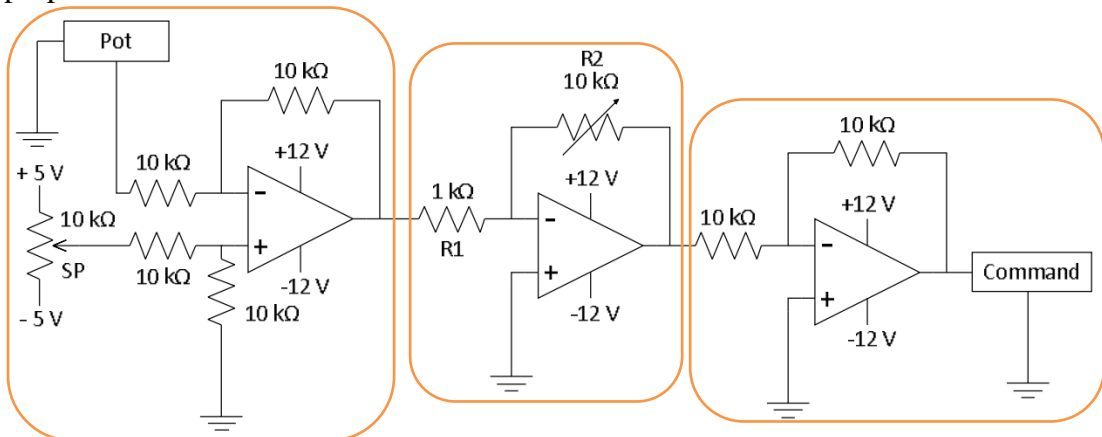
Untuk mewujudkan suatu sistem kendali motor DC, diperlukan implementasi penguat operasional yang terdiri dari rangkaian penjumlah (*summer*), penyalisih (*difference*), pembalik (*inverting*), integrator, dan diferensiator. Pada Gambar 3.2, blok yang berfungsi sebagai penyalisih antara input (referensi) dengan output (keluaran) diimplementasikan menggunakan rangkaian *difference amplifier*. Blok proporsional, integral, dan derivatif masing-masing diimplementasikan dengan rangkaian *inverting*, integrator, dan diferensiator. Ketiga sinyal hasil keluaran blok proporsional, integral, dan derivatif dijumlahkan menggunakan rangkaian *summer amplifier*.

3.3 Alat dan Komponen yang Digunakan

1. DCMCT Quanser.
2. Osiloskop/recorder XY.
3. Adaptor arus bolak-balik.
4. Potensio/trimpot 10 k Ω .
5. Penguat Operasional LM741.
6. Resistor 10 k Ω .
7. Resistor 1 k Ω .
8. Multimeter.
9. Kabel jumper.
10. Buku catatan laboratorium.

3.4 Tugas Pendahuluan

1. Jelaskan fungsi masing-masing rangkaian op amp dalam skema rangkaian pengendali proporsional berikut.



2. Pada gambar 3.10 buktikan bahwa konstanta K_p ditentukan melalui persamaan $K_p = \frac{R_2}{R_1}$. Gunakan asumsi seperlunya.
3. Fungsi transfer motor DC pengendalian posisi direpresentasikan dalam persamaan (3.1). Untuk motor DC Quanser, diketahui nilai K sebesar 19,9 rad/V.s dan τ sebesar 0,0929 s. Dengan menggunakan pengendali proporsional, gambarkan diagram blok sistem pengendali posisi motor DC lingkaran tertutup dan turunkan juga fungsi transfer lingkaran tertutupnya.
4. Modelkan dan simulasikan sistem pengendalian posisi dalam MATLAB.
5. Buatlah *flowchart* praktikum modul ini.

3.5 Percobaan

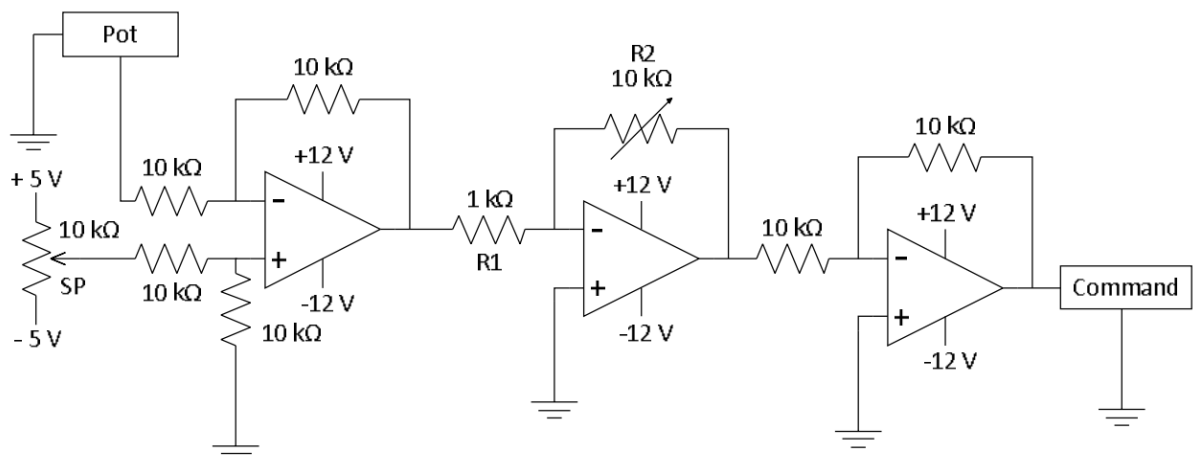
Persiapan

1. Siapkan alat dan komponen yang digunakan di atas meja. Hubungkan adaptor AC ke *Power* sehingga DCMCT Quanser aktif. Pastikan jumper J6 terkonfigurasi untuk operasi HIL. Hubungkan motor dan potensiometer dengan menggunakan *belt*.

3.5.1 Pengendalian Posisi Lingkaran Tertutup Menggunakan Rangkaian Op Amp

Pengendali Proporsional

2. Susun rangkaian sesuai dengan Gambar 3.10.
3. Hubungkan keluaran potensiometer Set Point SP ke kanal 1 recorder dan keluaran *Pot* ke kanal 2 recorder.
4. Perhatikan sudut awal beban inersia. Putar potensiometer Set Point SP dan perhatikan perubahan sudut beban inersia. Analisis fungsi Set Point SP terhadap sudut beban inersia.
5. Putar potensiometer Set Point SP sehingga memberikan tegangan keluaran dengan level tertentu dan motor dapat bergerak ke posisi tertentu. Perhatikan bahwa motor tidak boleh berputar terlalu lama karena dapat merusak sensor posisi *Pot*.



Gambar 3.10 Skema rangkaian pengendali proporsional

6. Putar potensiometer R2 sampai diperoleh enam nilai resistansi yang berbeda. Amati respon sistem untuk masing-masing nilai resistansi yang berbeda dan lakukan analisis. Ukur besarnya masing-masing resistansi sehingga didapatkan nilai K_p . Catat hasilnya pada buku catatan.
6. Putar potensiometer R2 sampai motor memberikan respon transien relatif cukup baik.
7. Amati respon motor pada osiloskop. Catat hasilnya lalu lakukan analisis.
8. Ganggulah motor sehingga posisi motor berubah. Amati respon motor pada osiloskop. Catat hasilnya lalu lakukan analisis.

9. Ukur besar hambatan potensio R2 dan nilai aktual resistor R1.
10. Nilai Kp diperoleh melalui persamaan $Kp = \frac{R2}{R1}$.

Modul 4

IMPLEMENTASI SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN LabVIEW

4.1 Tujuan

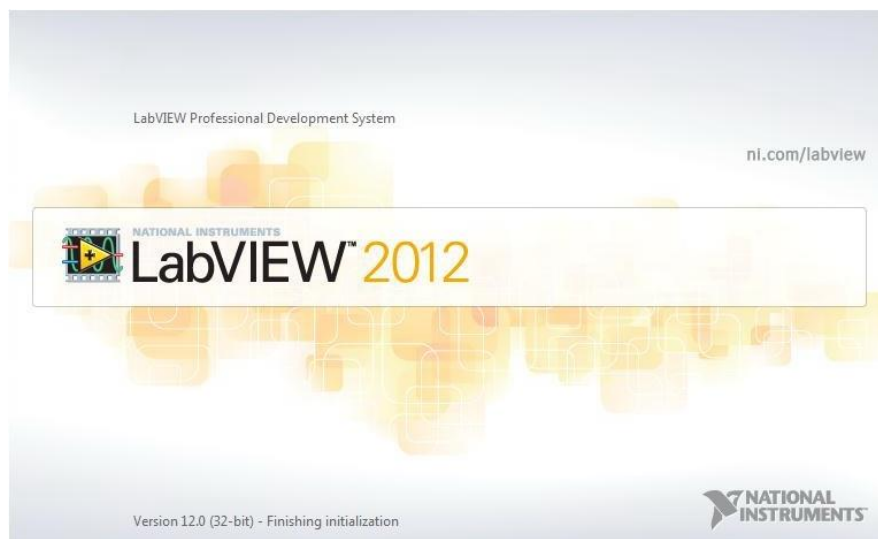
Tujuan dari percobaan ini adalah mampu melakukan pengendalian kecepatan motor DC menggunakan *software* LabVIEW. Untuk pemahaman peserta terhadap konsep dan implementasi sistem kendali dengan LabVIEW, peserta ditujuk untuk

- implementasi pengendali PI dan analisisnya pada sistem kecepatan motor DC melalui konsep *Hardware in the Loop Simulation*.
- implementasi pengendali PI digital dan analisisnya pada sistem kecepatan motor DC menggunakan *software* LabVIEW.
- implementasi pengendali PI digital jarak-jauh (dalam jaringan) dan analisisnya pada sistem kecepatan motor DC menggunakan *software* LabVIEW.

4.2 Pendahuluan

4.2.1 Software LabVIEW

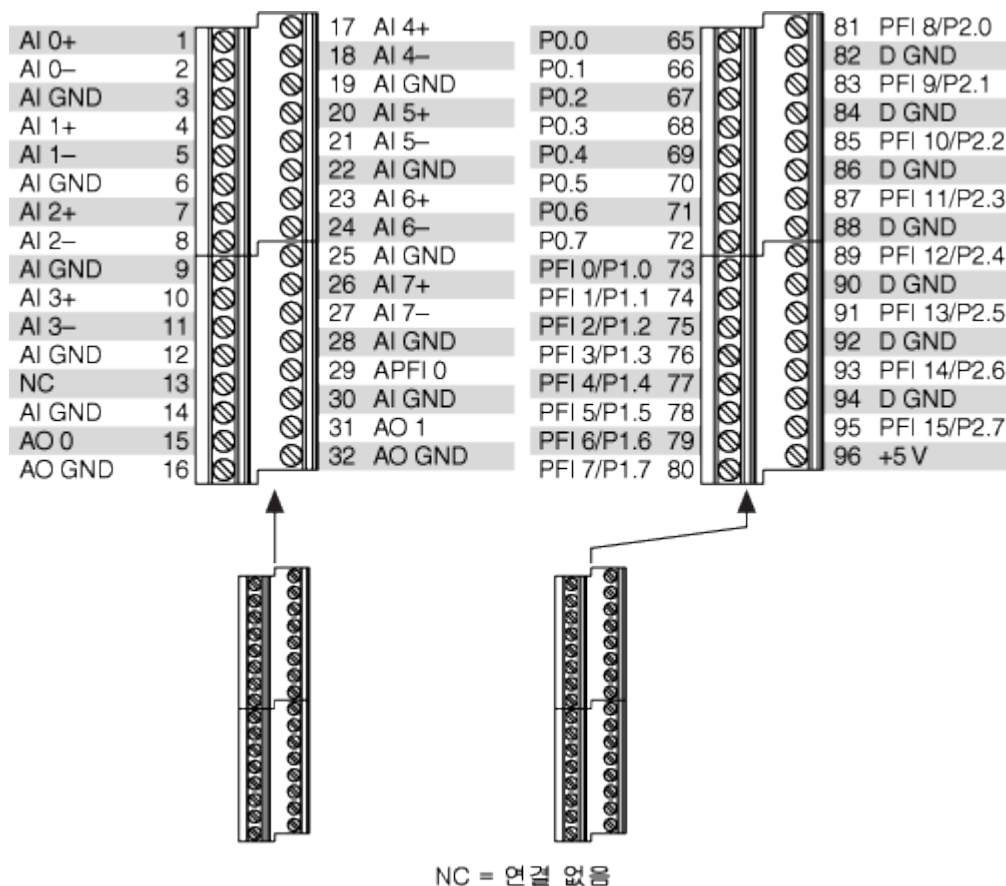
LabVIEW adalah *graphical programming platform* yang digunakan untuk melakukan simulasi sistem. LabVIEW dapat diintegrasikan dengan *hardware* dengan menggunakan perangkat keras tertentu.



Gambar 4.1 Tampilan LabVIEW pada saat *starting*

4.2.2 Hardware

NI USB-6351 adalah modul Data Acquisition (DAQ) dari National Instrument. DAQ merupakan proses pengukuran besaran fisik, dalam hal ini besaran listrik, seperti tegangan, arus, dll. Modul DAQ ini mengolah data-data besaran fisik tersebut menjadi sebuah data digital yang selanjutnya akan diproses oleh komputer dengan *software* LabVIEW. NI USB-6351 sudah dilengkapi pin input maupun output yang langsung dapat dihubungkan dengan Kit Motor DC Quanser (DCMCT). Koneksi dan diagram lokasi pin dari NI USB-6351 dapat Gambar 4.2



Gambar 4.2 Blok koneksi pada NI USB-6531

4.3 Alat dan Komponen yang Digunakan

1. DCMCT Quanser.
2. Adaptor arus bolak-balik.
3. NI USB-6351 + Adaptor.
4. Kabel RCA.
5. Kabel USB.
6. Komputer beserta *software* LabVIEW.

7. Buku catatan laboratorium.

4.4 Tugas Pra Praktikum

1. Jelaskan prinsip kerja sensor kecepatan dan posisi yang digunakan dalam sistem pengendalian motor DC.
2. Apakah sistem pengendalian lingkaran terbuka dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan dan posisi dari motor DC? Jelaskan.
3. Pada implementasi nyata, selalu terdapat ketidakidealan sedemikian sehingga hasil yang diperoleh berbeda dari hasil simulasi. Sebutkan ketidakidealan yang mungkin terjadi dan jelaskan penyebabnya.
4. Jika diketahui parameter *gain* lingkaran terbuka (K) adalah $19.9 \text{ rad}/(\text{V}\cdot\text{s})$ dan konstanta waktu (τ) 0.0929 detik, desain sebuah pengendali PI dengan kriteria *settling time* kurang dari 0.3 detik dengan *overshoot* maksimal 10% . Simulasikan pada MATLAB. Perhatian: Tugas ini wajib dilakukan karena desain akan diimplementasi pada praktikum.
5. Buatlah *flowchart* dari langkah praktikum modul ini.

4.5 Percobaan

Persiapan

1. Siapkan alat dan komponen yang digunakan di atas meja. Hubungkan adaptor AC ke *Power* sehingga DCMCT Quanser aktif. Pastikan jumper J6 terkonfigurasi untuk operasi HIL.
2. Hubungkan USB-6351 dengan komputer menggunakan kabel USB. Hubungkan juga adaptor ke USB-6351.
3. Hubungkan USB-6351 dengan DCMCT. Keluaran ke *Command* dan masukan ke *Tach*.
4. Langkah 2 dan 3 digambarkan dalam diagram sebagai berikut:

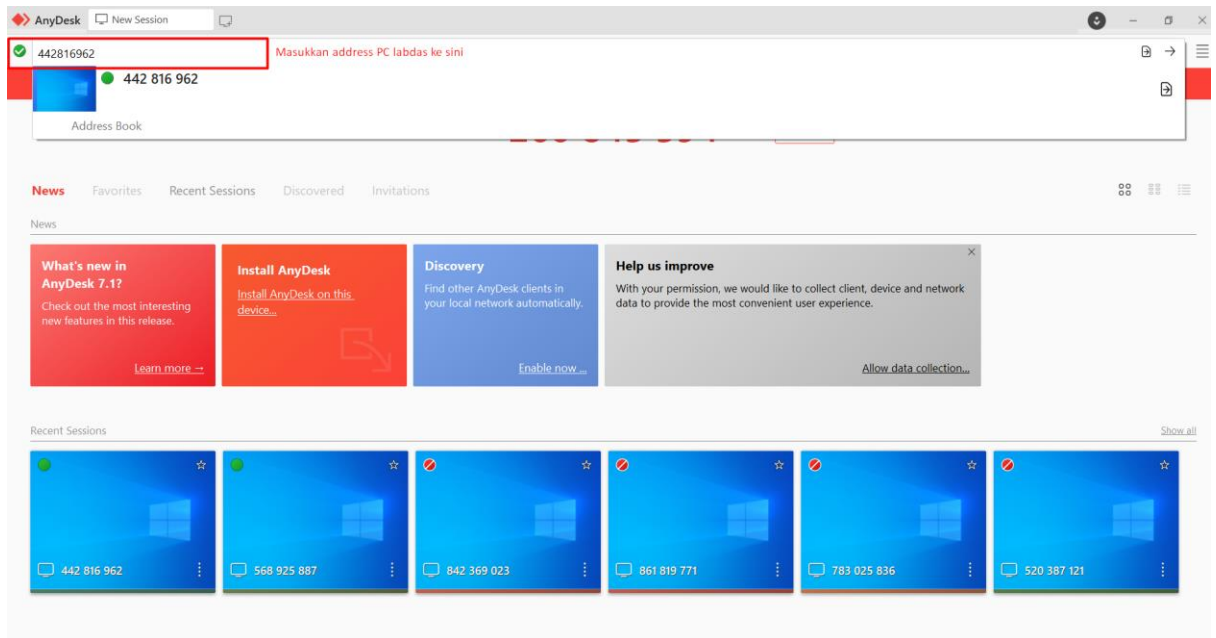


Gambar 4.4 Koneksi hardware untuk sistem pengendalian kecepatan

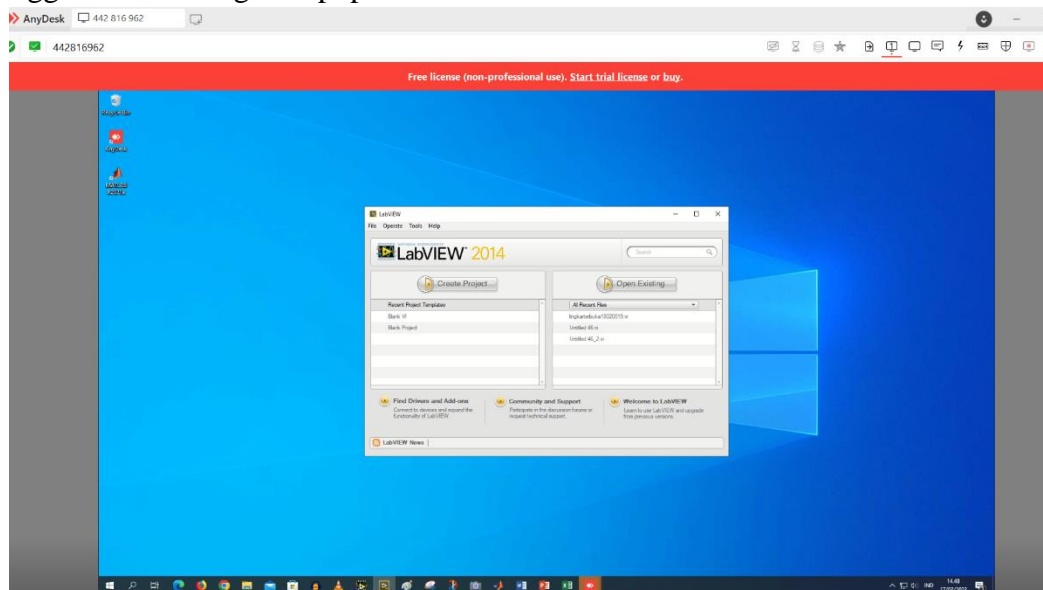
5. Pastikan semua perangkat menyala.
6. Pastikan sabuk yang menghubungkan antara motor dengan sensor potensio tidak terpasang.

Persiapan Koneksi Remote Desktop

1. Pastikan PC telah tersambung dengan koneksi internet yang memadai
2. Pada PC praktikan, buka Aplikasi *Anydesk*. Kemudian, masukkan Address PC pada Lab dasar ke *Anydesk* untuk terkoneksi dengan PC Labdas.



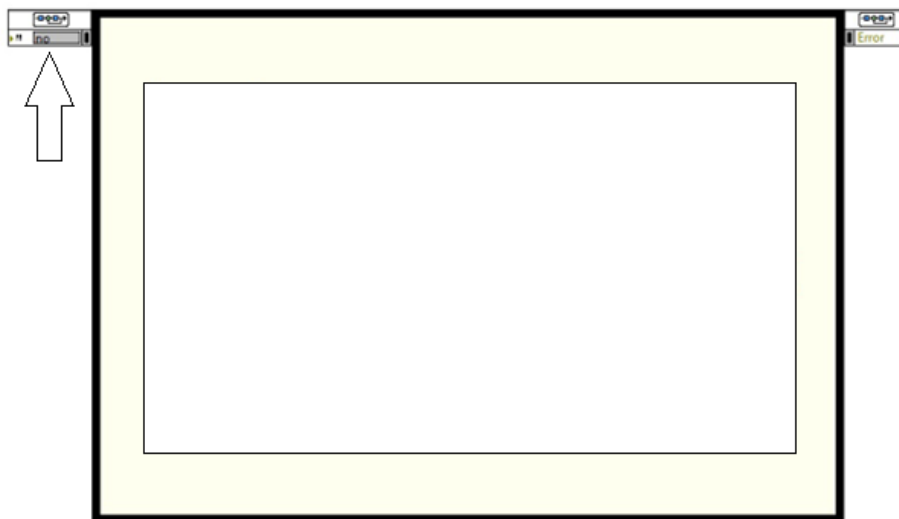
3. Tunggu asisten meng-accept praktikan dari Labdasar



4. Buka software LabVIEW, kemudian lanjutkan proses pemrograman.

4.5.1 Pengendalian Kecepatan Lingkar Terbuka

1. Pada jendela *Getting Started*, pada bagian *New*, klik *Blank VI*, lalu akan muncul jendela *Front Panel* dan *Block Diagram*.
2. Klik kanan pada *Block Diagram* lalu masuklah pada menu *Control Design & Simulation*. Pada kotak *Control Design & Simulation*, masuklah pada bagian *Simulation* lalu klik blok *Control & Simulation Loop*. Arahkan pada jendela *Block Diagram* lalu klik kiri dan buatlah kanvas tempat kita akan menyusun blok-blok sistem kendali.
3. Atur setting kanvas dengan cara *double click* bagian kiri atas kanvas. Ubah final time ke 50 s atau 100 s untuk membuat simulasi lebih lama.



Gambar 4. 5 Rangkaian Pengendali Kecepatan Lingkar Terbuka

4. Untuk membuat **blok penjumlah, selisih, pengali, atau penguatan**, klik kanan pada kanvas lalu masuklah pada menu *Control Design & Simulation*. Pada kotak *Control Design & Simulation*, masuklah pada bagian *Simulation*, lanjutkan ke blok *Signal Arithmetic*. Pilih blok yang dikehendaki lalu taruhlah blok tersebut pada kanvas. Untuk mengganti parameternya, dobel klik pada objek yang dikehendaki.
5. Untuk membuat blok **integrator atau derivatif**, klik kanan pada kanvas lalu masuklah pada menu *Control Design & Simulation*. Pada kotak *Control Design & Simulation*, masuklah pada bagian *Simulation*, lanjutkan ke blok *Continuous Linear System*, lalu klik blok *Integrator* atau *Derivative*. Taruhlah blok tersebut pada kanvas.
6. Untuk membuat blok fungsi transfer, klik kanan pada kanvas lalu masuklah pada menu *Control Design & Simulation*. Pada kotak *Control Design & Simulation*, masuklah pada bagian *Simulation*, lanjutkan ke blok *Continuous Linear System*, lalu klik blok *Transfer Function*. Taruhlah blok tersebut pada kanvas.
7. Untuk melihat sinyal menggunakan *scope*, klik kanan pada kanvas lalu masuklah pada menu *Control Design & Simulation*. Pada kotak *Control Design & Simulation*, masuklah pada bagian *Simulation*, lanjutkan ke blok *Graph Utilities* lalu klik blok

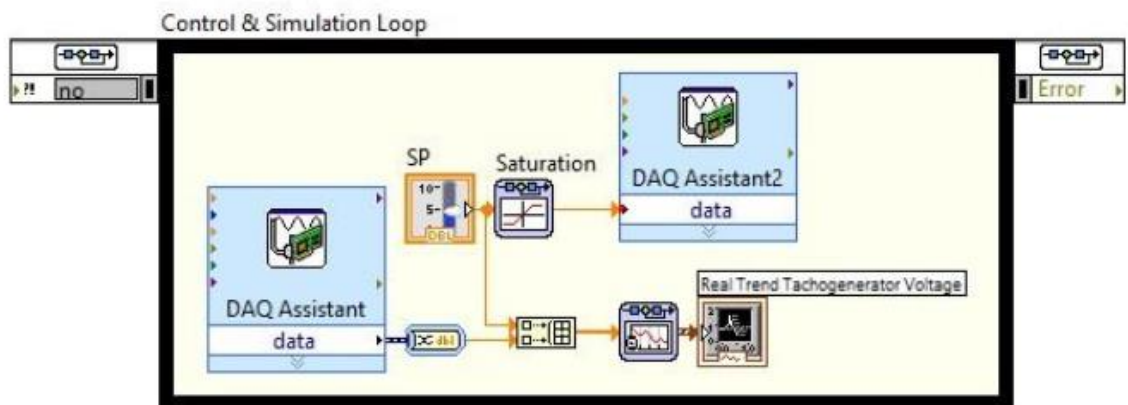
SimTime Waveform. Pilih blok yang dikehendaki lalu taruhlah blok tersebut pada kanvas. Untuk mengganti parameternya, dobel klik pada objek yang dikehendaki.

8. **Menambahkan sinyal input**

- a. Klik kanan → pilih *Express* → *Input* → *DAQ Assistant*, letakkan pada kotak kanvas maka akan muncul jendela pengaturan NI-DAQ.
- b. Pada jendela pengaturan NI-DAQ, klik *Acquire Signal* → *Analog Input* → *Voltage*.
- c. Pilih perangkat USB-6351. Pilih salah satu sinyal saja apabila sinyal yang muncul lebih dari 1, misalnya ai0.

9. **Menambahkan sinyal output**

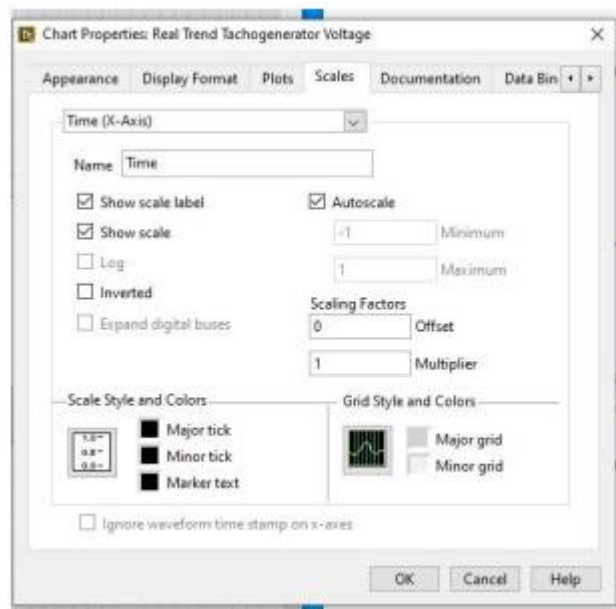
- a. Klik kanan → pilih *Express* → *Output* → *DAQ Assistant*, letakkan pada kotak kanvas maka akan muncul jendela pengaturan NI-DAQ.
 - a. Pada jendela pengaturan NI-DAQ, klik *Generate Signal* → *Analog Output* → *Voltage*.
 - b. Pilih perangkat USB-6351. Pilih salah satu sinyal saja apabila sinyal yang muncul lebih dari 1, misalnya ao0.
10. Dobel klik pada DAQ Assistant Input. Pada tab *configuration*, *Signal Input Range* diatur ± 5 V, *Terminal Configuration* dipilih RSE, *Acquisition Mode* dipilih *N Sample (HW Timed)*.
11. Dobel klik pada DAQ Assistant Output. Pada tab *configuration*, *Signal Output Range* diatur ± 10 V, *Terminal Configuration* dipilih RSE, *Acquisition Mode* dipilih *1 Sample (On Demand)*.
12. Buat rangkaian seperti pada gambar berikut ini pada block diagram LabVIEW. Rangkaian ini membutuhkan **Sinyal Input**, **Sinyal Output**, **Convert From Dynamic Data**, **Slider**, **Saturation**, **Scope**, dan **Build Array**.



13. Untuk menggunakan blok *Convert from Dynamic Data*, masuklah ke menu **Express**, lalu pilih blok **Sig Manip**, lalu klik blok **From DDT**. Pastikan sinyal yang mengalir merupakan tipe **single scalar**. Kemudian ambil blok **Build Array** yang bertujuan untuk menggabungkan data setpoint dengan tegangan tachogenerator ke dalam satu array

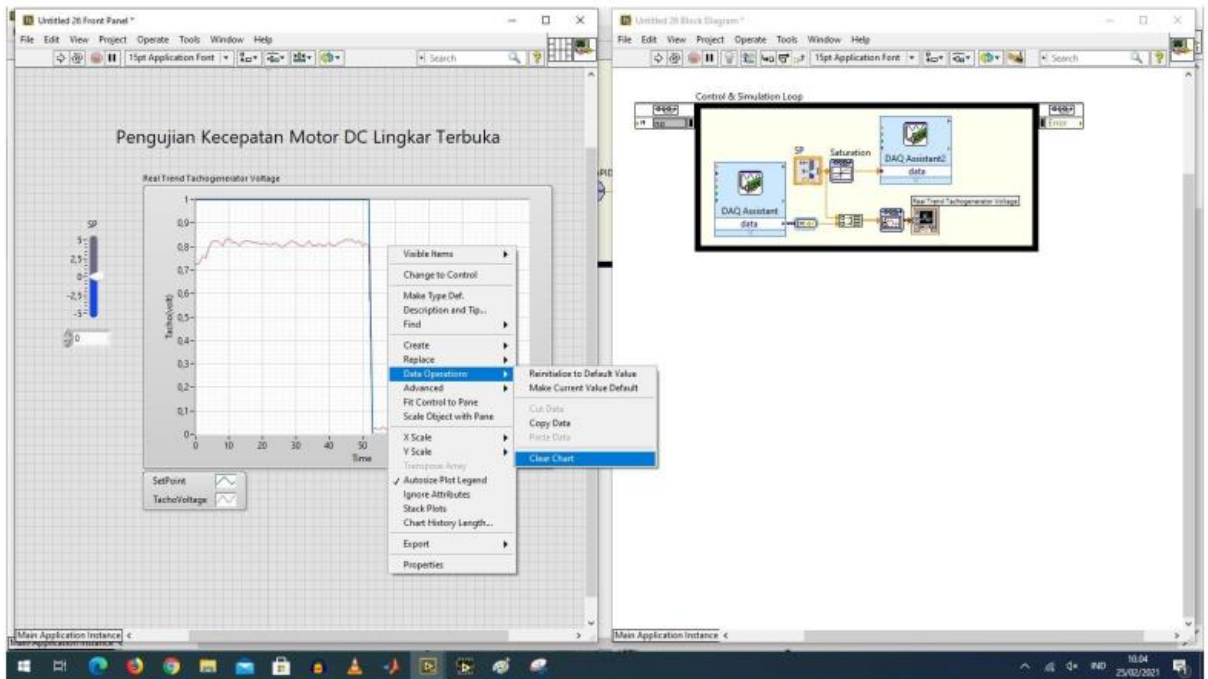
baru. Untuk mengatur berapa input yang masuk ke **Build Array** dapat dilakukan dengan melakukan *drag* pada komponennya.

14. Blok *Saturation* dapat diperoleh pada menu *Control Design & Simulation*. Pada kotak *Control Design & Simulation*, masuklah pada bagian *Simulation*, lalu klik pada bagian *Nonlinear Systems*.
15. Atur nilai saturasi ± 10 V.
16. Blok *Slide* (SP) dapat diperoleh dengan mengklik kanan pada *Front Panel* (jendela lain selain *Block Diagram*). Kemudian pilih *Numeric*, lalu pilih *Vertical Fill Slide*.
17. Klik kanan pada blok *Slide*. Pilih *Properties*. Pada tab *Scale* atur *Scale Range* sebesar ± 5 . Kemudian, pilih tab *Appearance*. Pilih *Show digital display(s)* untuk mempermudah mengganti setpoint.
18. Pada bagian *DAQ Assistant*, baik input maupun output, gantilah frekuensi *sampling* dengan tiga jenis nilai Rate.
19. Jalankan sistem. Pada Jendela *Front Panel*, atur Nilai SP yang diinginkan.
20. Untuk mempermudah praktikan dalam meninjau respon transien motor DC, maka pada Waveform Chart yang ada di Front Panel LabVIEW dapat divariasikan. Klik kanan pada Waveform Chart \rightarrow Properties \rightarrow Scales \rightarrow beri tanda check pada box Autoscale kemudian OK. Amati respon motor pada plot Simulation Time Waveform LabVIEW. Konfigurasi tampilan dari Simulation Time Waveform agar mudah diamati. Catat hasilnya lalu lakukan analisis.



21. Time pada Waveform Chart tidak langsung dapat diartikan sebagai detik (seconds), namun diambil dari frekuensi sampling dan *Samples to Read* yang telah diatur. Untuk mengartikan skala Waveform Chart menjadi detik, gunakan formula: $Waktu\ Waveform / Waktu\ Real = \sqrt{Rate / Samples\ to\ Read}$ (Formula ini merupakan pendekatan, Apabila ingin mendapat hasil yang sesuai, dapat juga dengan menggunakan stopwatch).
22. Ulangi langkah 16 sampai 18 untuk beberapa nilai tegangan keluaran potensio SP yang berbeda. Sebelum mengulangi langkah ke-16, klik kanan pada Waveform Chart

kemudian pilih Data Operation lalu pilih Clear Chart.

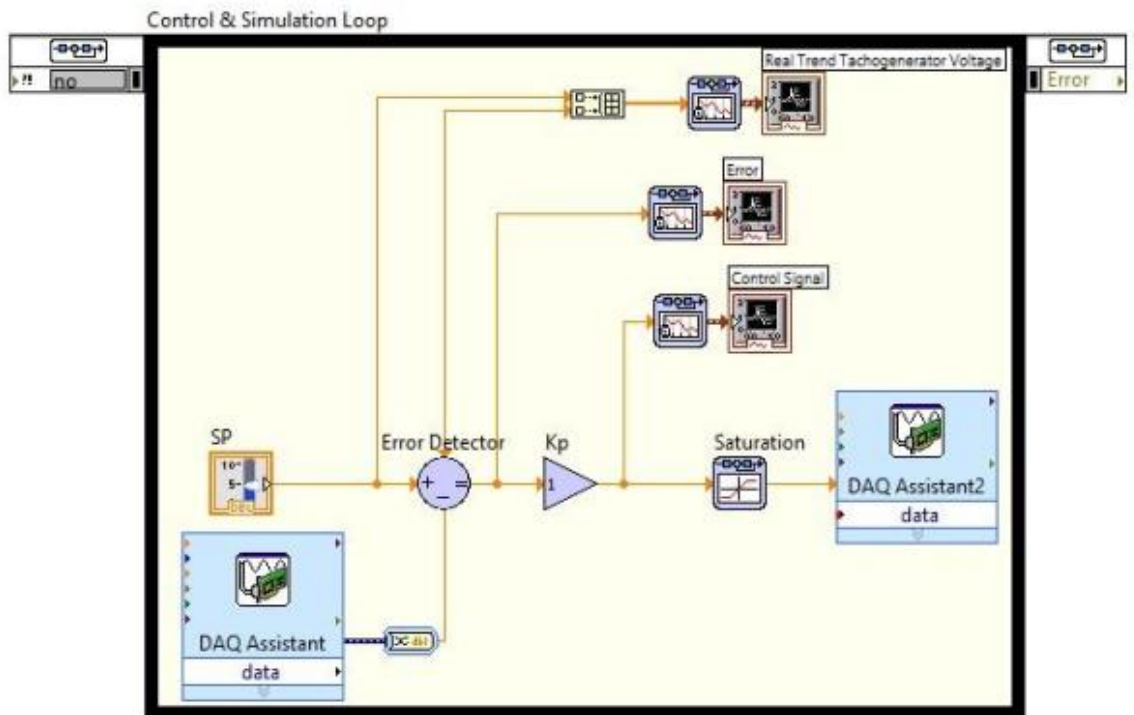


23. Simpan rangkaian ini karena akan digunakan untuk melakukan penghentian motor.

4.5.2 Pengendalian Kecepatan Lingkup Tertutup Menggunakan LabVIEW

A. Pengendali Proporsional (P)

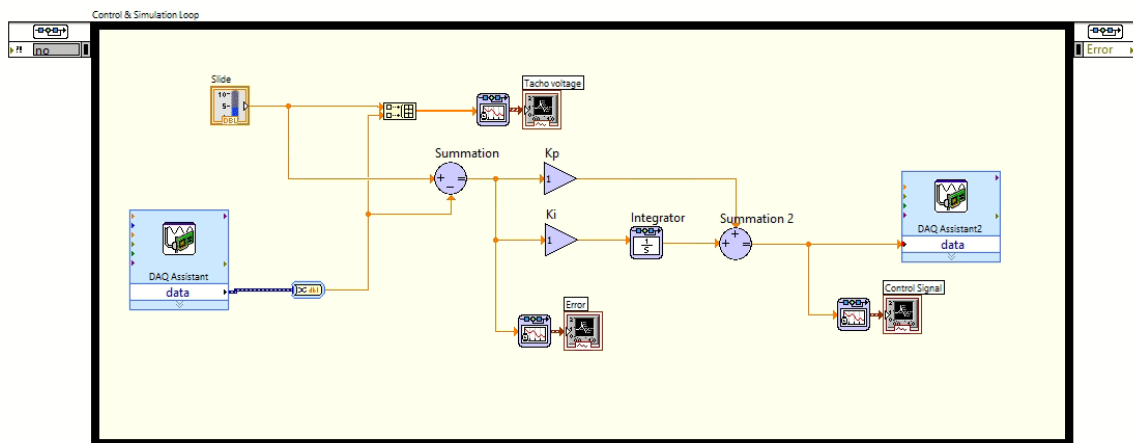
1. Susun rangkaian sesuai dengan gambar di bawah ini yang merupakan sistem kendali Proporsional (P) pada jendela *Block Diagram* LabVIEW. Dengan nilai $K_p = 0.7$. Gantilah frekuensi pada *Timing Settings* dengan 3 jenis nilai *Rate*.



2. Rangkaian ini merupakan modifikasi dari rangkaian 1 dengan menambah elemen **Scope**, blok **Penjumlah**, blok **Pengali** pada LabView.
3. Untuk menggunakan blok *Convert from Dynamic Data*, masuklah ke menu *Express*, lalu pilih blok *Sig Manip*, lalu klik blok *From DDT*. Pastikan sinyal yang mengalir merupakan tipe **single scalar** dengan mengklik blok DDT.
4. Untuk menggunakan blok *Build Array*, masuklah ke menu *Programming*, lalu pilih blok *Array*, lalu klik blok *Build Array*
5. Atur SP sehingga memberikan tegangan keluaran dengan level tertentu dan motor dapat berputar.
6. Amati respon motor pada *Simulation Time Waveform*. Catat hasilnya lalu lakukan analisis. Bandingkan hasil yang didapat dari implementasi dengan hasil simulasi.

B. Pengendali PI Kontinyu (HILS: *Hardware in the Loop Simulation*)

1. Susun rangkaian sesuai dengan **Gambar 4.8** di bawah ini yang merupakan sistem kendali PI waktu kontinyu pada jendela *Block Diagram* LabVIEW.
2. Rangkaian ini merupakan modifikasi dari rangkaian pengendali propotional dengan menambah elemen blok **Pengali** untuk **Integral** dan blok **Integrator** pada LabView.
3. Untuk menggunakan blok **Convert from Dynamic Data**, masuklah ke menu **Express**, lalu pilih blok **Sig Manip**, lalu klik blok **From DDT**. Pastikan sinyal yang mengalir merupakan tipe **single scalar** dengan mengklik blok DDT.
4. Untuk menggunakan blok **Build Array**, masuklah ke menu **Programming**, lalu pilih blok **Array**, lalu klik blok **Build Array**.

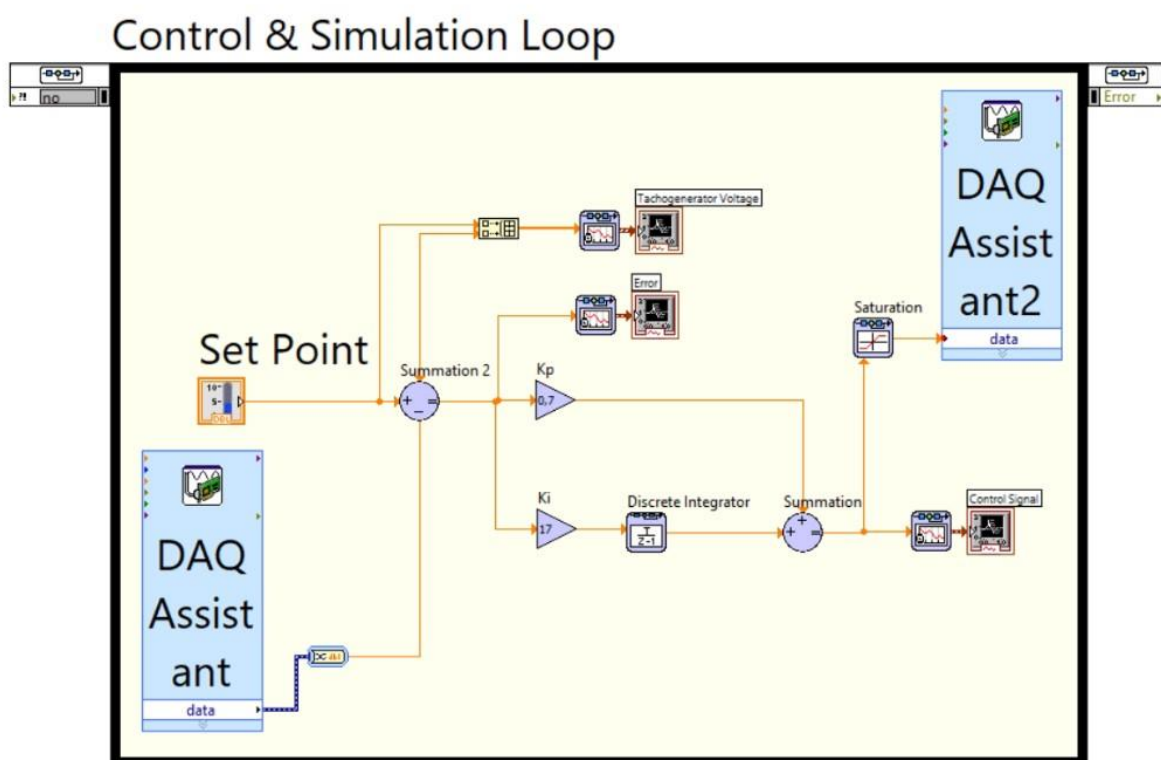


Gambar 4.8 Rangkaian Pengendali Kecepatan Lingkaran-Tertutup Waktu-Kontinyu dengan Pengendali PI (HILS)

5. Gunakan pengendali PI (proporsional integral) dengan konstanta yang diperoleh dari Tugas Pendahuluan dengan kriteria *settling time* kurang dari 0.3 detik dengan *overshoot* maksimal 10%, dan periode *sampling* 0.01 detik. Pada bagian *DAQ Assistant*, baik input maupun output, gantilah frekuensi pada **Timing Settings** dengan *Rate* bersesuaian dengan periode **Sampling**.
6. Atur SP sehingga memberikan tegangan keluaran dengan level tertentu dan motor dapat berputar.
7. Amati respon motor pada *Simulation Time Waveform*. Catat hasilnya lalu lakukan analisis. Bandingkan hasil yang didapat dari implementasi dengan hasil simulasi dan dengan percobaan bagian C (pengendali proporsional).

C. Pengendali PI Digital

1. Setelah melakukan percobaan dengan **gambar 4.8**, modifikasi rangkaian agar menjadi seperti pada **gambar 4.9** yang merupakan gambar rangkaian pengendali PI pada waktu diskrit. Dimana, pada rangkaian **gambar 4.9** kita hanya perlu mengganti block *integrator* menjadi *discrete integrator*.
2. Susunlah rangkaian sesuai dengan gambar 4.9 berikut ini ubah nilai $K_p = 0.7$ dan nilai $K_i = 17$ (dapat dilakukan tuning sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan). Serta dapatkan data dengan frekuensi pada Timing Settings dengan 3 jenis nilai Rate yang berbeda, dan berikan analisis terkait pengaruh dari nilai rate tersebut.

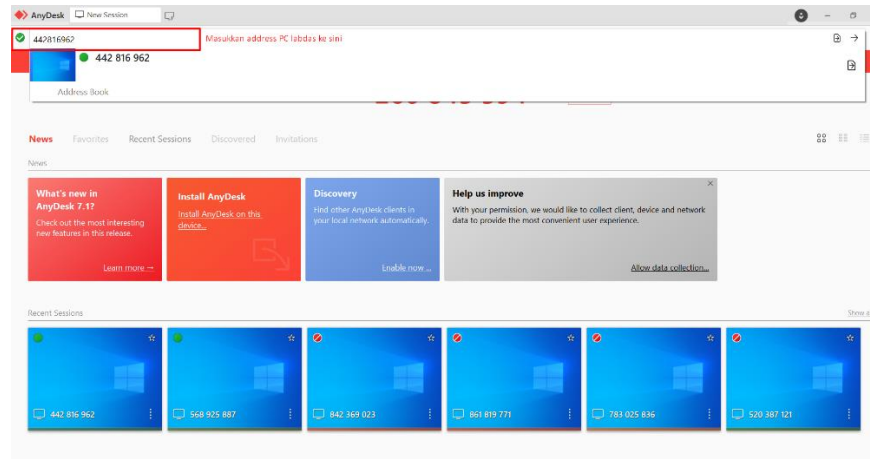


Gambar 4.9 Rangkaian Sistem Kendali Kecepatan Lingkaran-Tertutup Waktu-Diskrit dengan Pengendali PI Digital

3. Amati respon motor pada Simulation Time Waveform. Catat hasilnya lalu lakukan analisis. Bandingkan hasil yang didapat dari implementasi dengan hasil simulasi dan bandingkan dengan rangkaian PI kontinyu.
4. Dengan rangkaian pada gambar 4.9 ubah nilai rate pada DAQ Assistant dan discrete integral dengan nilai yang berbeda. (Misal pada DAQ menjadi 1k dan pada discrete integral menjadi 0.1, lakukan untuk 3 nilai lain) dan berikan analisis terkait fenomena yang terjadi.

D. Sistem Kendali Kecepatan dengan Pengendali PI Digital Jarak-Jauh (Dalam Jaringan)

1. Gunakan kembali sistem kendali kecepatan dengan Pengendali PI digital yang digunakan pada langkah sebelumnya (bagian C).
2. Susun kendali jarak-jauh sesuai dengan petunjuk berikut. Pertama, pastikan PC telah tersambung dengan koneksi internet yang memadai. Pada PC praktikan, buka Aplikasi *Anydesk*.



3. Kemudian, masukkan Address pada PC Lab dasar ke Anydesk agar PC Labdas bisa terkoneksi dengan PC praktikan. Dan ketika sudah terkoneksi, buka dan jalan kan software LabView untuk melanjutkan pemograman.
4. Amati respon motor pada Simulation Time Waveform. Catat hasilnya lalu lakukan analisis. Bandingkan hasil yang didapat dengan hasil menggunakan PI Digital tanpa melalui jaringan tentang kinerja kecepatan respon transien dan kinerja steady-state nya.

Daftar Pustaka

- [1] _____, *Matlab R2013a Product Documentation*, MathWorks, 2013.
- [2] _____, *NI USB-6351 User Guide*, National Instruments.
- [3] <http://elektronika-dasar.web.id/komponen/operasional-amplifier-op-amp-ic-lm741/>, diakses tanggal 16 Juli 2013.
- [4] <http://www.talkingelectronics.com/projects/OP-AMP/OP-AMP-2.html>, diakses tanggal 16 Juli 2013.
- [5] http://www.learningaboutelectronics.com/images/LM741_pinout_diagram.jpg, diakses tanggal 4 Juli 2013.
- [6] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering 4th Edition*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 2002.
- [7] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot Modelling and Control 1st Edition*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1989.
- [8] Norman S. Nise, *Control System Engineering 3rd Edition*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2000.
- [9] Sebastian A. Nugroho, *et al.*, *Desain Pengendali Posisi pada Quanser DC Motor Control Trainer (DCMCT) dengan Metode Linear Quadratic Gaussian (LQG)*, Tugas Besar Kendali Optimal, STEI - ITB, 2013.