

e-ISSN :

p-ISSN :

TEVA

Technology and Energy Innovation

A BOOK OF INERGCY SERIES



EDISI II • JILID B

Tahun 2023

PUBLISHED BY :
DEPARTMENT OF MARINE ELECTRICAL ENGINEERING
SHIPBUILDING INSTITUTE OF POLYTECHNIC SURABAYA

BUNGA RAMPAI
TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM
KENDALI

Edisi 2 — Jilid B (2023)

Pengarah

Anggara Trisna Nugraha

Editor

Tim Penyunting TEVA

Penyusun

Fara Kumala Sari¹ • Farhan Wahyu Nur Rahman¹ • Muhamad Khoirun Nasikhin • Muhammad Adimassyah • Muhammad Dhifa Alfitra • Email : • Muhammad Dzi Washfil Hasin • Muhammad Indrastata Ifititana Arvi • Muhammad Iqbal Al Haidar • Muhammad Nial Alanus • Muhammad Rafi Solakhudin¹ • Muhammad Rahmadani

Penerbit TEVA — Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

BUNGA RAMPAI TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM KENDALI

Edisi 2, Jilid B (Tahun 2023)

Hak cipta © 2023 pada penulis.

Diterbitkan oleh TEVA (Technology and Energy Innovation), Himpunan Mahasiswa Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Alamat: Jalan Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia.

Karya tulis dalam buku ini merupakan hasil kegiatan ilmiah INERGYC (Lomba Karya Tulis Ilmiah) yang diselenggarakan oleh TEVA.

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan Pertama, 2023.

Ukuran: 21 × 29,7 cm (A4).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya penyusunan buku bunga rampai ini. Buku ini menghimpun karya tulis ilmiah mahasiswa di bidang elektronika daya dan sistem kendali yang dikembangkan melalui kegiatan INERGYC.

Edisi 2 Jilid B tahun 2023 ini memuat 11 bab yang membahas beragam topik, mulai dari pengaturan tegangan AC, rangkaian penyearah (rectifier), hingga penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID pada motor listrik.

Kami menyampaikan terima kasih kepada Bapak Anggara Trisna Nugraha selaku pengarah, para penyunting, serta seluruh penulis yang telah berkontribusi. Semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa dan praktisi di bidang teknik kelistrikan.

Surabaya, 2023

Tim Penyusun

PRAKATA

Perkembangan teknologi elektronika daya dan sistem kendali menuntut pemahaman yang kuat terhadap konsep dasar sekaligus kemampuannya pada permasalahan nyata. Bunga rampai ini disusun sebagai wadah bagi mahasiswa untuk menuangkan gagasan dan hasil kajian mereka.

Setiap bab ditulis oleh penulis yang berbeda dengan gaya dan pendekatan masing-masing, namun tetap berada dalam payung tema besar elektronika daya dan kendali sistem. Pembaca dapat menelusuri setiap bab secara mandiri sesuai kebutuhan.

Kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan demi penyempurnaan edisi-edisi berikutnya.

DAFTAR ISI

Kata Pengantar.....	4
Prakata	5
Daftar Isi	6
Daftar Gambar	7
Daftar Tabel.....	12
Daftar Singkatan	13
BAB I Optimalisasi Motor DC JGA25-370 Memanfaatkan Pendekatan LQR (linear Quadratic Regulator) dan LQT (linear Quadratic Tracking) pada MATLAB SIMULINK	14
BAB II Kajian Simulasi LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) dengan Plant Motor DC FAPG36-BL3650.....	25
BAB III Implementasi Pendekatan LQR dan LQT pada Optimalisasi Motor DC BSG - 23	37
BAB IV Kajian Simulasi LQR & LQT (Linear Quadratic Regulator & Linear Quadratic Tracking) dengan Plant Motor DC M644E	45
BAB V Optimalisasi Motor DC dengan Metode LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking)	55
BAB VI Identifikasi Motor DC 37GB500-72-2463 dengan Metode Linear Quadratic Regulator dan Linear Quadratic Tracking.....	66
BAB VII Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) pada Motor DC M66 Series	77
BAB VIII Respons Output dengan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 834-7641	88
BAB IX Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) pada Motor DC M66CE-12.....	100
BAB X Optimalisasi Sistem Sirkuit LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 834-7641 dengan dan Tanpa Noise	109
BAB XI Optimalisasi Sistem Sirkuit Keluaran dengan Pendekatan LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 454-0883	122
Glosarium.....	133
Indeks	134
Biografi Penulis	136

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Motor DC JGA25-370.....	17
Gambar 1.2	Datasheet Motor DC JGA25-370.....	17
Gambar 1.3	Software MATLAB	19
Gambar 1.4.....		21
Gambar 1.5.....		21
Gambar 1.6.....		21
Gambar 1.7.....		21
Gambar 1.8.....		21
Gambar 1.9	Hasil Simulasi LQR tanpa noise.....	22
Gambar 1.10	Hasil simulasi LQR menggunakan noise.....	22
Gambar 1.11	Hasil simulasi LQT tanpa noise.....	22
Gambar 1.12	Hasil Simulasi LQT menggunakan noise.....	23
Gambar 2.1.....		28
Gambar 2.2	Konstruksi Motor DC.....	29
Gambar 2.3	2Tampilan MATLAB.....	29
Gambar 2.4	Tampilan Simulink MATLAB	29
Gambar 2.5.....		30
Gambar 2.6.....		31
Gambar 2.7.....		32
Gambar 2.8.....		33
Gambar 2.9.....		33
Gambar 2.10.....		33
Gambar 2.11.....		33
Gambar 2.12.....		33
Gambar 2.13.....		33
Gambar 2.14	Tampilan Step Response.....	33
Gambar 2.15.....		33
Gambar 2.16	Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	34
Gambar 2.17.....		34
Gambar 2.18.....		34
Gambar 3.1.....		39
Gambar 3.2.....		39
Gambar 3.3.....		39
Gambar 3.4.....		39
Gambar 3.5.....		40
Gambar 3.6.....		40
Gambar 3.7.....		40

Gambar 3.8 Tampilan Step Response.....	41
Gambar 3.9.....	41
Gambar 3.10 Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	42
Gambar 3.11.....	42
Gambar 3.12 Tampilan Step Response LQT dengan Noise.....	42
Gambar 4.1 Konstruksi Motor DC.....	48
Gambar 4.2 Tampilan MATLAB.....	48
Gambar 4.3 Tampilan Simulink MATLAB.....	48
Gambar 4.4 Datasheet Motor DC tipe M644E.....	48
Gambar 4.5 Rangkaian Orde 1 & 2 M644E.....	49
Gambar 4.6 Rangkaian LQR.....	49
Gambar 4.7 Rangkaian LQR tanpa noise.....	49
Gambar 4.8 Rangkaian LQR tanpa noise.....	50
Gambar 4.9 Rangkaian LQT.....	50
Gambar 4.10 Rangkaian LQT tanpa noise.....	50
Gambar 4.11 Rangkaian LQT dengan noise.....	50
Gambar 4.12 Simulasi Motor DC M644E orde 1 & 2.....	51
Gambar 4.13 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise.....	51
Gambar 4.14 Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	52
Gambar 4.15 Tampilan Step Response LQT tanpa Noise.....	52
Gambar 4.16 Tampilan Step Response LQT dengan Noise.....	52
Gambar 5.1.....	57
Gambar 5.2 Konstruksi Motor DC.....	58
Gambar 5.3 2Tampilan MATLAB.....	58
Gambar 5.4 Tampilan Simulink MATLAB.....	59
Gambar 5.5 Datasheet Maxon DC Motor RE40 seri 148877.....	59
Gambar 5.6.....	60
Gambar 5.7.....	61
Gambar 5.8.....	61
Gambar 5.9.....	61
Gambar 5.10.....	61
Gambar 5.11.....	61
Gambar 5.12.....	62
Gambar 5.13.....	62
Gambar 5.14.....	62
Gambar 5.15 Tampilan Step Response.....	62
Gambar 5.16 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise.....	62
Gambar 5.17 Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	62
Gambar 5.18.....	62

Gambar 5.19 Hasil Simulasi LQT dengan Noise dan Tanpa Noise	63
Gambar 6.1 Pemodelan Linear Quadratic Regulator.....	69
Gambar 6.2 Pemodelan Linear Quadratic Regulator.....	70
Gambar 6.3 LQR Pemodelan Orde 1 Motor DC	70
Gambar 6.4 LQR Pemodelan Orde 2 Motor DC	70
Gambar 6.5 LQR Pemodelan Orde 2 Motor DC dengan Noise.....	71
Gambar 6.6 LQR Pemodelan Orde 2 Motor DC dengan Noise.....	71
Gambar 6.7 Spesifikasi Motor DC 37GB500-72-2463	71
Gambar 6.8 Hasil Running dari Script Matlab LQR.....	73
Gambar 6.9 Hasil Running dari Script Matlab LQT	73
Gambar 7.1 Kontruksi Motor DC	79
Gambar 7.2 Tampilan MATLAB.....	80
Gambar 7.3 Tampilan Simulink MATLAB	80
Gambar 7.4 Spesifikasi Motor DC M66 Series	80
Gambar 7.5.....	83
Gambar 7.6.....	83
Gambar 7.7.....	83
Gambar 7.8.....	83
Gambar 7.9.....	83
Gambar 7.10.....	83
Gambar 7.11.....	83
Gambar 7.12 Tampilan Step Response.....	79
Gambar 7.13 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise	84
Gambar 7.14 Tampilan Step Response LQR dengan Noise.....	84
Gambar 7.15 Tampilan Step Response LQT tanpa Noise	85
Gambar 7.16 Tampilan Step Response LQT dengan Noise.....	85
Gambar 8.1.....	90
Gambar 8.2 Motor DC RS PRO 834-7641	91
Gambar 8.3 Motor DC RS PRO 834-7641 datasheet.....	91
Gambar 8.4.....	91
Gambar 8.5.....	95
Gambar 8.6.....	95
Gambar 8.7.....	95
Gambar 8.8.....	95
Gambar 8.9 Rangkaian LQR	96
Gambar 8.10 Rangkaian LQR Subsystem LQR tanpa Noise	96
Gambar 8.11 Rangkaian LQR Subsystem LQR dengan Noise	96
Gambar 8.12.....	96
Gambar 8.13.....	96

Gambar 8.14 Hasil Respon Motor DC 37-GB500 dengan Metode LQR	96
Gambar 8.15	97
Gambar 8.16	97
Gambar 8.17	97
Gambar 8.18	97
Gambar 8.19	90
Gambar 9.1 Tampilan MATLAB	102
Gambar 9.2 Tampilan Simulink MATLAB	102
Gambar 9.3	105
Gambar 9.4	105
Gambar 9.5	105
Gambar 9.6	105
Gambar 9.7	105
Gambar 9.8	106
Gambar 9.9	106
Gambar 9.10	106
Gambar 9.11	106
Gambar 9.12	106
Gambar 9.13 Tampilan Step Response LQR	106
Gambar 9.14 Hasil Simulink Motor DC M66CE-12 LQR tanpa noise	106
Gambar 9.15 Tampilan Step Response Orde 1 dengan noise	106
Gambar 9.16 Tampilan Step Response Orde 2 dengan noise	107
Gambar 9.17 Tampilan Step Response Orde 1	107
Gambar 10.1 Bagian Motor DC	110
Gambar 10.2 Sistem Kendali Loop Tertutup [8].	111
Gambar 10.3 Flowchart Penelitian	112
Gambar 10.4	113
Gambar 10.5 Motor DC RS PRO 834-7641	113
Gambar 10.6 Spesifikasi Motor DC RS PRO 834-7641	113
Gambar 10.7 Diagram Blok LQR	114
Gambar 10.8 Diagram Blok LQT	116
Gambar 10.9	116
Gambar 10.10 Diagram Blok Orde Satu Motor DC	116
Gambar 10.11 Diagram Blok LQR Motor DC RS PRO 834-7641	110
Gambar 10.12 Diagram Blok LQR Motor DC RS PRO 834-7641 dengan noise	116
Gambar 10.13 Diagram Blok LQT Motor DC RS PRO 834-7641	117
Gambar 10.14 Rangkaian LQT Motor RS PRO 834-7641 dengan Noise	117
Gambar 10.15 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 pada Permodelan Matematis Orde Satu	117

Gambar 10.16 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR	117
Gambar 10.17 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR dan Tidak	118
Gambar 10.18 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise	118
Gambar 10.19 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT.....	119
Gambar 10.20 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT dan Tidak Menggunakan Metode	119
Gambar 10.21 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT saat Diberikan Noise	119
Gambar 11.1 Diagram Blok Sistem.....	124
Gambar 11.2 Datasheet Motor DC RS PRO 454-0883	124
Gambar 11.3 Diagram Blok Linear Quadratic Regulation (LQR).....	125
Gambar 11.4 Rangkaian Orde Satu Motor DC.....	128
Gambar 11.5 Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 454-0883	128
Gambar 11.6 Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Noise.....	128
Gambar 11.7 Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 454-0883	128
Gambar 11.8 Rangkaian LQT Motor RS PRO 454-0883 dengan Noise	129
Gambar 11.9 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 Orde Satu	129
Gambar 11.10 Hasil Respon Motor DC 37-GB500 dengan Metode LQR	129
Gambar 11.11 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQR dan Tidak Menggunakan Metode	130
Gambar 11.12 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQR saat Diberikan Noise	124
Gambar 11.13 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT.....	130
Gambar 11.14 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT dan Tidak Menggunakan Metode	130
Gambar 11.15 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT saat Diberikan Noise	131

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	19
Tabel 1.2 Daftar komponen yang akan digunakan.....	21
Tabel 2.1	32
Tabel 3.1	42
Tabel 4.1 Metode Penyelesaian Masalah Motor DC.....	47
Tabel 4.2	49
Tabel 5.1	61
Tabel 6.1 Hasil Simulasi LQR dan LQT.....	74
Tabel 6.2 Hasil Simulasi SIMO dan SIMO Noise	74
Tabel 7.1	83
Tabel 7.2 Data Simulasi Sistem LQR.....	84
Tabel 7.3 Data Simulasi Sistem LQT	85
Tabel 8.1 Simulink Tools.....	93
Tabel 9.1 Permodelan motor dc	102
Tabel 9.2 Daftar Komponen yang Dibutuhkan.....	105
Tabel 9.3 Daftar Komponen yang Dibutuhkan.....	105

DAFTAR SINGKATAN

AC	Alternating Current (arus bolak-balik)
DC	Direct Current (arus searah)
LQR	Linear Quadratic Regulator
LQT	Linear Quadratic Tracking
PID	Proportional Integral Derivative
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distortion
SCR	Silicon Controlled Rectifier
RMS	Root Mean Square
RPM	Rotation Per Minute
SISO	Single Input Single Output
PSIM	Power Simulation (perangkat lunak simulasi elektronika daya)
MATLAB	Matrix Laboratory
PPNS	Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
TEVA	Technology and Energy Innovation
INERGYC	Kompetisi Karya Tulis Ilmiah yang diselenggarakan TEVA
LKTI	Lomba Karya Tulis Ilmiah

BAB I

Optimalisasi Motor DC JGA25-370 Memanfaatkan Pendekatan LQR (linear Quadratic Regulator) dan LQT (linear Quadratic Tracking) pada MATLAB SIMULINK

Oleh: **Fara Kumala Sari1**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *MATLAB, Simulink, Motor DC, LQR, LQT, Sistem*

Introducing the problem of LQT (Linear Quadratic Tracking) and LQR (Linear Quadratic Regulator) quadratic tracking which aims to design a closed and open loop control scheme so that the system output signal is optimized in tracking the given reference signal and rejecting the interference to be given. The performance index obtained will be different once it is used to resolve tracking issues. The LQT and LQR problem becomes a standard linear square regulation problem that has control performance compared to PID (Pelvic Inflammatory Disease) proportional integral derivative i.e. to apply the control law of LQT and LQR over a wide operational range to track target pressure and controllers designed by interpolating between controllers covering the entire operational range so that there is a tool called Simulink. In Simulink, researchers can assemble a series of SISO, SIMO, MISO, and MIMO after which the researcher can also see the results in the form of graphs. This practicum aims to prove the theory of calculations and datasheets of the JGA25-370 DC motor with simulation results from MATLAB Simulink. LQR is the optimal input that generates initial state feedback, thus, it can be represented as constant feedback gain on the state of the LQR system.

Abstrak

Memperkenalkan masalah pelacakan kuadrat LQT (*Linear Quadratic Tracking*) dan LQR (*Linear Quadratic Regulator*) yang bertujuan untuk merancang skema kontrol loop tertutup dan terbuka sehingga sinyal keluaran sistem secara optimasi dalam melacak sinyal referensi yang diberikan dan menolak gangguan yang akan diberikan. Indeks kinerja yang didapat akan berbeda setelah digunakan untuk mengatasi masalah pelacakan. Masalah LQT dan LQR menjadi masalah regulasi kuadrat linier standar yang memiliki kinerja kontrol dibandingkan dengan PID (*Pelvic Inflammatory Disease*) proporsional integral turunan yaitu untuk menerapkan hukum kontrol LQT dan LQR pada rentang operasional yang luas untuk melacak tekanan target dan pengontrol yang dirancang dengan cara diinterpolasi antara

pengontrol mencakup seluruh rentang operasional sehingga terdapat sebuah alat bantu yang bernama *Simulink*. Pada *Simulink* peneliti dapat merangkai rangkaian dari SISO, SIMO, MISO, dan MIMO setelah itu peneliti juga dapat melihat hasilnya berupa grafik. Praktikum ini bertujuan untuk pembuktian antara teori perhitungan dan *datasheet* dari motor DC JGA25-370 dengan hasil simulasi dari MATLAB *Simulink*. LQR ialah *input* optimal yang menghasilkan berupa umpan balik keadaan awal, dengan demikian, hal itu dapat direpresentasikan sebagai perolehan umpan balik yang konstan pada keadaan sistem LQR.

PENDAHULUAN

Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Dalam motor dc terdapat dua kumparan yaitu kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkaryang berfungsi sebagai tempat terbentuknya gaya gerak listrik (ggl E). Jika arus dalam kumparan jangkar berinteraksi dengan medan magnet, akan timbul torsi (T) yang akan memutar motor. Pada mata kuliah optimasi sistem ini membahas penerapan metode LQR dan LQT menggunakan kontroler, aktuator, dan plant motor DC yang telah disertai oleh *datasheet*. Motor DC (*direct current*) merupakan perangkat yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

Motor DC juga merupakan suatu alat atau komponen yang biasa digunakan dalam percobaan rangkaian listrik. Selain itu motor DC juga sering dijumpai pada *industry* atau tempat – tempat yang memang objek utamanya itu menggunakan motor DC. Untuk kelebihan motor DC itu sendiri ialah motor DC dapat mencapai kecepatan tertentu dengan stabil dan motor DC juga memiliki suara ketika berputar atau bergerak yang tergolong halus atau tidak bising. Prinsip kerja motor DC adalah berusaha agar arah medan magnet rotor selalu berlawanan dengan arah medan magnet stator. Ini didasarkan pada sifat kemagnetan, Ketika magnet yang saling berhadapan didekatkan maka mereka akan menarik satu sama lain dan Ketika magnet yang menghadap ke arah yang berlawanan didekatkan maka mereka akan saling tolak menolak. Selain itu ada juga kelebihan motor DC yakni mudahnya dalam hal pengendalian kecepatan putarannya namun harus tetap dilakukan perawatan atau *maintenance* pada bagian – bagian motor yang rawan akan kerusakan. LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dirumuskan pada lingkup masalah optimisasi untuk menentukan urutan input (kontrol) ke sistem linier untuk meminimalkan bilangan kuadrat (integral) yang menghasilkan bilangan berlebihan sampai bilangan tak terbatas. Dari sudut pandang teoritis, sifat dasar dari LQR ialah *input* optimal yang menghasilkan berupa umpan balik

keadaan awal, dengan demikian, hal itu dapat direpresentasikan sebagai perolehan umpan balik yang konstan pada keadaan sistem LQR .

LQT (*Linear Quadratic Tracking*) digunakan sebagai metode lain selain LQR. LQT sendiri merupakan sistem pengaturan linear yang keluarannya mengikuti (*tracking*) jalur yang telah diterapkan melalui masukan (*input*) . Dalam paper ini objek yang digunakan untuk mengimplementasikan metode tersebut ialah motor DC. Metode LQT penting untuk dipadukan sebagai metode optimalisasi sistem untuk mengetahui titik optimal dan mengetahui keadaan pada suatu alat atau objek yang digunakan.

Pada mata kuliah (Optimasi Sistem) ini membahas penerapan dari kedua metode tersebut yakni LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*) dengan *plant* motor DC. Motor DC memiliki *datasheet* yang berguna pada saat membuat *script* MATLAB sebelum selanjutnya menggunakan *Simulink*. Motor DC yang digunakan pada paper ini bertipe motor DC JGA25-370 yang dilengkapi dengan parameter untuk pengaplikasian pada metode LQR dan LQT.

Penggunaan motor DC dewasa ini sudah sangatlah umum, salah satu kelebihan motor DC adalah relatif gampang didapat dan mudah diatur kecepatannya. Secara umum pengaturan kecepatan motor DC adalah dengan menggunakan cara analog. Pada laporan kali ini akan dibahas cara mengatur kecepatan motor DC dengan menggunakan mikrokontroler.

Mikrokontroler yang digunakan adalah Tipe AVR dari Atmel seperti mikrokontroler Atmega 8535, 16, 32. Informasi kecepatan motor akan ditampilkan pada modul LCD HD4480. Sedangkan sebagai driver motor menggunakan modul driver motor IC L298 ,IC L293D. Cara pengaturan kecepatan yang digunakan adalah dengan menggunakan teknik PWM (Pulse Width Modulation), salah satu teknik untuk mengatur kecepatan motor DC yang umum digunakan.

Dengan menggunakan PWM kita dapat mengatur kecepatan yang diinginkan dengan mudah. Teknik PWM untuk pengaturan kecepatan motor adalah, pengaturan kecepatan motor dengan cara merubah-ubah besarnya duty cycle pulsa. Pulsa yang berubah ubah duty cycle-nya inilah yang menentukan kecepatan motor. Besarnya amplitudo dan frekuensi pulsa adalah

tetap, sedangkan besarnya duty cycle berubah-ubah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan, semakin besar duty cycle maka semakin cepat pula kecepatan motor, dan sebaliknya semakin kecil duty cycle maka semakin pelan pula kecepatan motor

Penggunaan motor DC dewasa ini sudah sangatlah umum, salah satu kelebihan motor DC adalah relatif gampang didapat dan mudah diatur kecepatan putarnya. Secara umum pengaturan kecepatan motor DC adalah dengan menggunakan cara analog. Pada laporan kali ini akan dibahas cara mengatur kecepatan motor DC dengan menggunakan mikrokontroler.

Mikrokontroler yang digunakan adalah Tipe AVR dari Atmel seperti mikrokontroler Atmega 8535, 16, 32. Informasi kecepatan motor akan ditampilkan pada modul LCD HD4480. Sedangkan sebagai driver motor menggunakan modul driver motor IC L298 ,IC L293D. Cara pengaturan kecepatan yang digunakan adalah dengan menggunakan teknik PWM (Pulse Width Modulation), salah satu teknik untuk mengatur kecepatan motor DC yang umum digunakan.

Dengan menggunakan PWM kita dapat mengatur kecepatan yang diinginkan dengan mudah. Teknik PWM untuk pengaturan kecepatan motor adalah, pengaturan kecepatan motor dengan cara merubah-ubah besarnya duty cycle pulsa. Pulsa yang berubah ubah duty cycle-nya inilah yang menentukan kecepatan motor. Besarnya amplitudo dan frekuensi pulsa adalah tetap, sedangkan besarnya duty cycle berubah-ubah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan, semakin besar duty cycle maka semakin cepat pula kecepatan motor, dan sebaliknya semakin kecil duty cycle maka semakin pelan pula kecepatan motor

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian



Gambar 1.1 Motor DC JGA25-370

sumber gambar: NAYLAMP Mechatronics

Sebelum melakukan penelitian lebih jauh yang harus dipersiapkan pada tahapan yang pertama kali ini ialah menentukan motor DC yang akan digunakan sebagai objek penelitian kali ini. Pada penelitian kali ini peneliti menggunakan motor dengan tipe motor DC JGA25-370.

Setelah mendapatkan tipe atau jenis motor DC untuk digunakan sebagai objek pada penelitian kali ini, peneliti dapat mengetahui *datasheet* atau spesifikasi dari motor DC tersebut. Untuk *datasheet* dari motor Dc JGA25-370 sebagai berikut :

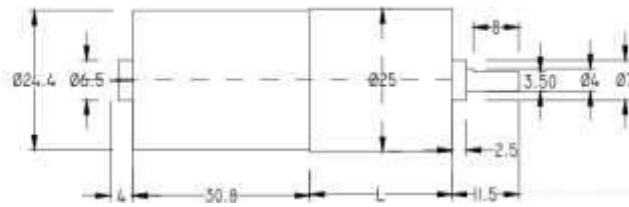
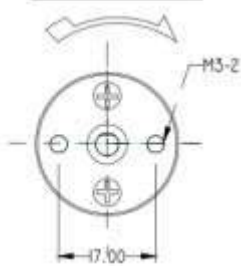
Operating Voltage: 3V-24V
 Reduction ratio: 4.4, 9.28, 21.3, 34, 45, 78, 103, 171, 226, 378, 500.

Widely Application: household appliances, office equipment, electronic toys, electric tool etc.



Model	Voltage		No-load		At Max. Efficiency				Stall		Reduction Ratio
	Using	The	Speed	Current	Speed	Current	Torque	Power	Torque	Current	
			r/min	ma	r/min	ma	kg.cm	W	KG.cm	A	
JGA25-370	3-24V	6V	47	130	34	680	4.8	2	15	2.02	103
JGA25-370	3-24V	12V	248	30	120	400	1.6	4	6	0.8	35
JGA25-370	3-24V	24V	733	100	500	900	1	1	8	2.13	4.4

DIRECTION OF ROTATION



Gambar 1.2 Datasheet Motor DC JGA25-370

sumber gambar: CSDN

Tahapan kedua adalah melakukan perhitungan secara matematis dengan pedoman atau sumber spesifikasi motor DC JGA25-370 sebagai objek pada penelitian kali ini. Pada perhitungan matematis ini menggunakan dua metode yakni metode orde 1 dan orde 2.

Orde 1

Untuk metode orde 1 ini diharapkan peneliti menemukan persamaan *transfer function* orde 1 dari motor DC JGA25-370. Berdasarkan persamaan (1) berikut ini, dapat diketahui rumus atau bentuk dari orde 1:

$$G_s = K\tau s + K \tag{1}$$

.....Persamaan(1)

Dimana :

= Konstanta

= Torsi

Untuk konstanta sendiri dapat dicari melalui rumus sebagai berikut :

$$K = \tau I \tag{2}$$

.....Persamaan(2)

Dimana :

= Konstanta

= Torsi

I = Arus

Untuk mendapatkan nilai variabel mulai dari arus dan torsi peneliti dapat melihat *datasheet* yang sudah ditentukan dalam penelitian kali ini. Pada gambar 2.2 di atas dapat diketahui bahwa arus pada motor DC 054B-2 ini sebesar 1,7A dan untuk torsi sendiri sebesar 0,052 Nm. Setelah mendapatkan nilai dari arus dan torsi, peneliti dapat mensubstitusikan kedalam persamaan(2).

Setelah mensubstitusikan ke persamaan(2), maka akan mendapatkan nilai dari K (konstanta). Setelah itu peneliti dapat mensubstitusikan ke persamaan(1) untuk mendapatkan nilai dari orde 1.

Orde 2

Untuk metode selanjutnya ini diharapkan peneliti dapat menemukan persamaan dari orde 2. Dan berdasarkan persamaan(3) dapat diketahui bentuk atau rumus dari orde 2, sebagai berikut :

$$\omega n s^2 + 2\zeta \omega n s + \omega n^2 \quad (3)$$

$G(s) = \dots\dots\dots$ Persamaan(3)

Dari persamaan (3) terdapat ζ yang merupakan symbol dari rasio redaman dan merupakan simbol dari kecepatan sudut. Untuk rasio redaman nilainya dapat dilihat dalam *datasheet* sedangkan untuk kecepatan sudut sendiri dalam *datasheet* tidak diketahui dengan kata lain peneliti diharuskan mencari nilai dari kecepatan sudut tersebut dengan persamaan sebagai berikut :

$$\omega n = 2 \pi x f \quad (4)$$

$\dots\dots\dots$ Persamaan(4)

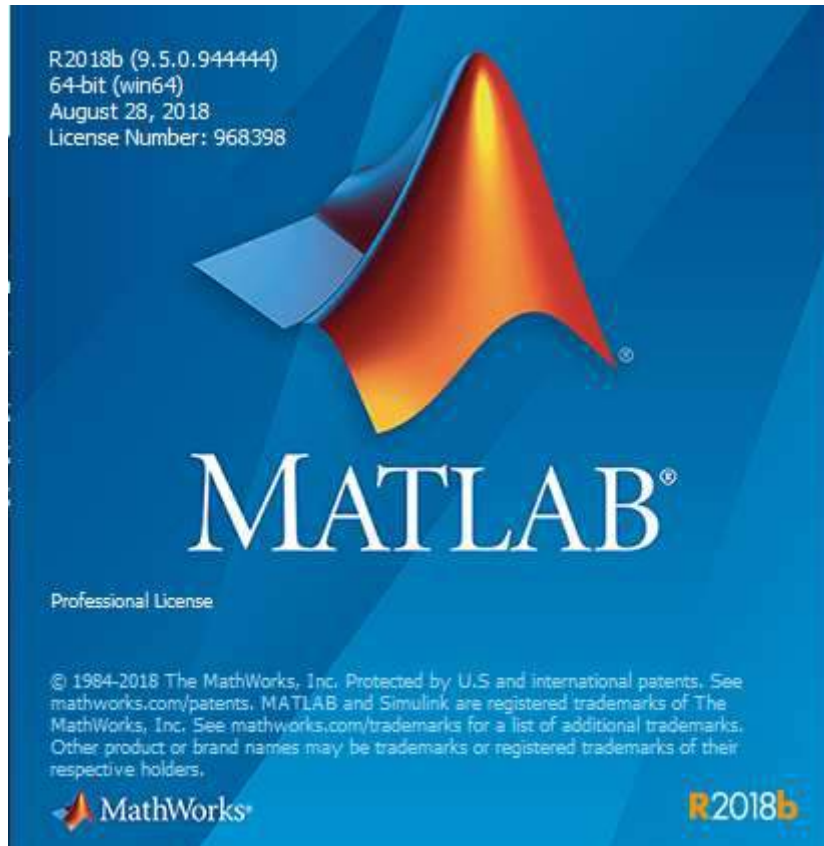
Dimana :

= frekuensi

= phi

Setelah menemukan hasil dari kecepatan sudut menggunakan persamaann(4), peneliti dapat memasukan nilai kecepatan sudut kedalam persamaan(3). Setelah itu nilai dari orde 2 dapat dihasilkan.

Selanjutnya, setelah menemukan nilai persamaan orde 1 dan orde 2, peneliti dapat menentukan rangkaian dari LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*) menggunakan bantuan dari *software* MATLAB Simulink.



Gambar 1.3 Software MATLAB

sumber gambar: *screenshot* pada *software* MATLAB

Setelah peneliti menentukan rangkaian LQR dan LQT tahapan selanjutnya ialah melakukan simulasi terhadap rangkaian tersebut yang bertujuan untuk mengetahui persamaan yang ditentukan diawal tadi sesuai dengan hasil simulasi atau tidak. Dari hasil simulasi rangkaian LQR dan LQT peneliti dapat melakukan analisis terhadap hasil simulasi dengan teori yang ada.

Tahapan penelitian selanjutnya ialah menambahkan *noise* kedalam rangkaian tersebut guna untuk melihat seberapa bagus *plant* yang peneliti gunakan. Jika ditambahkan *noise* seharusnya hasil simulasi menghasilkan grafik yang lebih tereduksi daripada yang tidak menggunakan *plant*.

2.2 Permodelan dan Komponen yang Digunakan

Dalam optimasi sistem setelah menentukan atau mendapatkan permodelan atau rumus umum yakni orde 1 dan orde 2, peneliti dapat mengaplikasikan data motor DC yang diperlukan kedalam rumus. Berikut merupakan perhitungan untuk orde 1:

Perhitungan matematis orde 1 pada motor DC JGA25-370

Dari persamaan (1) dan persamaan (2) peneliti dapat mendapatkan sebuah permodelan sebagai berikut :

$$G_s = K\tau s + K \dots \dots \dots \text{persamaan} \quad (1)$$

$$G_s = 0.0 \ 0.0 + 0.0 \quad (6)$$

Untuk mendapatkan nilai dari K , maka diperlukan persamaan(2):

$$K = \tau I \dots \dots \dots \text{persamaan} \quad (2)$$

$$K = \tau i = 0.010.30 = 0.03 \quad (8)$$

Setelah proses perhitungan dengan permodelan orde 1 selesai, selanjutnya ialah perhitungan dengan menggunakan *script* MATLAB:

Tabel 1.1

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 0.000016 %J = momen inersia
b = 0.0000963 %b = damping ratio
K = 0.03 %K = Konstanta torsi(Kt)
R = 1.09 %R = resistansi
L = 0.016 %L = induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

0 1 0;

0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R);

KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];

% OPTIMASI SISTEM LQT PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 0.0116 ; % J = Momeninersia

b = 0.963 ; % b = Rasioedam

K = 0.03 ; % K = konstanta

R = 1.68 ; % R = resistansi

L = 0.002 ; % L =Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

Q =10; R = 0.0000000001; %0.000000000000001

W = C'*Q; %

[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P

K = inv(R)*B'*S %feedback Gain

ACL = (A-B*K)'

L = inv(R)*B' %model following gain

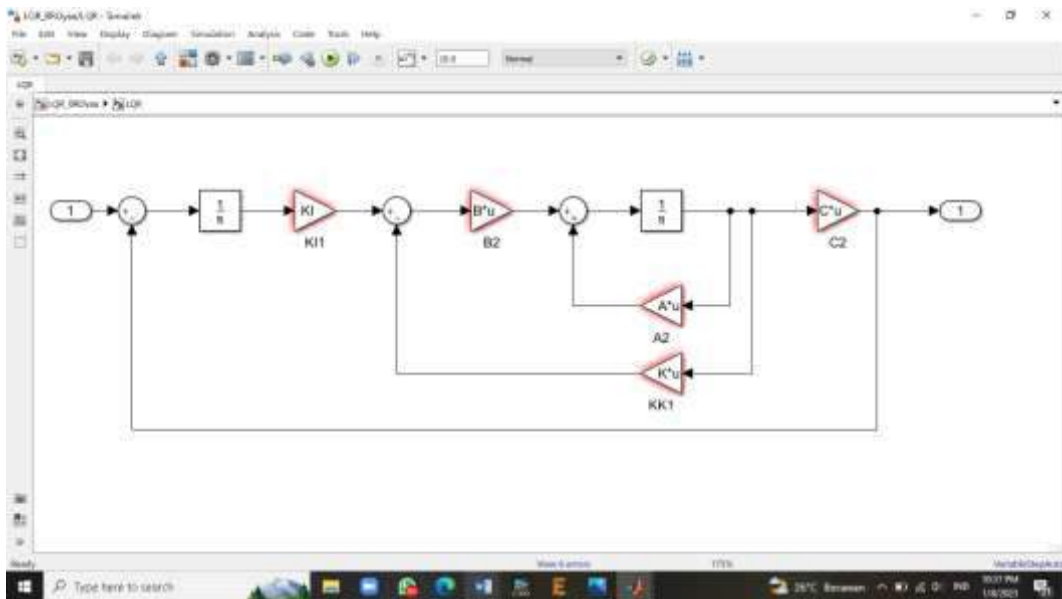
Selanjutnya ialah mengidentifikasi komponen apa saja yang digunakan pada rangkaian LQR dan LQT. Berikut merupakan daftar komponen yang digunakan pada rangkaian tersebut:

Tabel 1.2 Daftar komponen yang akan digunakan

Daftar Komponen Simulink	

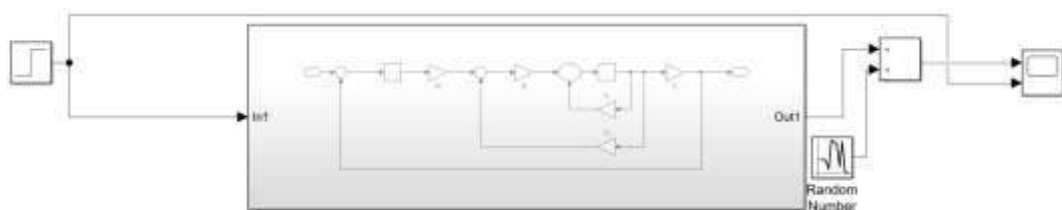
Dari tabel 2.1 peneliti dapat menggunakannya untuk merangkai rangkaian LQR dan LQT pada MATLAB *simulink*. Untuk rangkaian tersebut dapat dilihat pada berikut ini:

Rangkaian LQR



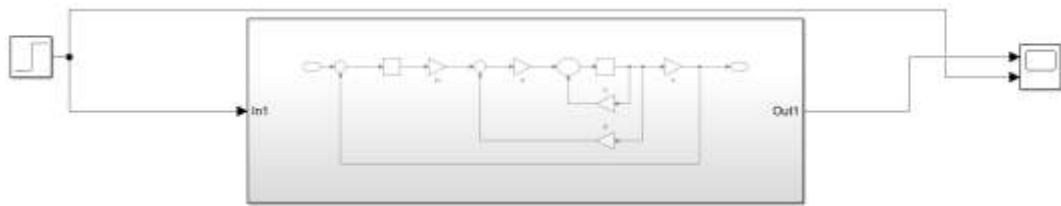
Gambar 1.4

Rangkaian LQR tanpa noise



Gambar 1.5

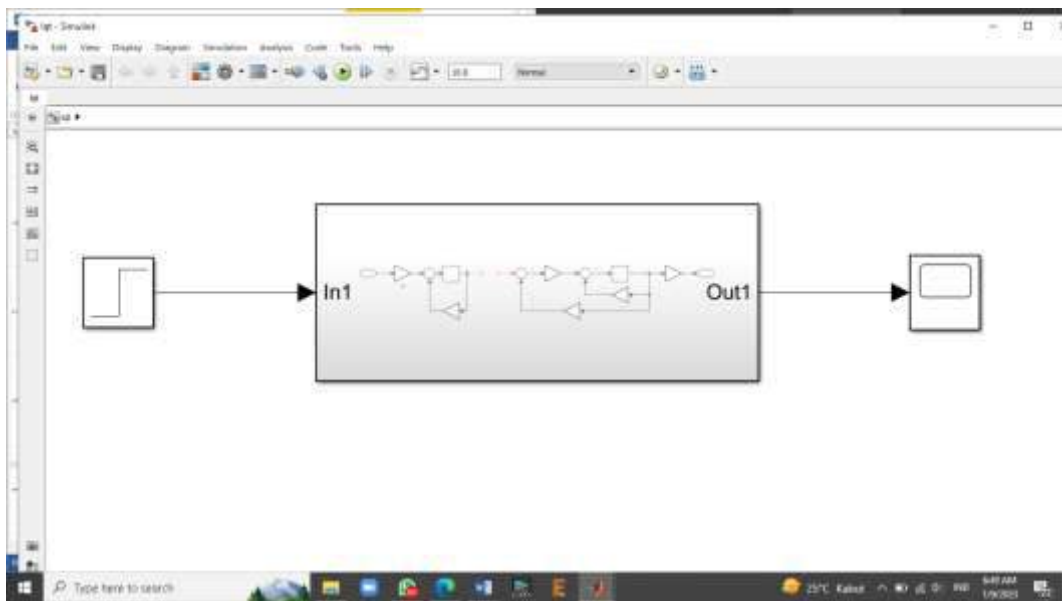
Rangkaian LQR menggunakan *noise*



Gambar 1.6

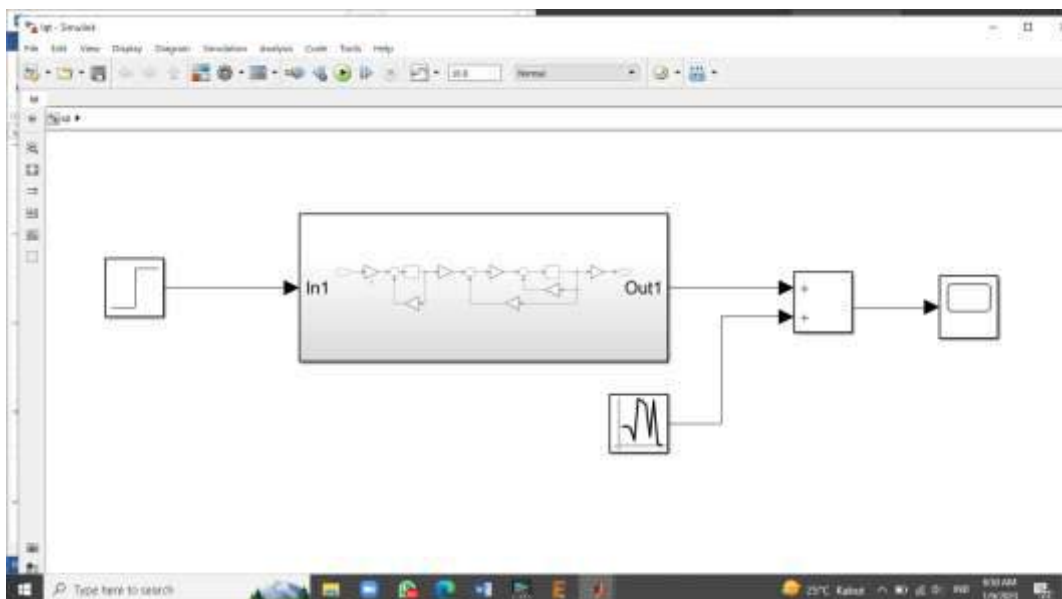
Rangkaian LQT

Rangkaian LQT tanpa *noise*



Gambar 1.7

Rangkaian LQT menggunakan *noise*



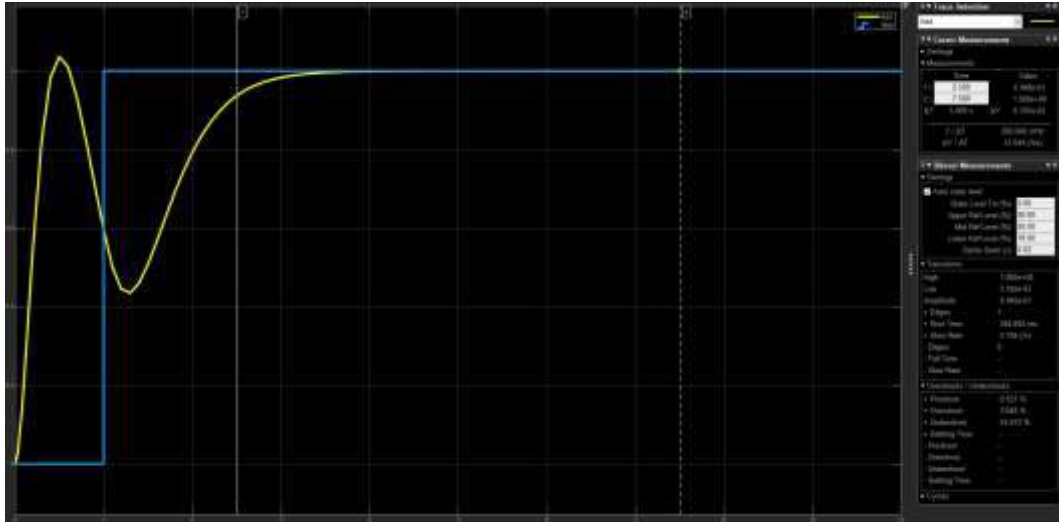
Gambar 1.8

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL SIMULASI

LQR (*Linear Quadratic Regulator*)

Tanpa *noise*

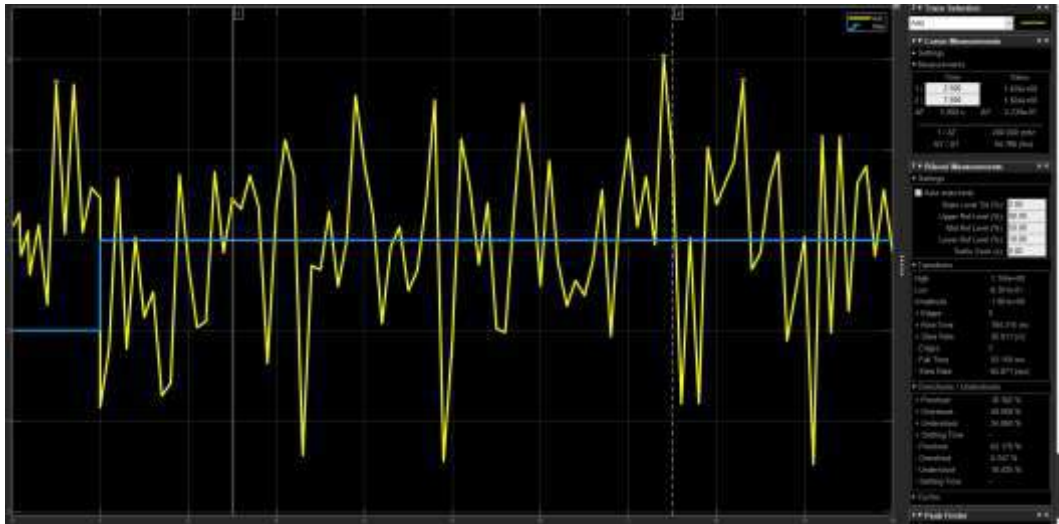


Gambar 1.9 Hasil Simulasi LQR tanpa noise

Sumber gambar: *screenshot software MATLAB simulink*

Pada gambar 3.1 dapat terlihat sebuah hasil yaitu dua buah grafik berwarna biru dan kuning. Grafik berwarna biru merupakan nilai *input* atau *set point* yang diberikan pada sistem yang bernilai satu (1). Sedangkan, grafik yang berwarna kuning merupakan nilai atau hasil dari *step response* permodelan pada motor DC 054B-2. Nilai dari *step response* permodelan motor dengan metode LQR tersebut mencapai amplitude sebesar 0,994 dengan *time* atau waktu yang diperlukan untuk nilai stabil ialah pada 4s. *Overshoot* yang terjadi pada hasil tersebut sebesar 3.646% dan sedangkan *undershoot* yang terjadi pada hasil grafik LQR tanpa *noise* sebesar 55.821%.

Dengan *noise*



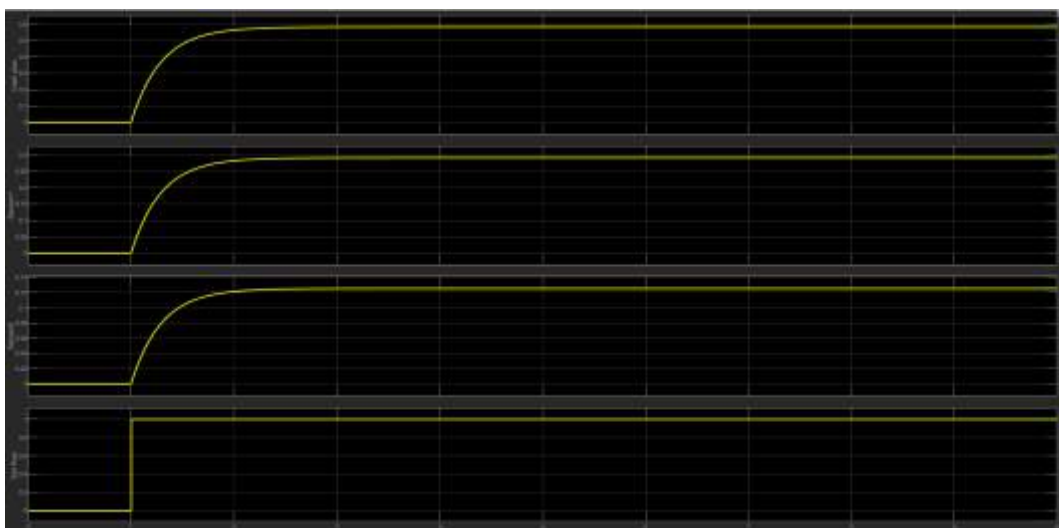
Gambar 1.10 Hasil simulasi LQR menggunakan noise

Sumber gambar: *screenshot software MATLAB simulink*

Pada gambar 3.2 dapat terlihat sebuah hasil yaitu dua buah grafik berwarna biru dan kuning. Yang dimana grafik berwarna biru merupakan nilai *input* atau *set point* yang diberikan pada sistem yang bernilai satu (1). Sedangkan grafik yang berwarna kuning merupakan nilai atau hasil dari *step response* dari permodelan pada motor DC JGA25-370. Untuk nilai dari *step response* dari permodelan motor tersebut mencapai amplitude sebesar 1.98. *Overshoot* yang terjadi pada hasil tersebut sebesar 49% dan sedangkan *undershoot* yang terjadi pada hasil grafik LQR tanpa *noise* sebesar 34%.

LQT (*Linear Quadratic Tracking*)

Tanpa *noise*

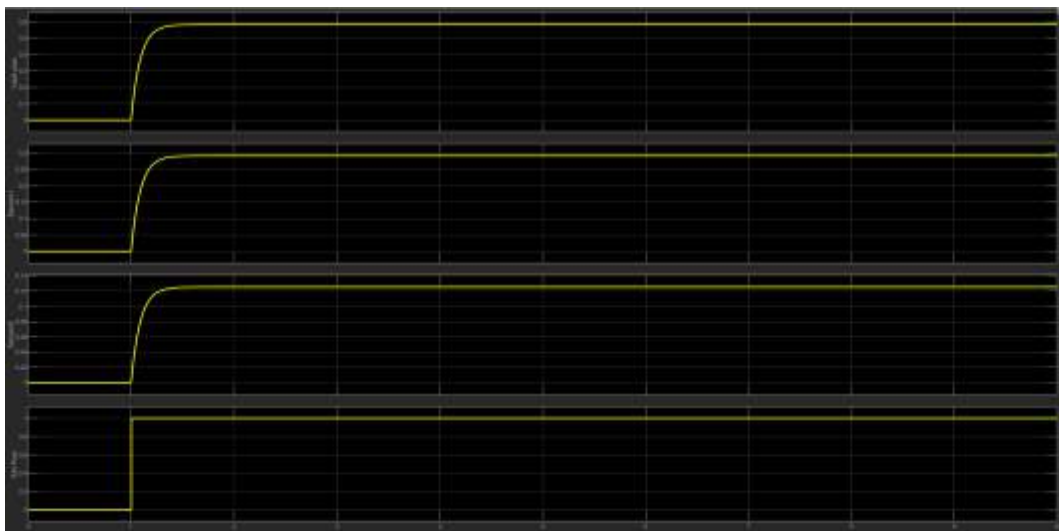


Gambar 1.11 Hasil simulasi LQT tanpa noise

Sumber gambar: *screenshot software MATLAB simulink*

Dari hasil gambar 3.3 terlihat bahwa grafik yang berwarna kuning merupakan hasil dari nilai fungsi transfer orde 1 pada rangkaian SIMO. Dalam hasil simulasi terdapat 4 buah grafik yakni grafik hasil *plant*, sensor 1, sensor 2, dan *set point*. Untuk hasil dari *plant* menghasilkan nilai stabil pada 0,6 dengan waktu atau *time* yang dibutuhkan untuk mencapai nilai yang stabil tadi ialah 2,5 s. Untuk sensor 1 dan sensor 2 memiliki nilai waktu atau *time* untuk mencapai titik stabil yang sama yakni 2,5 s akan tetapi kedua sensor memiliki hasil atau grafik yang berbeda. Untuk sensor 1 memiliki nilai stabil diangka 0,3 sedangkan sensor 2 memiliki nilai stabil diangka 0,12.

Dengan *noise*



Gambar 1.12 Hasil Simulasi LQT menggunakan *noise*

Dari hasil gambar 3.4 terlihat bahwa grafik yang berwarna kuning merupakan hasil dari nilai fungsi transfer orde 1 pada rangkaian SIMO. Dalam hasil simulasi terdapat 4 buah grafik yakni grafik hasil *plant*, sensor 1, sensor 2, dan *set point*. Untuk hasil dari *plant* menghasilkan nilai stabil pada 0,6 dengan waktu atau *time* yang dibutuhkan untuk mencapai nilai yang stabil tadi ialah 1,5 s. Waktu untuk mencapai nilai stabil pada *plant* lebih cepat merespon dibandingkan dengan orde 1. Untuk sensor 1 dan sensor 2 memiliki nilai waktu atau *time* untuk mencapai titik stabil yang sama yakni 1,5 s akan tetapi kedua sensor memiliki hasil atau grafik yang berbeda. Untuk sensor 1 memiliki nilai stabil diangka 0,3 sedangkan sensor 2 memiliki nilai stabil diangka 0,12. Sama dengan hasil waktu dari *plant*, pada orde 2 ini memiliki respon yang lebih cepat agar grafik cepat stabil yang semula pada orde 1 memiliki nilai waktu 2,5 s pada orde 2 ini meningkat menjadi 1,5 s saja.

KESIMPULAN

istem pengendalian kecepatan motor DC menggunakan prinsip PWM (Pulse

Width Modulator) yaitu suatu metode pengaturan kecepatan putaran motor DC dengan mengatur lamanya waktu pensaklaran aktif (Duty Cycle) sistem pengendalian kecepatan motor DC menggunakan prinsip PWM (Pulse Width Modulator) yaitu suatu metode pengaturan kecepatan putaran motor DC dengan mengatur lamanya waktu pensaklaran aktif (Duty Cycle)

Setelah dilakukan pengujian beban dapat terlihat bahwa beban induktif cenderung menurunkan tegangan dengan sudut fasa lagging (sinyal tegangan mendahului arus). Sedangkan, untuk beban kapasitif cenderung menaikkan tegangan dengan sudut fasa leading, yaitu sinyal arus mendahului tegangan. Dalam perancangan ini, kontroler belum bisa bekerja dengan baik, dikarenakan masih ada permasalahan dalam algoritma untuk penghitungan kontroler. Dalam melakukan simulasi Simulink pada *software* MATLAB diperlukan fungsi transfer yang didapat dari pemodelan motor DC orde 1 dan orde 2 untuk mengetahui *step response* sistem LQR dan LQT pada motor DC. Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan orde 2 diperlukan *datasheet* motor DC yang mendukung. Pada percobaan ini peneliti menggunakan *datasheet* motor DC JGA25-370. Hasil simulasi dari sistem LQR dan LQT dengan menggunakan fungsi transfer dari pemodelan matematis motor DC JGA25-370 orde 1 & 2 memiliki keluaran *set point* yang diinginkan.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT. "Rancang Bangun Charger Controller Pada Pembangkit Listrik Energi Angin Berbasis Arduino Uno." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [2] LUGAS, JS, EDY, S and ANDA, IJ. "Implementasi Sistem Filtrasi Air Alami Terintegrasi Sensor TDS dan ESP32 Untuk Pemenuhan Baku Mutu Air Kelas." JURNAL ELEKTRONIKA DAN OTOMASI INDUSTRI Учредители: Politeknik Negeri Malang ..., 2024
- [3] Riyanto, DK, Asri, P and Nugraha, AT. "Monitoring akselerasi getaran dan suhu motor induksi." *Elektrise: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 33-39.
- [4] Rahim, R, Kurniasih, N, Hasibuan, A, Andriany, L, Najmurokhman, A and "Congklak, a traditional game solution approach with breadth first search." *MATEC web of Conferences* 197, 2018, p. 3007.
- [5] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L, Utomo, AP and Firnandi, R. "Coastal Community Empowerment: Recovery Of Cockle Shell Waste Into Eco-friendly Artificial Reefs In Mutiara Beach Trenggalek Indonesia." ID Patent EC00,202,300,070, 2023
- [6] Nugraha, AT. "Slip Control Design On Electrical Wheel Haul Truck-Based Sliding Mode Control." *MISEIC* 2018, 2018
- [7] Sasongko, A, Nugraha, AT, Anshory, I, Rahim, R, Khuwaja, KSA and "Estimation of the thrust coefficient of a Quadcopter Propeller using Computational Fluid Dynamics."

- [8] Magriza, RY, Hidayana, E, Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Design and Implementation of Water Quality Control in Catfish Farming Using Fuzzy Logic Method with IoT-Based Monitoring System.." *Jurnal Teknologi Maritim* 4.1, 2021, pp. 13-18.
- [9] Utomo, AP, Apriani, M, Ruddianto, R, Suhardjito, G, Wibawa, IPA and "Pelatihan Pembuatan Miniatur Kapal Berdasar Standar Desain Berbahan Fiberglass Reinforced Plastic (FRP) untuk Kelompok Pengrajin di Wilayah Pantai Situbondo." *INTEGRITAS: Jurnal Pengabdian* 7.2, 2023, pp. 391-402.
- [10] Syaifudin, MM, Saputra, DE and Nugraha, AT. "Single-phase Half-wave Uncontrolled Converter with A Single-phase AC Generator." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 2.2, 2025, pp. 13-19.
- [11] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 29-38.
- [12] Rafsanjani, E, Pudji, A, Indrato, TB, Yan, S and Bogavev, SA. "A Modified Electrosurgery Unit Based on High Frequency Design with Monopolar and Bipolar Method." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2021
- [13] Nugraha, AT, Widodo, HA, Pambudi, DSA, Cahyono, L, Apriani, M and "Buku "Portable-2WG" Inovasi Turbin Pembangkit Listrik Portable Air dan Angin untuk Kebutuhan Rumah Tangga Pada Penduduk Daerah Aliran Sungai.", 2022
- [14] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1, 2025, pp. 10-19.
- [15] Khabibi, SR, Poetro, JE and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Panel Sistem Kontrol dan Monitoring Motor 3 Fasa Dual Speed Berbasis Mikrokontroler." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 61-68.
- [16] Nugraha, AT, Rinaldi, D, Messiah, MS, Shiddiq, M, Ramadhan, M and Ainudin, F. "Implementation of Line of Sight Algorithm Design Using Quadcopter on Square Tracking." *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)* 7.2, 2022, pp. 99-107.
- [17] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Konsep Dasar Elektronika Daya." ID Patent EC00,202,208,819, 2022
- [18] Faj'riyah, AN, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Prototipe Proteksi Motor Terhadap Overheat Serta Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Arduino Uno." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 20-25.
- [19] Zaibah, S and Nugraha, AT. "Pembangkit Energi Listrik Pico Hydro Terapung Menggunakan Underwater Turbine Untuk Mendukung Pemenuhan Rasio Elektrifikasi Dan Energi Listrik Di Daerah 3t." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [20] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Planning Of A 70 kW Solar Power Plant In Magersari Village." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...*, 2024

BAB II

Kajian Simulasi LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) dengan Plant Motor DC FAPG36-BL3650

Oleh: **Farhan Wahyu Nur Rahman1**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: LQR, LQT, Motor DC

Technology that is developing at this time in order to meet the needs and facilitate more human activities. One result of technological developments is DC motors. The purpose of this study is to apply control on a DC brushless motor so that it can follow the setpoint as desired. And the controller used is the Linear Quadratic Regulator (LQR) controller. The LQR controller has simplicity, and the ease of

getting a control because it only requires the Q and R values which will produce the K (gain feedback)

and L (setpoint tracking) parameters. Linear Quadratic Tracking (LQT) is one method of optimal control theory where its objective is to make the output of a system tracks its reference as close as possible while minimize or maximize a performance index. The system which wants to be controlled with LQT must be a linear system, but the missile itself has a non-linear system, so the missile needs to be linearized in order to control it using LQT. In this final project, a missile's autopilot is designed which consists of non-linear state feedback decoupler and LQT controller DC motors are electronic devices commonly encountered in industrial environments to everyday life. In order for the performance of the DC motor to run properly, a controller is needed so that the performance of the DC motor is better. Modeling is useful to find out whether the response form of a pure DC motor before being given a load has produced a good response or not. The most common forms of plant modeling are SISO. In the modeling requires a mathematical form of the plant so that the response form of the plant can be described in graphical form with the help of software. In this study, it is only limited to the mathematical model of the first and second order DC motors. Ideally a plant is impossible not to experience disturbances. Disturbance caused from within the plant itself is usually called noise. Noise that occurs in the system can affect the plant. This study was carried out with the aim of comparing how the response of the first and second order FAPG36-BL3650 DC Motor when modeled SISO is given or not. The results of the research show that the SISO form without noise produces the best response in

the absence of ripples and the response is linear. The response generated by the second-order mathematical model produces a response that is closer to the set point value compared to the DC motor response of the first-order mathematical model. In the MISO and MIMO models, the output form of the response from the system will follow the form of one of the input signals. The addition of noise causes the shape of the output response of the FAPG36-BL3650 DC motor to imitate the shape of the given noise signal.

Abstrak

Motor DC merupakan perangkat elektronik yang biasa ditemui pada lingkungan industri hingga kehidupan sehari-hari. Agar kinerja motor DC dapat berjalan dengan baik maka diperlukan pengontrol agar kinerja dari motor DC lebih baik. Pemodelan berguna untuk mengetahui apakah bentuk respon dari motor DC murni sebelum diberi beban sudah menghasilkan respon yang baik atau belum. Bentuk permodelan suatu plant. Dalam permodelan membutuhkan bentuk matematis dari plant agar bentuk respon dari plant dapat digambarkan melalui bentuk grafik dengan bantuan software. Dalam penelitian kali ini hanyalah dibatasi dengan model matematis Motor DC orde pertama dan orde kedua saja. Idealnya suatu plant tidak mungkin tidak mengalami gangguan. Gangguan yang diakibatkan dari dalam plant itu sendiri biasa disebut noise. Noise yang terjadi pada sistem dapat berpengaruh terhadap plant. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan bagaimana respon Motor DC FAPG36-BL3650 orde pertama dan kedua ketika dimodelkan SISO, antara dengan diberikan noise dan tidak. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk SISO tanpa noise menghasilkan respon paling baik dengan tidak adanya riak dan respon berbentuk linier. Respon yang dihasilkan oleh model matematis orde kedua menghasilkan respon yang lebih dekat dengan nilai set point dibandingkan dengan respon motor DC model matematis orde pertama. Pada model SISO bentuk output hasil respon dari sistem akan mengikuti bentuk salah satu sinyal input. Penambahan noise mengakibatkan bentuk respon output dari motor DC FAPG36-BL3650 meniru bentuk sinyal noise yang diberikan. Teknologi yang berkembang pada saat ini dalam rangka memenuhi kebutuhan dan memudahkan kegiatan manusia semakin banyak. Salah satu hasil dari perkembangan teknologi adalah motor DC. Tujuan pada penelitian ini yaitu menerapkan pengendalian pada motor brushless DC agar dapat mengikuti setpoint seperti yang diinginkan. Dan pengendali yang digunakan adalah pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR). Pengendali LQR memiliki kesederhanaan, dan kemudahan untuk mendapatkan suatu pengendalian karena hanya

memerlukan nilai Q dan R yang akan menghasilkan parameter K (gain feedback) dan L (setpoint tracking). Linear Quadratic Tracking (LQT) merupakan salah satu metode kendali optimal dengan tujuan membuat keluaran sistem mengikuti referensi yang diberikan sedekat mungkin dengan memperhatikan suatu indeks performansi. Sistem yang ingin dikendalikan oleh LQT harus sistem yang linier, sehingga diperlukan linearisasi agar rudal dapat dikendalikan dengan LQT. Dalam tugas akhir ini, yang terdiri dari nonlinear state feedback decoupler dan pengendali LQT.

A. Pendahuluan

Motor DC merupakan suatu komponen elektronika yang sangat banyak ditemui pada kehidupan sehari-hari. Motor listrik adalah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik atau gerak. Prinsip kerja motor DC adalah berusaha agar arah medan magnet rotor selalu berlawanan dengan arah medan magnet *stator* yang saling tolak menolak. Kumparan ditolak oleh arus berenergi, menciptakan medan magnet dalam arah tertentu di sekitar kumparan jangkar. Secara umum, motor DC melambat di bawah beban, melambat, dan tidak berjalan pada kecepatan konstan. Kecepatan motor DC dapat dikontrol dengan mengubah tegangan *input*. Misalnya, jika beban bertambah dan motor DC melambat, solusinya adalah dengan menambah kecepatan lagi dengan meningkatkan nilai tegangan *input* ke motor DC. Oleh karena itu, diperlukan pengontrol untuk menjaga kecepatan motor DC agar tetap stabil seiring dengan perubahan beban. Fungsi dasar dari pengontrol adalah untuk membandingkan nilai sebenarnya dari output dari sebuah plant, dengan masukan referensi, (nilai yang diinginkan), tentukan kesalahan, dan hasilkan sinyal kontrol yang akan mengurangi kesalahan ke nilai yang mendekati nol.

Salah satu metode yang digunakan untuk pengontrolan motor DC agar *output* motor menjadi lebih baik yaitu LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracker*). Fungsi dari LQR yaitu agar respon dari motor lebih mendekati *set poin* yang diinginkan serta mengurangi *overshoot* dan *undershoot* yang terjadi pada sistem. Metode pengontrol LQR memiliki sifat-sifat seperti ketahanan, keandalan, pembangkitan penguatan statis, dll. Dengan menggunakan metode kontrol optimal ini dalam sistem besar dengan banyak input, kontrol efisien beberapa keluaran dicapai secara andal dan ekonomis. Teknik regulator kuadrat linier digunakan untuk merancang pengontrol optimal yang meminimalkan fungsi biaya yang diberikan, indeks kinerja.

LQT merupakan sistem pengaturan linear yang *output* sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan (Akbar et al., 2016). *Linear quadratic tracker* (LQT) adalah

mekanisme kontrol pelacakan berbasis model yang menggunakan *affine state-feedback* untuk memberikan upaya pengendalian yang optimal. LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi (Saleem et al., 2018). Biasanya LQT digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan *tracking*.

Dengan dua metode optimasi tersebut, pada Mata Kuliah Optimasi Sistem Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dilakukan percobaan bagaimana pengaruh metode LQR dan LQT terhadap respon *output* yang dihasilkan oleh suatu motor DC. Percobaan juga dilakukan dengan menambahkan *noise* pada sistem untuk dilakukan pengamatan apakah penambahan metode LQR dan LQT respon motor tidak akan terpengaruh oleh *noise* yang diberikan atau respon motor tetap terpengaruh oleh *noise* yang diberikan. Serta bagaimana perbedaan antara metode optimasi LQR dengan LQT pada suatu jenis motor DC yang sama.

METODOLOGI PENELITIAN

B. 2.1 LQR (Linear Quadratic Regulator)

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Dengan menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari *set point* yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/*noise*.

Linear Quadratic Tracking (LQT)

LQT merupakan sistem pengaturan linier yang keluarannya mengikuti (*tracking*) jalur yang telah ditetapkan melalui masukan. Akan dijelaskan bagaimana LQT dapat diterapkan untuk mengatur keluaran sistem agar mendekati keluaran yang diinginkan dengan energi kontrol minimal. Persamaan 1 di bawah ini adalah observable system yang linear.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(t)$$

Dengan vektor kesalahan seperti pada Persamaan 2.

$$e(t) = z(t) - y(t) \quad (2)$$

di mana $e(t)$ adalah kesalahan yang didapat dari selisih antara masukan yang diinginkan $z(t)$ dan keluaran sistem $y(t)$. dan indeks performansi seperti pada Persamaan 3 berikut.

$$J = \frac{1}{2} e'(t_f) F(t_f) e(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [e'(t) Q(t) e(t) + u'(t) R(t) u(t)] dt \quad (3)$$

Gambar 2.1

Dengan fungsi matriks $P(t)$ harus memenuhi persamaan:

$$P'(t) = -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + P(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)P(t) + C'(t)Q(t)C(t) \quad (4)$$

atau bisa ditulis :

$$0 = -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + P(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)P(t) + C'(t)Q(t)C(t) \quad (5)$$

Untuk matrix Q dan R , diasumsikan sesuai dengan performa yang diinginkan untuk sistem. Setelah mendapatkan persamaan Riccati, dapatkan persamaan diferensial vektor non-homogen dengan Persamaan 6.

$$g'(t) = -[A - B(t)R^{-1}B'(t)P(t)]' g(t) - C'(t)Q(t)z(t) \quad (6)$$

Dengan didapatkannya $P(t)$ dan $g(t)$, hanya tersisa gain $K(t)$ untuk dicari. $K(t)$ didapatkan dengan Persamaan 7.

$$K(t) = R^{-1}(t)B'(t)P(t) \quad (7)$$

Semua parameter yang dibutuhkan untuk metode LQT telah didapatkan. Sekarang saatnya untuk mencari kontrol optimal $u^*(t)$ dengan Persamaan 8.

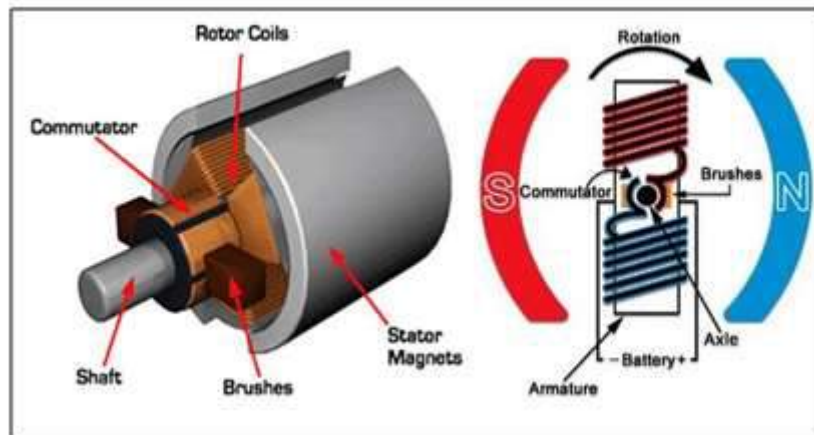
$$u^*(t) = -K(t)x^*(t) + R^{-1}(t)B'(t)g(t) \quad (8)$$

Dengan $x^*(t)$ adalah umpan balik dari sistem. Umpan balik nantinya akan dikalikan dengan gain kontrol $K(t)$ dan ditambahkan dengan $R^{-1}(t)B'(t)g(t)$ untuk menghasilkan $u^*(t)$ yang akan digunakan sebagai masukan kepada sistem agar hasil yang diinginkan tercapai.

C. 2.3 Motor DC

Motor Listrik DC atau DC Motor adalah suatu perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi kinetik atau gerakan (*motion*). Motor DC ini juga dapat disebut sebagai Motor Arus Searah. Seperti namanya, DC Motor memiliki dua terminal dan memerlukan tegangan arus searah atau DC (*Direct Current*) untuk dapat menggerakannya. Motor Listrik DC ini biasanya digunakan pada perangkat-perangkat Elektronik dan listrik yang

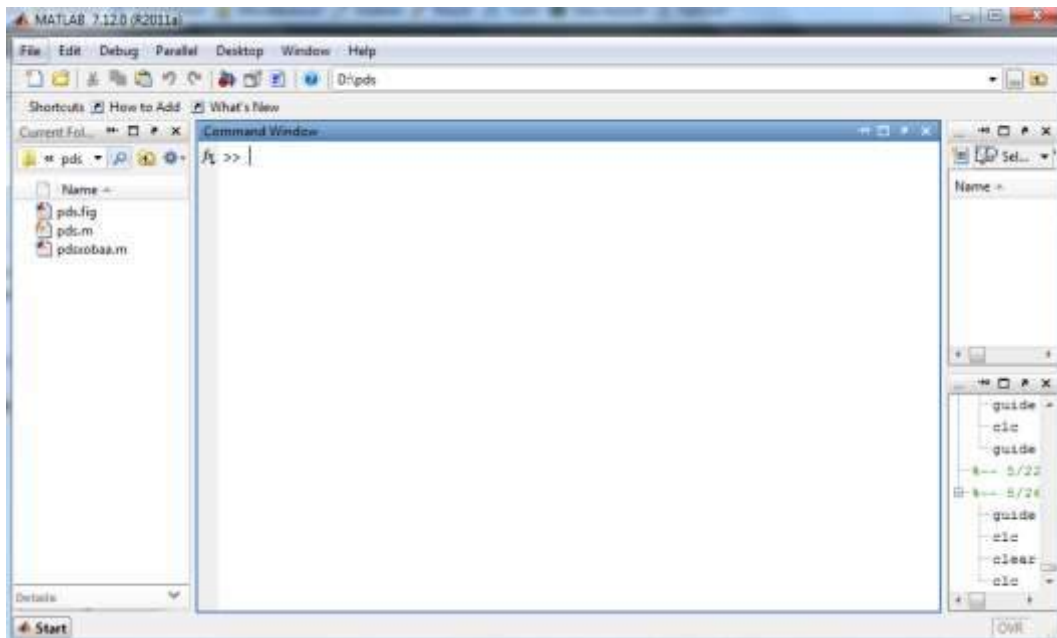
menggunakan sumber listrik DC seperti *vibrator* ponsel, Kipas DC dan Bor Listrik DC. Konstruksi motor DC seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.2 Konstruksi Motor DC

D. 2.4 Software MATLAB

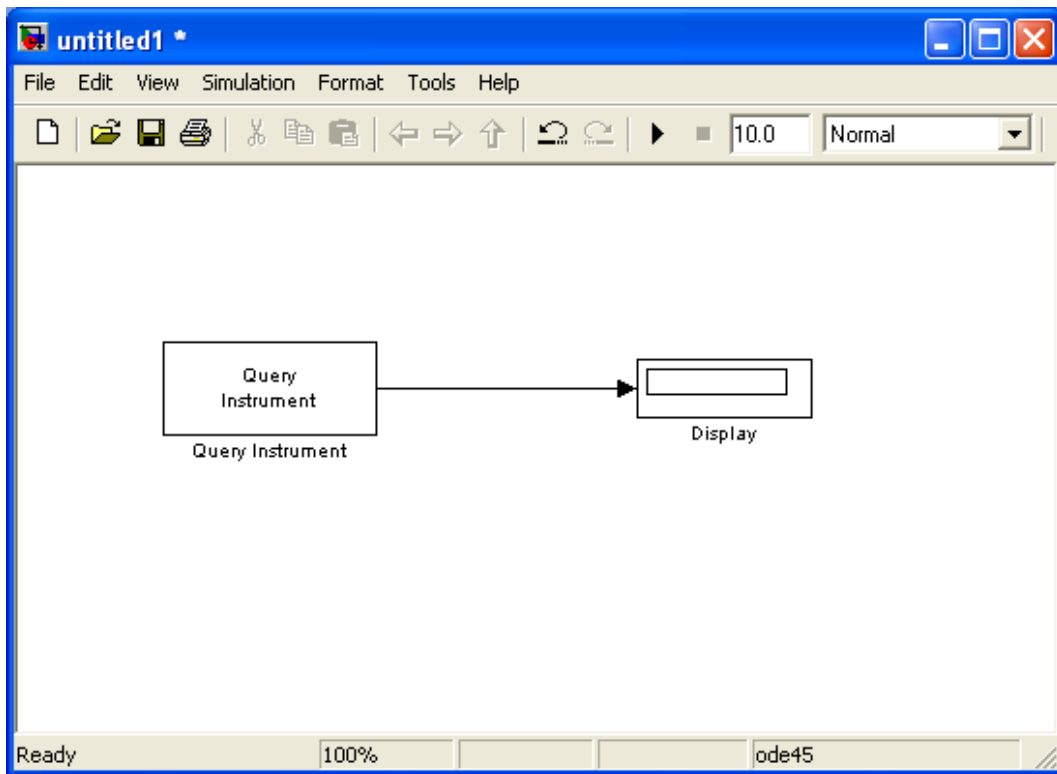
MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta menciptakan pemodelan dan aplikasi. Tampilan *software* MATLAB seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.3 2Tampilan MATLAB

Pada simulasi untuk melihat respon yang dihasilkan oleh motor DC penulis menggunakan fitur Simulink pada MATLAB. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis.

Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 2.4 Tampilan Simulink MATLAB

2.5 Fungsi Alih

Fungsi alih merupakan perbandingan fungsi laplace output dengan fungsi laplace input dengan semua kondisi mula dianggap nol. Fungsi alih berfungsi untuk memudahkan melihat karakteristik suatu sistem. Secara umum bentuk sistem orde 1 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Sedangkan untuk bentuk umum dari sistem orde 2 dapat dinyatakan dalam bentuk standar berikut :

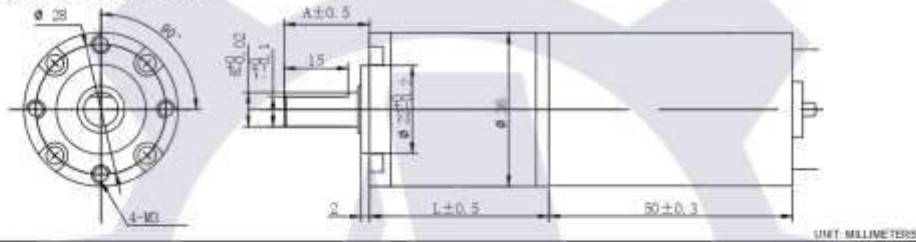
$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2)$$

FAPG36-BL3650

减速比 Gear Ratio	减速箱长 Gearbox Length L(mm)	减速比 Gear Ratio	减速箱长 Gearbox Length L(mm)	出轴长度 Shaft Length A(mm)
1/4~1/5	25.40	1/51~1/139	39.70	Customizable
1/14~1/27	32.50	1/189~1/21	46.90	
1/699~1/3736	54.00			



外形尺寸 DIMENSION



直流行星减速电机参数 PLANETARY GEARED MICRO DC MOTOR SPECS (voltage, current, torque, etc free customization)

电压 Voltage	减速比 Gear Ratio	1/4	1/5	1/14	1/19	1/27	1/51	1/71	1/100	1/139	1/189	1/369	1/516	1/721
12V	额定扭力 kgf.cm Rated Torque	1.35	1.69	4.15	5.63	7.99	12.94	18.02	25.38	35.28	39.97	78.04	109.13	152.49
	额定转速 RPM Rated Speed	1163	930	332	245	172	91	65	47	33	25	13	9	6
	最大允许扭力 kgf.cm Max Allowable Moment Torque	15.5	15.5	50.0	50.0	50.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
	空载转速 RPM No Load Speed	1500	1200.0	428.6	315.8	222.2	117.6	84.5	60.0	43.2	31.7	16.3	11.6	8.3
24V	额定扭力 kgf.cm Rated Torque	1.21	1.52	3.71	5.04	7.16	11.60	16.15	22.74	31.61	35.82	69.93	97.78	136.63
	额定转速 RPM Rated Speed	647	517	185	136	96	51	36	26	19	14	7	5	4
	最大允许扭力 kgf.cm Max Allowable Moment Torque	15.5	15.5	50.0	50.0	50.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0	150.0
	空载转速 RPM No Load Speed	792.0	633.6	226.3	166.7	117.3	62.1	44.6	31.7	22.8	16.8	8.6	6.1	4.4

电机参数 MICRO DC MOTOR SPECS (voltage, current, torque, etc free customization)

型号 Model	额定电压 Rated Voltage	空载 No Load		额定负载 RATED LOAD					堵转 Stall	
		转速 Speed	电流 Current	转速 Speed	电流 Current	扭矩 Torque	输出功率 Output	效率 Efficiency	扭矩 Torque	电流 Current
	VDC	RPM	A	RPM	A	gf.cm	W	%	gf.cm	A
FABL3650-V1	12	6000	0.66	4650	2.4	423	20.2	70.1	1700	2.9
FABL3650-V2	24	3168	0.16	2587	0.65	379	10.1	64.5	1600	2.9

Gambar 2.5

E. 2.6 Pemodelan Motor DC FAPG36-BL3650 Orde 1

Gambar 2.6. Datasheet Motor DC tipe FAPG36-BL3650[9]

Sumber Gambar:

Spesifikasi

$$\tau = 379 \text{ gf/cm} = 0,0367 \text{ N/m}$$

Rated current= 0,65 A

Voltage= 24 V

Rated speed= 2587 rpm = 270,91 m/s

Diameter = 36 mm

Jari-jari Motor= 18 mm = 0,018 m

$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f$

= 2.3,14.50

= 314 rad/s

= 1 : 71

Resistansi= 281,18 ohm

Induktansi= 0.00001805 H

$$12 \times m (R12+ R22) \quad (3)$$

Momen Inersia=

$$12 \times 0,032 (0,0182+ 0,0182) \quad (4)$$

=

$$1,036 \text{ kg}\backslash\text{m}^2 \quad (5)$$

=

Dari *datasheet* dapat di tentukan pula model matematis sistem orde satu dari motor DC FAPG36-BL3650 . Sistem orde satu merupakan suatu sistem yang di dalamnya terdapat perubahan satu kali [10]. Berikut rincian pemodelan sistem orde satu.

Persamaan umum fungsi alih orde 1:

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (6)$$

Berdasarkan datasheet motor FAPG36-BL3650 maka diperoleh persamaan orde 1:

$$\tau = K \cdot i \quad (7)$$

$$K = \tau i = 0,03670,65 = 0,056 \quad (8)$$

Dimana sehingga Persamaan orde 1 motor dc :

$$G(s) = 0,0560,0367s + 1 \quad (9)$$

Bentuk umum fungsi alih orde 2

$$G(s) = 2 \pi F 2s^2 + 2\zeta\omega_n s + 2 \pi F^2 \quad (10)$$

$$Gs = (314)2s^2 + 2(71)(314)s + (314)2 \quad (11)$$

$$Gs = 98596s^2 + 44588s + 98596 \quad (12)$$

F. Program Script Matlab

2.7.1 LQT

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 1.036 ; b=71 ; K= 0.056 ; R= 281.18 ; L = 0.000001805 ;

% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

Q=10; R=0.0000000001; %0.000000000000001

W=C'*Q; %

[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P

K=inv(R)*B'*S %feedback Gain

ACL=(A-B*K)'

L=inv(R)*B' %model following gain

```
1 - clear;
2 - clc;
3 - % Model Motor DC
4 - J = 1.036 ; b= 71 ; K= 0.056 ; R= 281.18 ; L = 0.000001805 ;
5 - % J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi
6 - A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
7 - B = [0; 1/L];
8 - C = [1 0];
9 - Q=10; R=0.0000000001; %0.000000000000001
10 - W=C'*Q; %
11 - [S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P
12 - K=inv(R)*B'*S %feedback Gain
13 - ACL=(A-B*K)';
14 - L=inv(R)*B' %model following gain
```



```
Command Window
1.0e+10 *
-0.0000 -6.6504
0.0000 0.0156

L =
1.0e+15 *
0 3.3402

fx >>
```

Gambar 2.6

2.7.2 LQR

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

```

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 1.036 ; b=71 ; K= 0.056 ; R= 281.18 ; L = 0.000001805;

% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [ A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;
     0 1 0;
     0 0 1000];

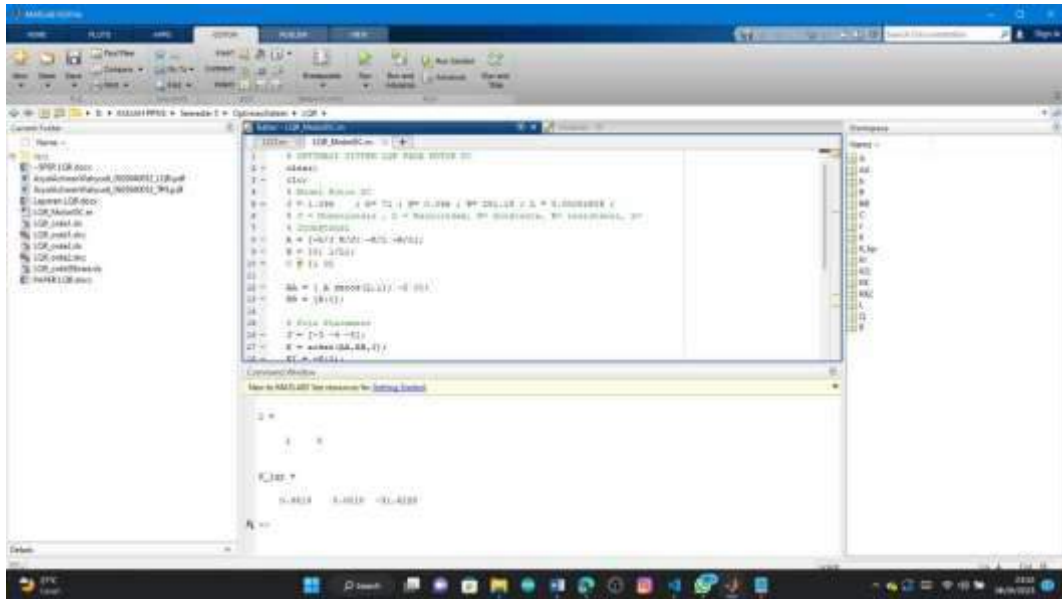
R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];

```



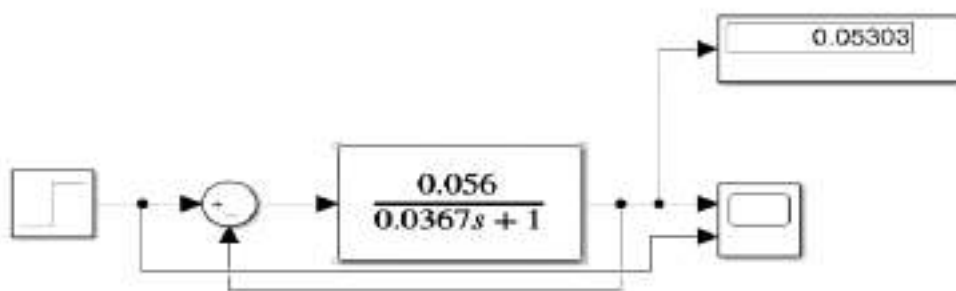
Gambar 2.7

2.8 Perancangan LQR Motor DC FAPG36-BL3650 pada Simulink

Daftar komponen

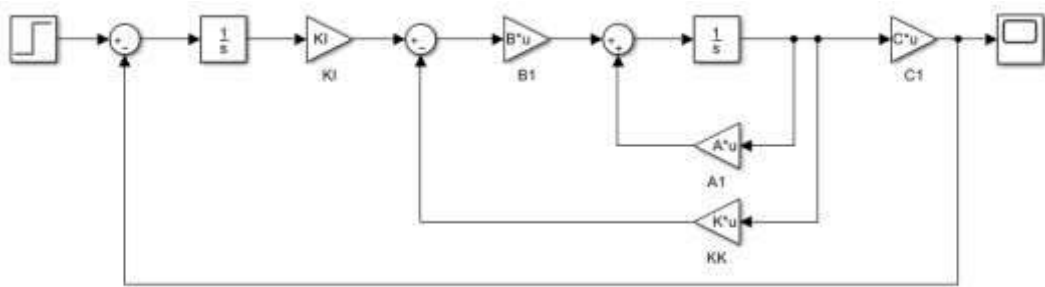
Tabel 2.1

G. Rangkaian Motor DC FAPG36-BL3650 Orde 1



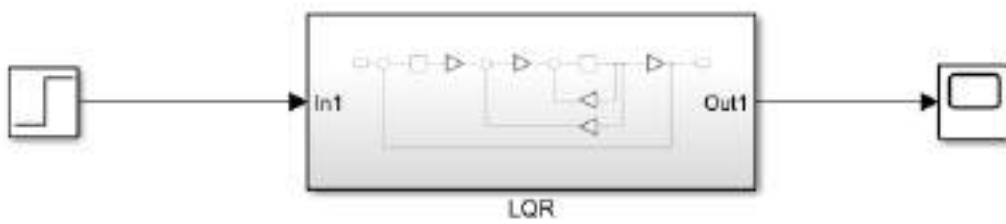
Gambar 2.8

H. Rangkaian LQR



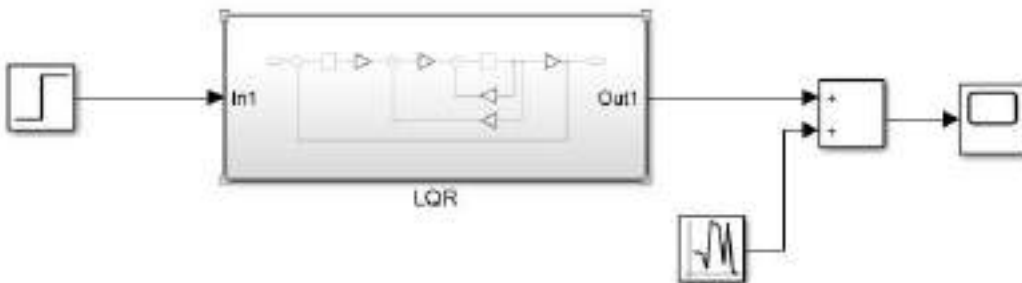
Gambar 2.9

I. Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



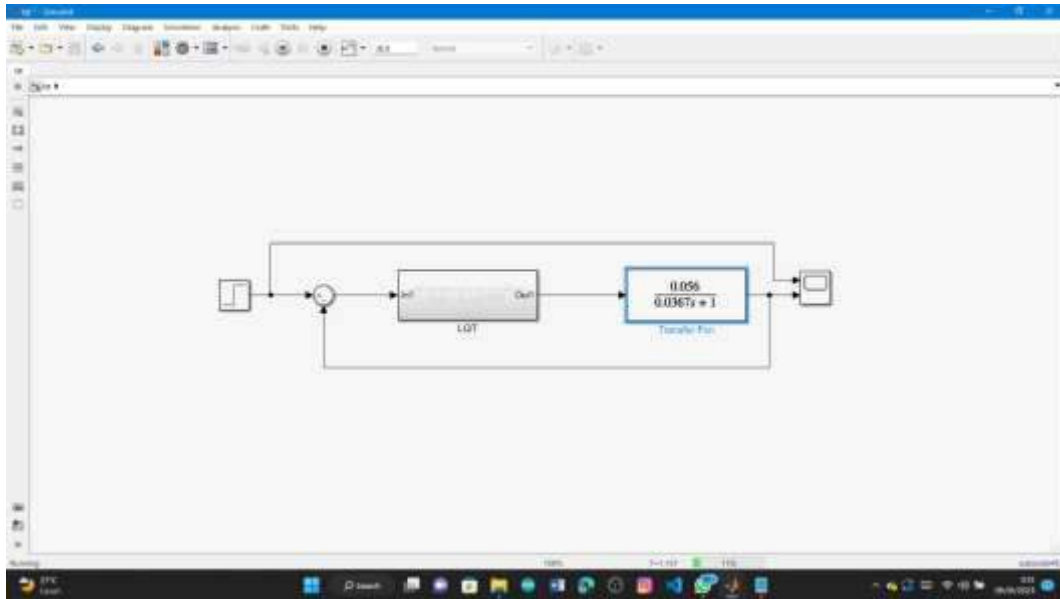
Gambar 2.10

J. Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



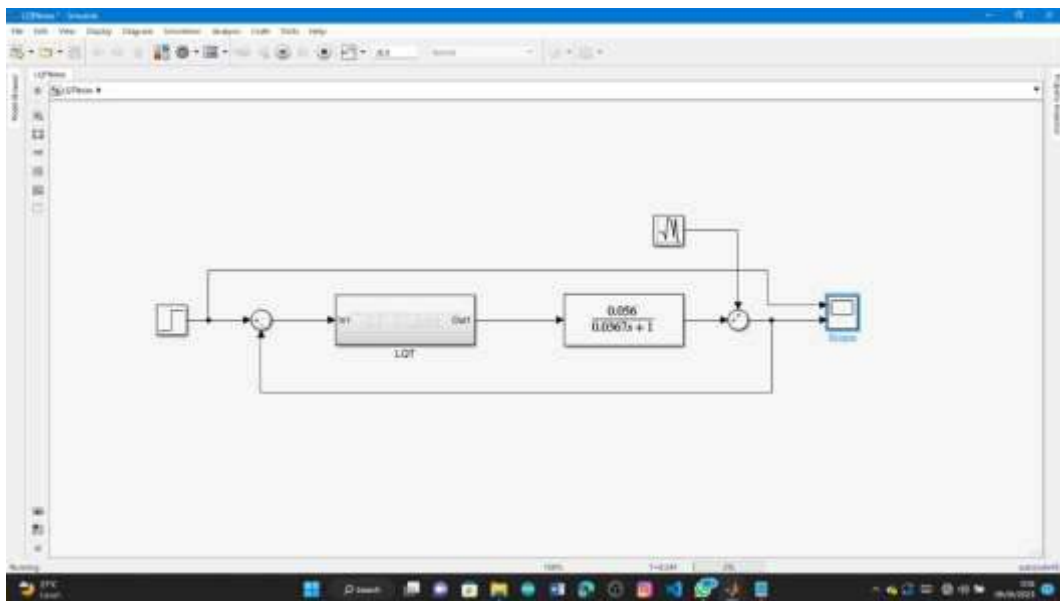
Gambar 2.11

Rangkaian LQT tanpa Noise



Gambar 2.12

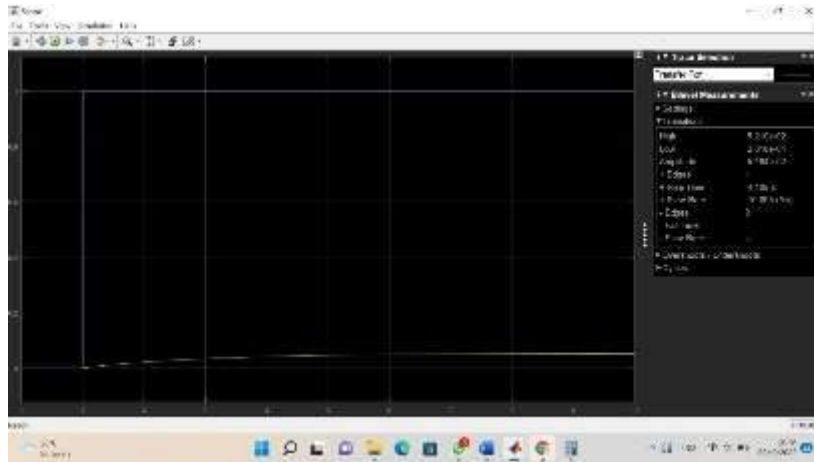
Rangkaian LQT dengan Noise



Gambar 2.13

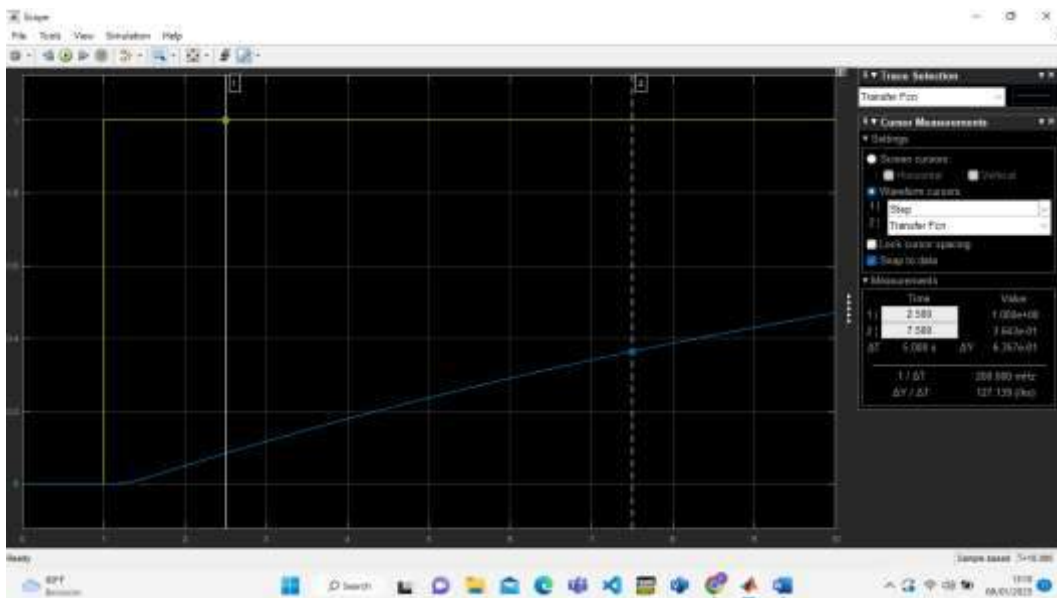
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Motor DC FAPG36-BL3650 Orde 1



Gambar 2.14 Tampilan Step Response

Pada Gambar 3.1 merupakan tampilan *step response* dari motor DC FAPG36-BL3650 Pada SISO berorde satu tanpa *noise* didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,124 (tidak mencapai *set point*) dengan *rise time* 5,497s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 1.985%.



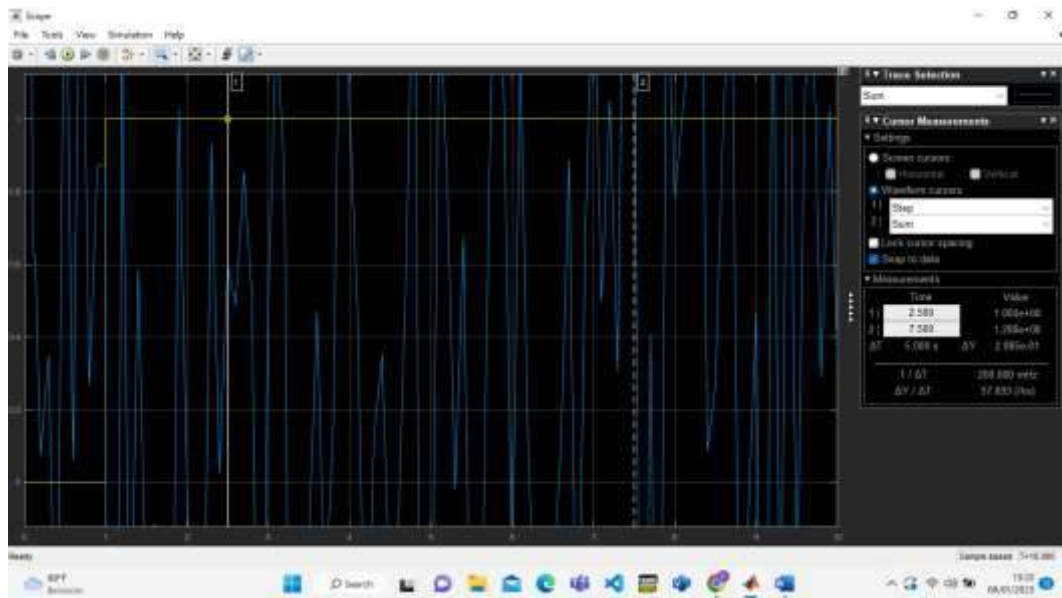
Gambar 2.15

K. 3.2 Hasil Simulasi LQR tanpa Noise

Gambar 3. Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

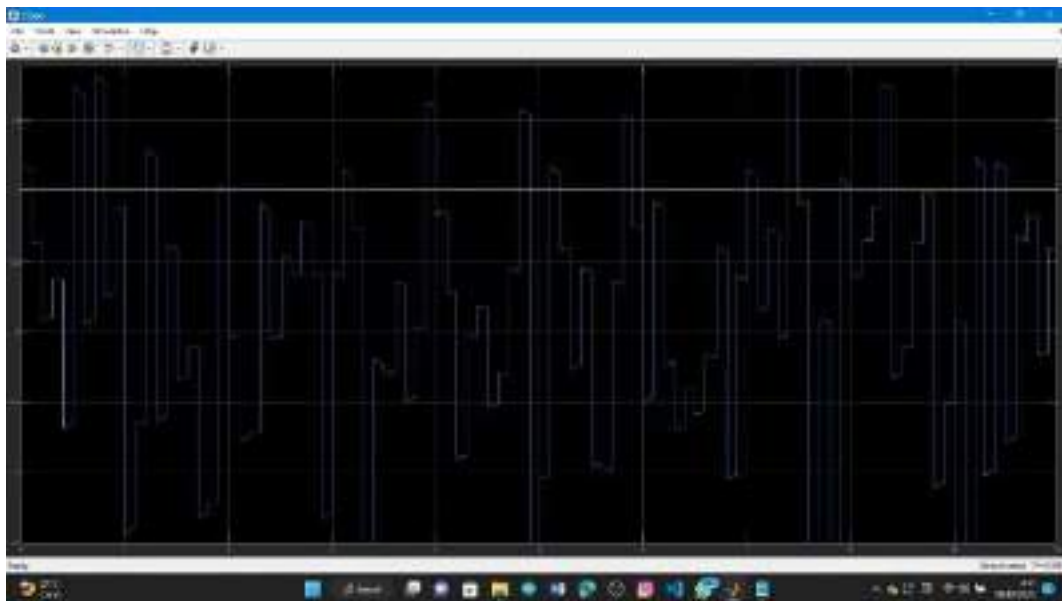
Pada Gambar 3.2 merupakan tampilan *step response* dari motor DC FAPG36-BL3650 LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC FAPG36-BL3650 mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil di angka 0.505%.

L. 3.3 Hasil Simulasi LQR dengan Noise

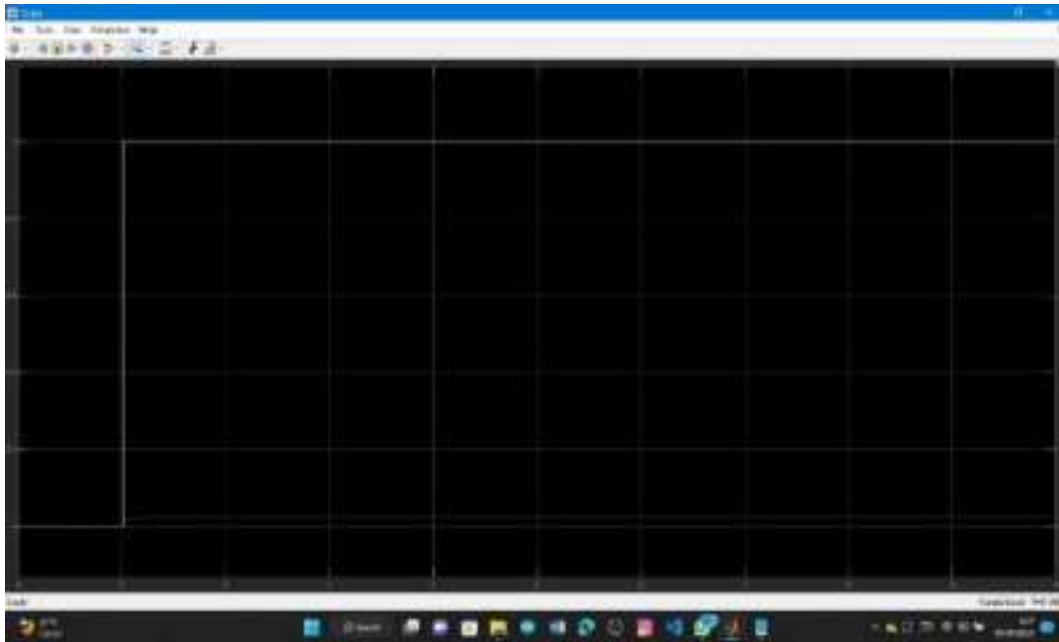


Gambar 2.16 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Pada Gambar 3.3 merupakan tampilan *step response* dari motor DC FAPG36-BL3650 LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC FAPG36-BL3650 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 0,67 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 52.720ms dan memiliki *overshoot* sebesar 102.942% serta *undershoot* diangka -87.686%



Gambar 2.17



Gambar 2.18

3.4 Hasil Simulasi LQT

Tanpa Noise

Dengan Noise

Gambar 3. 4 Hasil Simulasi LQT dengan *Noise dan Tanpa Noise*

Berdasarkan hasil yang ditampilkan oleh scope dapat dikatakan bahwa keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC noise ini mencapai *set point* yang diinginkan, tetapi terdapat tambahan dari input noise dan mengakibatkan grafik tidak beratur. Grafik yang berwarna kuning merupakan nilai *input* dari *step*. Sedangkan grafik berwarna biru merupakan keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC noise.

M. Kesimpulan

$$G(s) = 0,0560,0367s + 1 \quad (13)$$

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan *datasheet* motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan *transfer function* dan dengan hasil *run script* matlab LQR didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada *workspace*.

Hasil *step response* dari motor DC FAPG36-BL3650 berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,124 dalam artian mencapai *setpoint* sebesar 1 dengan rise time 5,497s dan sistem mengalami overshoot sebesar 0,501% dan undershoot 1.985%. Sedangkan *output step response* dari LQR motor DC FAPG36-BL3650 mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*.

Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil *step response* kedua sistem bahwa sistem motor DC FAPG36-BL3650 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor DC FAPG36-BL3650 orde 1 karena dengan menggunakan LQR, *step response* dari motor DC FAPG36-BL3650 dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang stabil, memiliki *rise time* yang cepat, serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* dengan nilai yang kecil.

Dalam melakukan simulasi Simulink pada *software* MATLAB diperlukan fungsi transfer yang didapat dari pemodelan motor DC orde 1 untuk mengetahui *step response* dari sistem LQR & LQT motor DC. Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 diperlukan *datasheet* motor DC yang mendukung. Pada percobaan ini menggunakan *datasheet* dari motor DC FAPG36-BL3650. Hasil simulasi dari sistem LQR & LQT dengan menggunakan fungsi transfer dari pemodelan matematis motor DC FAPG36-BL3650 orde 1 memiliki keluaran *set point* yang diinginkan

Daftar Pustaka

- [1] Utomo, AP, Apriani, M, Ruddianto, R, Suhardjito, G, Wibawa, IPA and "Pelatihan Pembuatan Miniatur Kapal Berdasar Standar Desain Berbahan Fiberglass Reinforced Plastic (FRP) untuk Kelompok Pengrajin di Wilayah Pantai Situbondo." INTEGRITAS: Jurnal Pengabdian 7.2, 2023, pp. 391-402.
- [2] Jamil, MH, Rukka, RM, Tenriawaru, AN, Achmad, R, Nugraha, AT and "The existence of rice fields in Makassar City." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 681.1, 2021, p. 12091.
- [3] Firdaus, AA, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Design and Development of a Prototype System for Temperature and Water Level Control in an Extruder Machine." Journal of Electrical, Marine and Its Application 1.1, 2023, pp. 1-7.
- [4] Nugraha, MT Anggara Trisna and S.T. "Elektronika Daya Dan Penggerak Listrik." ID Patent EC00,202,201,816, 2022
- [5] Najmurokhman, A, Nugraha, A, Kusnandar, UK and Wibowo, B. "Perancangan dan Realisasi Sistem Pendeteksi Objek menggunakan Perangkat Lunak Python 2.7." LPPM UNJANI, 2017
- [6] Nugraha, AT, Ravi, AM and Priyambodo, D. "Optimization of Targeting Rocket Launchers with Wheeled Robots." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [7] Cahyono, L, Apriani, M, Nugraha, AT and Utomo, AP. "TIME RISK ANALYSIS OF IMPLEMENTATION SELF-MANAGED COMMUNITY PROJECT IN KALIANYAR-BANGIL VILLAGE." Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil 11.2, 2022, pp. 142-151.
- [8] Amelia, SR, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Prototipe Sistem Automatic Switch pada Sistem Redundant Pump Cooling Tower Berbasis Mikrokontroler." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 10.2, 2020, pp. 52-60.
- [9] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Optimization of Application Control Using LQR and LQT Approaches: A Study on Community-Based Development Programs." Maritime in Community Service and Empowerment 1.1, 2023, pp. 9-17.

- [10] Rafsanjani, E, Pudji, A, Indrato, TB, Yan, S and Bogavev, SA. "A Modified Electrosurgery Unit Based on High Frequency Design with Monopolar and Bipolar Method." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2021
- [11] Ningsih, SR, Budi, AHS, Nugraha, AT and Winata, T. "Automatic farmer pest repellent with Arduino ATmega2560 based on sound displacement technique." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 850.1, 2020, p. 12034.
- [12] Nugraha, AT. "Penggunaan Algoritma Interferensi Dan Observasi Pada Sistem Pelacak Titik Daya Maksimum Pada Sel Surya Menggunakan Konverter DC-DC Photovoltaics." Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi 1.1, 2021, pp. 10-19.
- [13] Ferdinandus, AR Andrew, Nugraha, AT and Jamaaluddin, J. "Setting Neuro-Fuzzy PID Control In Plant Nonlinear Active Suspension." Journal of Physics: Conference Series 1114.1, 2018, p. 12063.
- [14] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Design of a monitoring system for hydroganics based on arduino uno R3 to realize sustainable development goals number 2 zero hunger." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [15] Jamaludin, M and Nugraha, AT. "Optimizing the Output System of PG36M555 DC Carbon-Brush Motors Using LQR and LQT Methods in MATLAB Simulink." Journal of Electrical, Marine and Its Application 1.1, 2023, pp. 1-8.
- [16] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Distributed Panel-based Fire Alarm Design." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2022
- [17] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "SISTEM KONTROL KESTABILAN PADA MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 23-30.
- [18] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Gas Pressure Measurement On Rocket Chamber Based On Strain Gauge Sensor." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [19] Nugraha, AT, Pratiwi, OD and Setiyoko, AS. "Simulasi gangguan saat terjadi gangguan undervoltage dan unbalance load pada sub-sub distribusi panel." MEDIA ELEKTRIKA Учредители: LPPM Universitas Muhammadiyah Semarang 16.2, 2024, p. 162.
- [20] Nugraha, AT. "Desain kontrol path following quadcopter dengan command generator tracker model following." Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017

BAB III

Implementasi Pendekatan LQR dan LQT pada Optimalisasi Motor DC BSG - 23

Oleh: **Muhamad Khoirun Nasikhin**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: Motor DC, Pengendalian, LQR

DC motor applications are very widely used, because DC motors are very suitable for applications, especially control, so it takes the right DC motor controller design, the role of automatic control systems is the most important in various needs of people or countries with advanced civilizations. Specific examples can be found in spacecraft controls, guided missiles, aircraft control systems, satellites, etc. While in industry, it is necessary to control production machines during the production process and control such as pressure, temperature, flow, friction, humidity, and others. The issue of optimal control has received great attention at this time, this is due to the increasing need for an efficient system. The control system optimization concept compromises performance choices and technical specifications to create an optimal control system within physical limits. When dealing with an optimal control system, it is desirable to find rules for making decisions about the control system that will minimize deviations from its ideal behavior. Some control systems that are widely used for example by using LQR or Linear Quadratic Regulator.

Abstrak

Aplikasi motor DC sangat banyak digunakan, karena motor DC sangat cocok untuk aplikasi terutama pengontrolan, sehingga dibutuhkan desain kontroler motor DC yang tepat, peran sistem kontrol otomatis paling penting dalam berbagai kebutuhan orang atau negara dengan peradaban maju. Contoh spesifik dapat ditemukan dalam kontrol pesawat ruang angkasa, peluru kendali, sistem kontrol pesawat, satelit, dll. Sedangkan dalam industri diperlukan pengendalian mesin-mesin produksi selama proses produksi dan pengendalian seperti tekanan, temperatur, aliran, gesekan, kelembaban, dan lain-lain. Isu pengendalian optimal mendapat perhatian yang besar saat ini, hal ini disebabkan oleh semakin meningkatnya kebutuhan akan sistem yang efisien. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pilihan kinerja dan spesifikasi teknis untuk menciptakan sistem kontrol yang optimal dalam batas fisik. Ketika berhadapan dengan sistem kontrol yang optimal, diinginkan untuk menemukan aturan untuk membuat keputusan tentang sistem kontrol yang

akan meminimalkan penyimpangan dari perilaku idealnya. Beberapa Sistem kendali yang banyak digunakan contohnya dengan menggunakan LQR atau *Linear Quadratic Regulator*.

PENDAHULUAN

Persoalan kontrol optimal telah menarik perhatian yang sangat besar pada saat ini, hal itu diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan sistem dengan performansi tinggi. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik Dalam menyelesaikan sistem kontrol optimal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya.

Pada laporan ini penulis membahas metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Regulator*) yang terkandung pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS yaitu. “Optimasi Sistem”. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, sedangkan LQT memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan T yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR dan LQT seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone quadcopter. Metode LQR ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita.

Pada mata kuliah “Optimasi Sistem” ini penulis membahas penerapan metode LQR dan LQT plant motor DC yang telah disertai datasheet. Datasheet tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan software MATLAB Simulink untuk melihat step response. Motor DC yang digunakan yaitu tipe BSG-23 yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 LQR (*Linear Quadratic Regulator*)

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Dengan

menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari *set point* yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/*noise*.

Program Script Matlab LQR

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 69.900 ; b= 0.1 ; K= 0.022 ; R= 0.10 ; L = 0.000012 ;

% J = Momeninersia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [ A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

0 1 0;

0 0 1000];

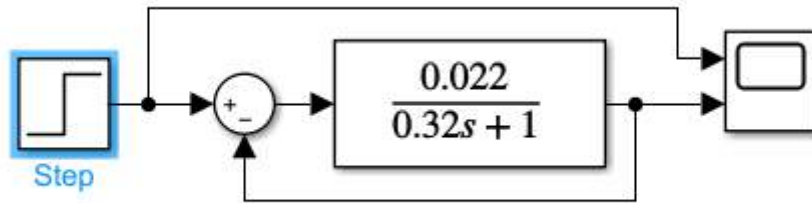
R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

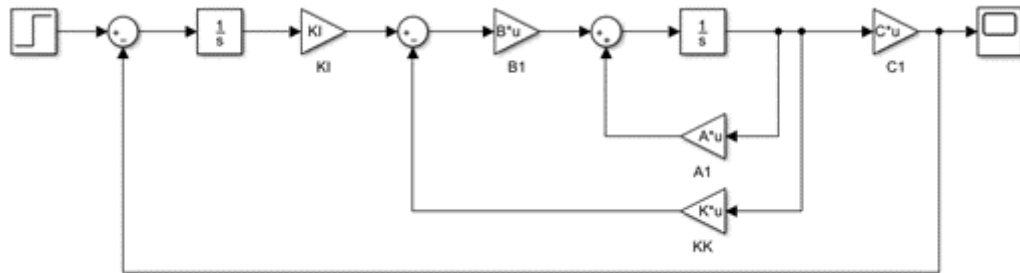
KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];
```

Rangkaian Motor DC BSG-23 Orde 1



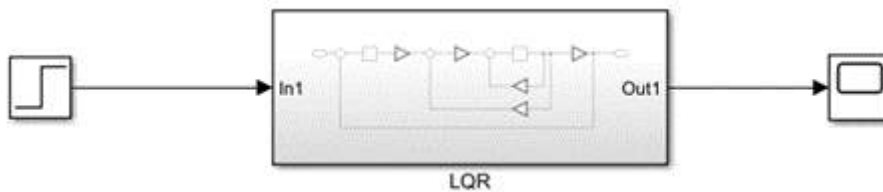
Gambar 3.1



Gambar 3.2

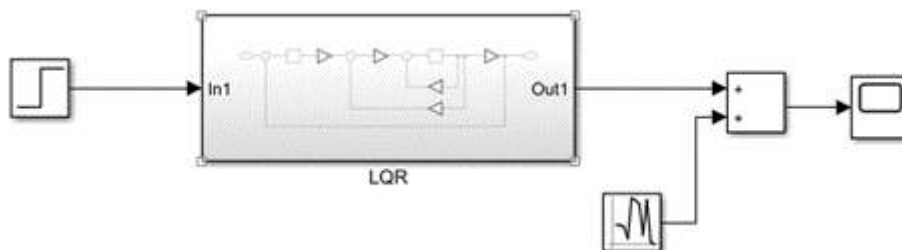
Rangkaian LQR

Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



Gambar 3.3

Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



Gambar 3.4

LQT (Linier Quadratic Tracking)

Linear Quadratic Tracking (LQT) merupakan salah satu metode kendali optimal dengan tujuan membuat keluaran sistem mengikuti referensi yang diberikan sedekat mungkin dengan memperhatikan suatu indeks performansi. Sistem yang ingin dikendalikan oleh LQT

harus sistem yang linier, namun rudal memiliki karakteristik yang non-linear, sehingga diperlukan linearisasi agar rudal dapat dikendalikan dengan LQT .Pada sistem komunikasi *noise* adalah sinyal-sinyal yang tidak diinginkan yang selalu ada dalam suatu sistem transmisi. *Noise* ini akan mengganggu kualitas dari sinyal terima yang diinginkan dan akhirnya mengganggu proses penerimaan dan pengiriman data.

Program Script Matlab LQT

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 69.900 ; b = 0.1 ; K = 0.022 ; R = 0.10 ; L = 0.000012 ;

% J = Momeninersia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

Q=10; R=0.00000000001; %0.000000000000001

W=C'*Q; %

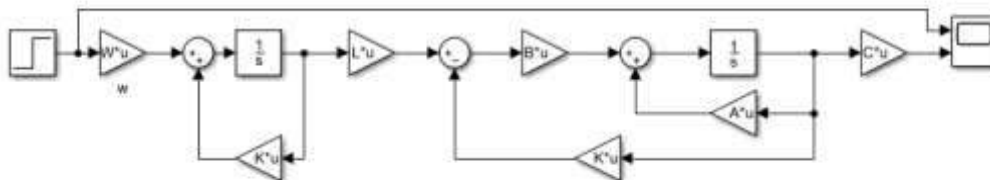
[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P

K=inv(R)*B'*S %feedback Gain

ACL=(A-B*K)';

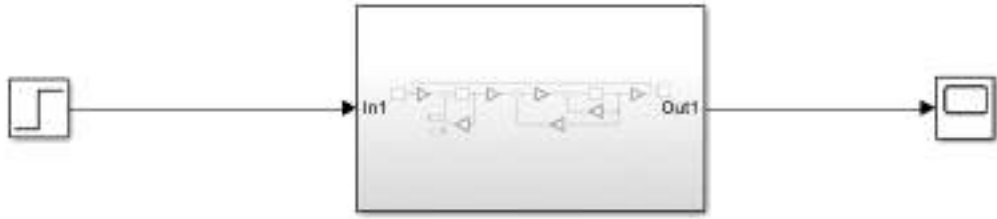
L=inv(R)*B' %model following gain
```

Rangkaian LQT



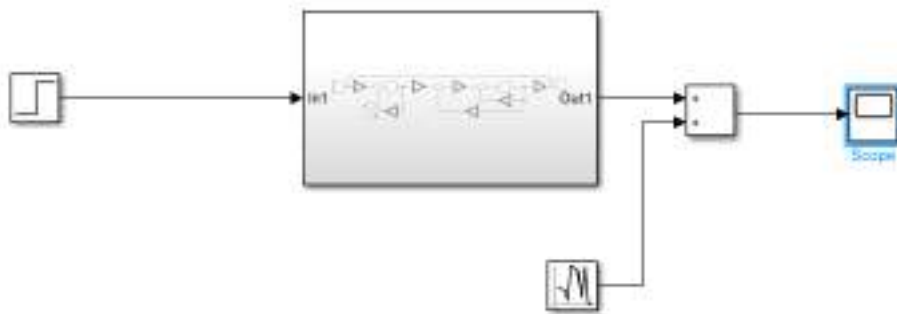
Gambar 3.5

Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 3.6

Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 3.7

Model Matematis

Spesifikasi

Momen inersia (J): 69.900kg.m²/s²

Redaman sistem mekanik (B): 0,1 Nms

Konstanta Motor (K): 0,022 Nm/A

Resistansi (R): 0,10 ohm

Induktansi (L): 0,000012 H

Pemodelan Orde 1

Bentuk umum fungsi alih orde 1

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Orde 1 Motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

Dimana sehingga

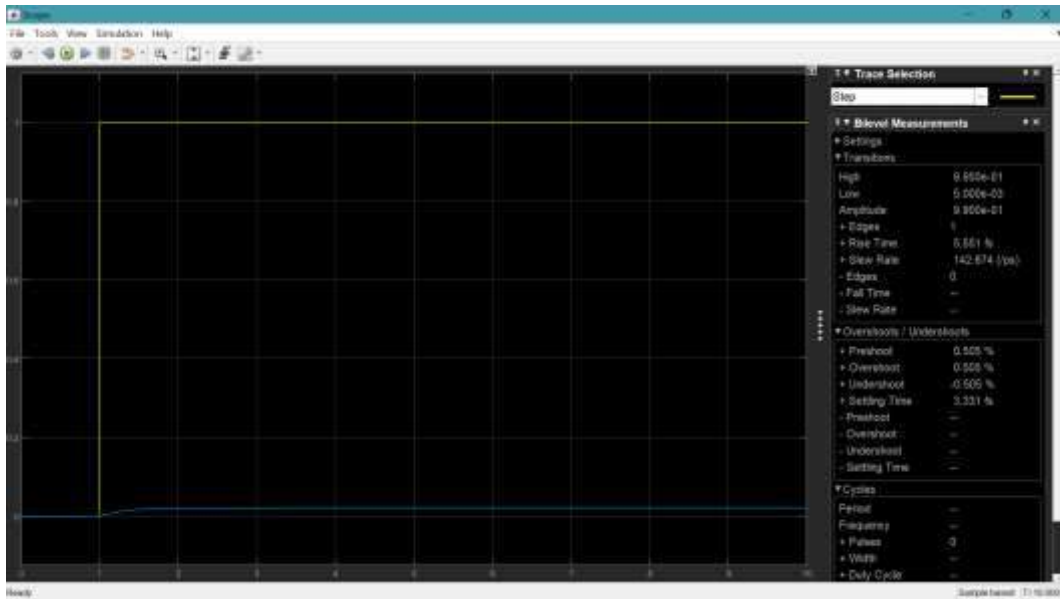
$$K = \tau i = 0,3214,0 = 0,022 \quad (3)$$

Persamaan orde 1 motor dc :

$$G(s) = 0,0220,32s + 1 \quad (4)$$

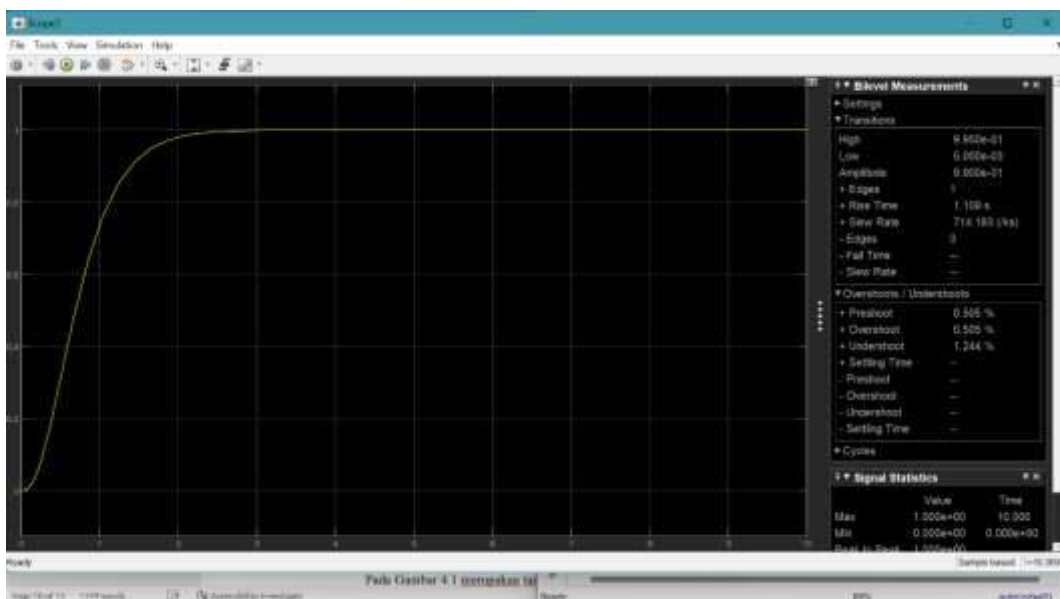
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Motor DC BSG – 23 Orde 1



Gambar 3.8 Tampilan Step Response

Pada Gambar 4.1 merupakan tampilan *step response* dari motor DC BSG – 23 Pada SISO berorde satu tanpa *noise* didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 9,90 (tidak mencapai *set point*) dengan *rise time* 5,551 fs dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,505% dan *undershoot* -0,505%.



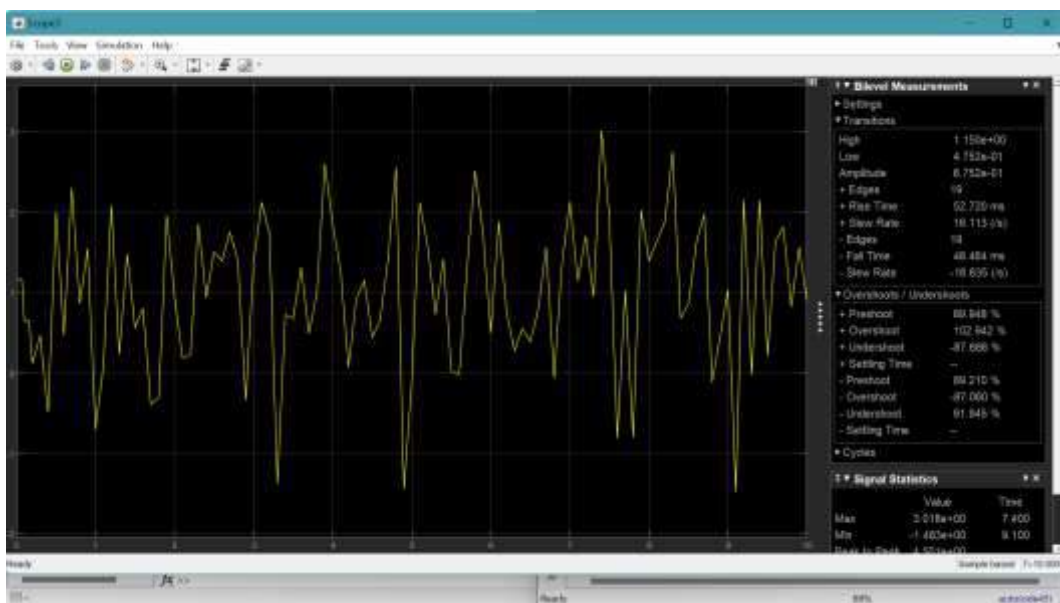
Gambar 3.9

A. 3.2 Hasil Simulasi LQR tanpa Noise

Gambar 3. Tampilan *Step Response* LQR tanpa *Noise*

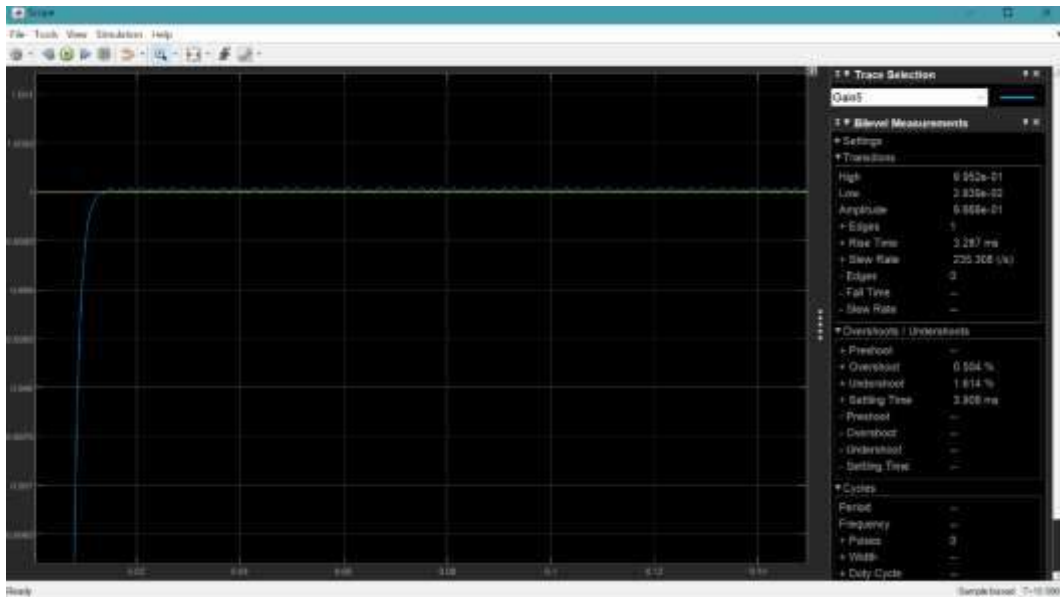
Pada Gambar 3.2 merupakan tampilan *step response* dari motor DC BSG – 23 LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC BSG – 23 mencapai amplitudo sebesar 0.99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

B. 3.3 Hasil Simulasi LQR dengan Noise



Gambar 3.10 Tampilan *Step Response* LQR dengan *Noise*

Pada Gambar 3.3 merupakan tampilan *step response* dari motor DC BSG – 23 LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC BSG – 23 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 6.75 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 52.720ms dan memiliki *overshoot* sebesar 102.942% serta *undershoot* diangka -87.686%



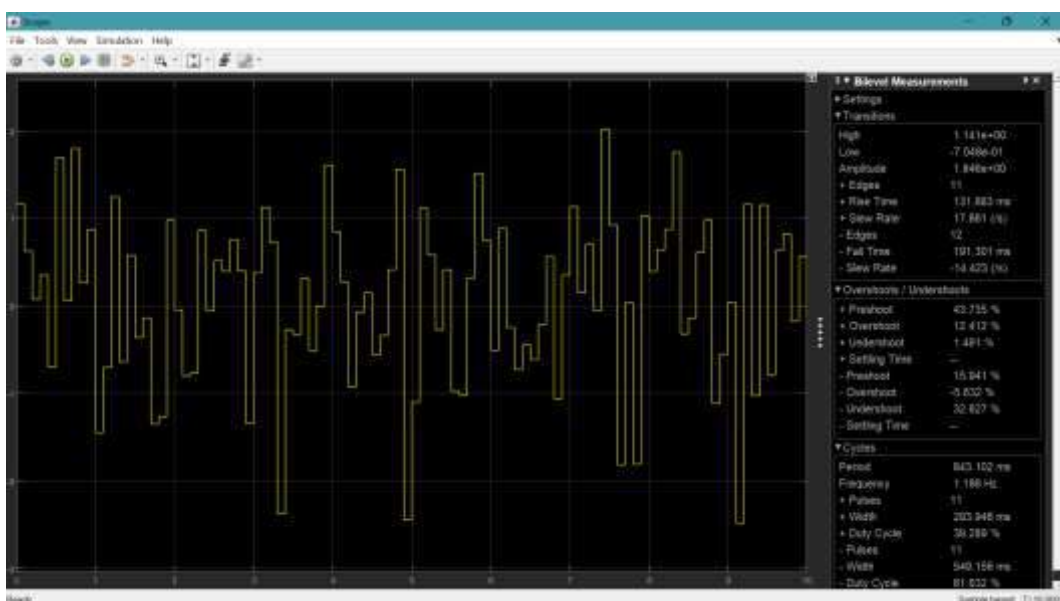
Gambar 3.11

C. 3.4 Hasil Simulasi LQT tanpa Noise

Gambar 3.4 Tampilan *Step Response* LQT tanpa *Noise*

Pada Gambar 4.2 merupakan tampilan *step response* dari motor DC BSG – 23 LQT tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQT motor DC BSG – 23 mencapai amplitudo sebesar 9.66 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 3.387ms dan memiliki *overshoot* di angka 0.504% dan *undershoot* di angka 1.614%.

D. 3.5 Hasil Simulasi LQT dengan Noise



Gambar 3.12 Tampilan *Step Response* LQT dengan *Noise*

Pada Gambar 3.5 merupakan tampilan *step response* dari motor DC BSG – 23 LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQT motor DC BSG – 23 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 1.84 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 131.883ms dan memiliki *overshoot* sebesar 12.412% serta *undershoot* diangka 32.627%

Tabel 3.1

No	Model Sistem	Amplitudo	Rise Time	Overshoot	Undershoot
1	LQR tanpa Noise	0,99	1.109 s	0,505%	0,505%
2	LQR dengan Noise	6,75	52.720ms	102,942%	-87,686%
3	LQT tanpa Noise	9,66	3.387ms	0,504%	1.614%
4	LQt dengan Noise	1.84	131.883ms	12.412%	32.627%

E. Kesimpulan

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan datasheet motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan transfer function $G(s) = 0,022/(0,32s + 1)$ dan dengan hasil run script matlab LQR dan LQT didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada workspace.

Hasil *step response* dari motor DC BSG - 23 berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,124 dalam artian mencapai *setpoint* sebesar 1 dengan *rise time* 5.551s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 1.985%. Sedangkan *output step response* dari LQR motor DC BSG - 23 mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1.109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%. Untuk *step response* dari sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari LQR yaitu mencapai amplitudo sebesar 0.99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang lebih maksimal dari *rise time step response* LQR tanpa *noise* di angka 1.109 ms dan memiliki *overshoot* 0.5% serta *undershoot* 0.5%.

Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil step response kedua sistem bahwa sistem motor DC BSG - 23 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor DC BSG - 23 orde 1 karena dengan menggunakan LQR, step response dari motor DC BSG - 23 dapat mencapai set point, memiliki grafik yang stabil, memiliki rise time yang cepat, serta memiliki overshoot dan undershoot dengan nilai yang kecil. Namun step response yang dihasilkan sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari kedua sistem tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] Elmi, H, Edy, S, Juniani, AI and Amelia, P. "Utilizing total dissolved solids (TDS) sensor for dissolved solids measurement in the water." *JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization* 7.1, 2024, pp. 22-30.
- [2] Nugraha, AT, Pratiwi, OD and Setiyoko, AS. "Simulasi gangguan saat terjadi gangguan undervoltage dan unbalance load pada sub-sub distribusi panel." *MEDIA ELEKTRIKA Учредители: LPPM Universitas Muhammadiyah Semarang* 16.2, 2024, p. 162.
- [3] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [4] ad, RF As' and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Penstabil Kinerja Panel Hubung Bagi Tegangan Rendah." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022
- [5] Zaibah, S and Nugraha, AT. "Pembangkit Energi Listrik Pico Hydro Terapung Menggunakan Underwater Turbine Untuk Mendukung Pemenuhan Rasio Elektrifikas Dan Energi Listrik Di Daerah 3t." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [6] Nugraha, AT, Sa'diyah, A, Indaryani, S, Shiddiq, RF Muhammad Jafar and "Buku Sepeda Treadmill: Inovasi dan Desain.", 2023
- [7] Pambudi, DSA, Angga, ATN, Utomo, AP, Ahmad, MM, Tiwana, MZA and "Main Engine Water Cooling Failure Monitoring and Detection on Ships using Interface Modbus Communication." *Applied Technology and Computing Science Journal* 4.2, 2021, pp. 91-101.
- [8] Sheila, SY, As'ad, RF, Rochmawati, NW, Riyadi, F and Nugraha, AT. "RANCANG BANGUN Alat Optimalisasi Suhu Dan Kelembaban Kubikel Tegangan Menengah Untuk Meminimalisir Terjadinya Corona Disease Dengan Metode Fuzzy Berbasis Plc." *ID Patent EC00,202,294,998*, 2022
- [9] Sugianto, MGPA and Nugraha, AT. "Implementasi sensor cahaya sebagai level bahan bakar pada tangki harian kapal." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022
- [10] Anjarsari, N, Widodo, HA, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Implementation of DC Motor Speed Control Using Distance Sensor on Harbour Mobile Crane." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 1.1, 2023, pp. 1-9.
- [11] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L and Utomo, AP. "Eco Friendly Artificial Coral Reefs Melalui Recovery Limbah Cangkang Kerang Di Pantai Mutiara Desa Wisata." *ID Patent EC00,202,300,075*, 2023
- [12] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "IMPLEMENTASI PENGATUR TEGANGAN AC SATU FASA UNTUK MENGATUR KECERAHAN LAMPU PIJAR." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 35-38.
- [13] Nugraha, AT, Firdaus, AA, Sobhita, RA and Wicaksono, Z. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2, 2025, pp. 14-25.

- [14] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Design of pond water turbidity monitoring system in arduino-based catfish cultivation to support sustainable development goals 2030 No. 9 industry, innovation, and infrastructure." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [15] Saputra, FY, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Firdaus, AA. "Efficiency Of Generator Set On Changes In Electrical Load On Fishery Vessels." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.2, 2024, pp. 1-4.
- [16] Nugraha, AT. "Penggunaan Algoritma Interferensi Dan Observasi Pada Sistem Pelacak Titik Daya Maksimum Pada Sel Surya Menggunakan Konverter DC-DC Photovoltaics." *Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi* 1.1, 2021, pp. 10-19.
- [17] Nugraha, AT. "Slip Control Design On Electrical Wheel Haul Truck-Based Sliding Mode Control." *MISEIC* 2018, 2018
- [18] Sasongko, A, Nugraha, AT, Anshory, I, Rahim, R, Khuwaja, KSA and "Estimation of the thrust coefficient of a Quadcopter Propeller using Computational Fluid Dynamics."
- [19] Utomo, AP, Apriani, M, Ruddianto, R, Cahyono, L, Nugraha, AT and Nugroho, MI. "Pelatihan Pembuatan Terumbu Buatan Berbasis Eco-friendly sebagai Sarana Rehabilitasi Terumbu Karang di Daerah Pantai Wisata Pasir Putih, Situbondo." *INTEGRITAS: Jurnal Pengabdian* 5.2, 2021, pp. 299-312.
- [20] Nugraha, AT. "Dirty air filter system using boxed equalizer mq-8 and mq-9 wheeled robot." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...)*, 2018

BAB IV

Kajian Simulasi LQR & LQT (Linear Quadratic Regulator & Linear Quadratic Tracking) dengan Plant Motor DC M644E

Oleh: **Muhammad Adimassyah**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: Motor DC, Linear Quadratic Regulator (LQR), Linear Quadratic Tracking (LQT), Simulink, Matlab

In this modern era, the rapid development of renewable technologies is of course made by humans, one of the methods used by humans to make technology is system optimization. System optimization is a method that is carried out to provide the best-desired results, system optimization is the same as a control system, which makes a system designed to replace the previous human function as a driver. And several system optimization circuits, namely LQR (Linear Quadratic Regulator) and LQT (Linear Quadratic Tracking) circuits, LQR, and LQT have different functions. LQT is used to find the optimal solution to the regulator problem which aims to stabilize the system with the variable/output to keep it small, while LQR is used to find the optimal solution to the tracking problem which aims to force the output of the system so that the output is produced according to the desired trajectory. This paper will discuss the optimal control system for LQR and LQT with a plant on a DC BN28 motor.

Di era modern ini semakin berkembang pesatnya teknologi – teknologi terbaru yang tentunya dibuat oleh manusia, salah satu metode yang digunakan manusia untuk membuat teknologi yaitu optimasi sistem. Optimasi sistem merupakan suatu cara yang dilakukan untuk memberikan hasil terbaik yang diinginkan, optimasi sistem sama saja dengan sistem kendali, dimana membuat suatu rancangan sistem untuk menggantikan fungsi manusia yang sebelumnya sebagai penggerak. Dan beberapa rangkaian optimasi sistem yaitu rangkaian LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*), LQR dan LQT memiliki fungsi yang berbeda. LQT digunakan untuk mencari solusi optimal masalah regulator yang bertujuan untuk menstabilkan sistem dengan variabel/output agar tetap kecil, sedangkan LQR digunakan untuk mencari solusi optimal pada masalah *tracking* yang bertujuan untuk memaksa output dari sistem agar output yang dihasilkan sesuai *trajectory* yang diinginkan. Pada paper ini akan membahas sistem kendali optimal LQR dan LQT dengan *plant* pada motor DC M644E.

A. Pendahuluan

Teknik optimasi merupakan suatu cara yang dilakukan untuk memberikan hasil terbaik yang diinginkan, (Anthony, 2014). Menurut, Sugioko (2013) mengatakan bahwa Optimasi adalah suatu disiplin ilmu dalam matematika yang fokus untuk mendapatkan nilai minimum atau maksimum secara matematis dari suatu fungsi, peluang maupun pencarian nilai lainnya dalam berbagai kasus. Jadi dapat disimpulkan bahwa optimasi sistem merupakan suatu metode atau sistem yang digunakan manusia untuk membuat suatu kontrol sistem yang ditujukan untuk memberikan hasil yang maksimal sesuai keinginan.

Pada mata kuliah “Optimasi Sistem” ini penulis membahas penerapan metode LQR plant motor DC yang telah disertai *datasheet*. *Datasheet* tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan *software* MATLAB Simulink untuk melihat *step response*. Motor DC yang digunakan yaitu tipe M644E yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.

Melalui paper ini juga akan terdapat penjelasan mengenai perbandingan antara gambar grafik sinyal yang dihasilkan oleh scope dari rangkaian LQR dan LQT baik dengan noise maupun tidak menggunakan noise. Yang akan dibahas lebih jauh lagi pada paper ini efektivitas rangkaian LQR dan LQT untuk diterapkan pada sebuah sistem agar menjadi suatu sistem yang optimal dan sesuai keinginan.

B. Metodologi Penelitian

C. 2.1 Tahapan Penelitian

Penulis melakukan praktikum Optimasi Sistem menggunakan *Software* Matlab untuk membuat rangkaian dengan Simulink, sebelum membuat rangkaian akan membuat *coding* pada Script Matlab dan memerlukan *Datasheet*, dari hasil tersebut akan dibuat rangkaian pada Simulink Matlab.

D. 2.1.1. Identifikasi Masalah

Pada saat melakukan praktikum terkadang kurang teliti dalam memilah motor DC karena ada beberapa motor DC yang tidak lengkap dan pembacaan *datasheet*, *datasheet* yang kurang lengkap juga mengharuskan kita mencari rumus yang lain pada jurnal. Masalah lain yang dihadapi yaitu minimnya artikel atau jurnal mengenai rangkaian, jadi harus mencari jurnal internasional yang tepat serta pemahaman rangkaian agar tidak terjadi kesalahan.

E. 2.1.2. Penetapan Masalah

Pada tahap ini dapat di tetapkan bahwa permasalahan ketika menentukan *coding* dan menggunakan software. Mencari datasheet yang lengkap akan memudahkan dalam perhitungan.

F. 2.1.3. Studi Literatur

Dalam mengumpulkan literatur–literatur sebagai bahan penunjang proses penyelesaian masalah bisa didapatkan melalui buku, referensi, dan jurnal penelitian.

G. 2.2 Metode Penyelesaian Masalah

Metode penyelesaian masalah ini dijelaskan dengan rinci pada bagian tabel, berisi langkah-langkah penyelesaian yang akan membantu dalam mempermudah membuat artikel. Metode penyelesaian masalah akan disajikan dalam Tabel 2.1 dibawah ini

Tabel 4.1 Metode Penyelesaian Masalah Motor DC

No.	Langkah-langkah	Penjelasan
1.	Mencari Motor DC yang sesuai dengan pembuatan artikel	Penulis menggunakan type Motor DC M644E
2.	Membuat coding LQR & LQT dengan memerhatikan datasheet	Coding LQR & LQT bisa didapatkan pada artikel atau YouTube
3.	Membuat rangkaian LQR & LQT normal pada Simulink	Rangkaian harus dibuat dengan teliti
4.	Membuat rangkaian LQR & LQT Simulink pada kondisi noise	Rangkaian harus dibuat dengan teliti
5.	Menuliskan kesimpulan apabila semua simulasi sudah dilakukan	Kesimpulan didapat apabila telah melakukan semua simulasi, membandingkan simulasi pada kondisi normal dan kondisi noise

Langkah-langkah penyelesaian masalah diatas diperlukan dalam sebuah menyusun artikel, karena tanpa ada persiapan maka akan terjadi kesalahan dalam perhitungan, membuat rangkaian, ataupun artikel.

H. 2.3LQR (Linear Quadratic Regulator)

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Dengan

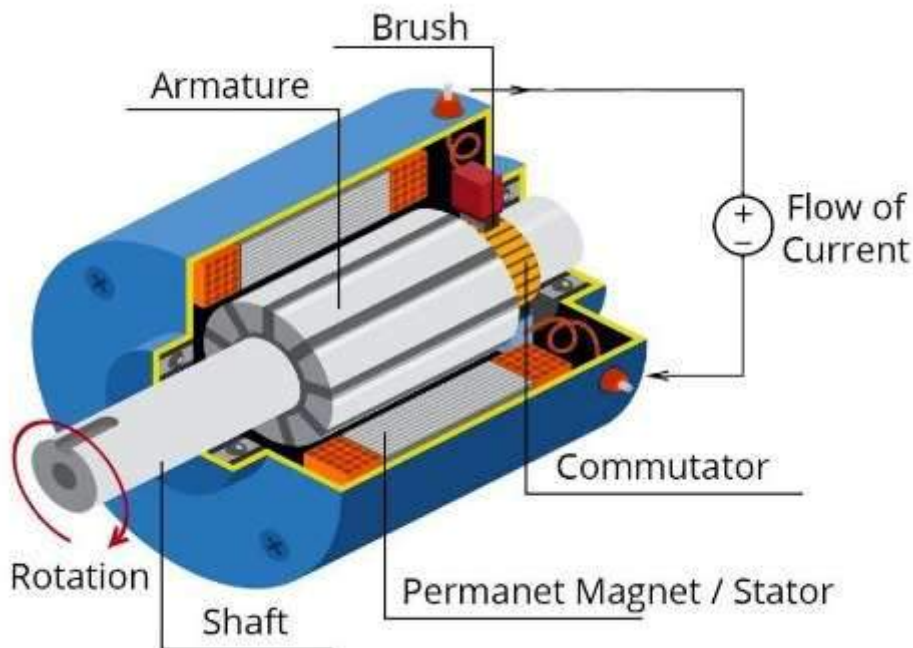
menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari *set point* yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/*noise*.

I. 2.4 LQT (Linear Quadratic Regulator)

Linear Quadratic Regulator (LQR) merupakan salah satu metoda kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Tidak seperti pengontrol Proporsional-Integral-Derivatif (PID) yang memiliki metoda penalaan dengan pendekatan sistematis seperti Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon, pengontrol LQR tidak memiliki metode penalaan khusus secara sistematis untuk menentukan matriks bobot Q dan R.

J. 2.5 Motor DC

Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai tegangan arus searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi gerak mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Konstruksi motor DC seperti pada Gambar 2.5.

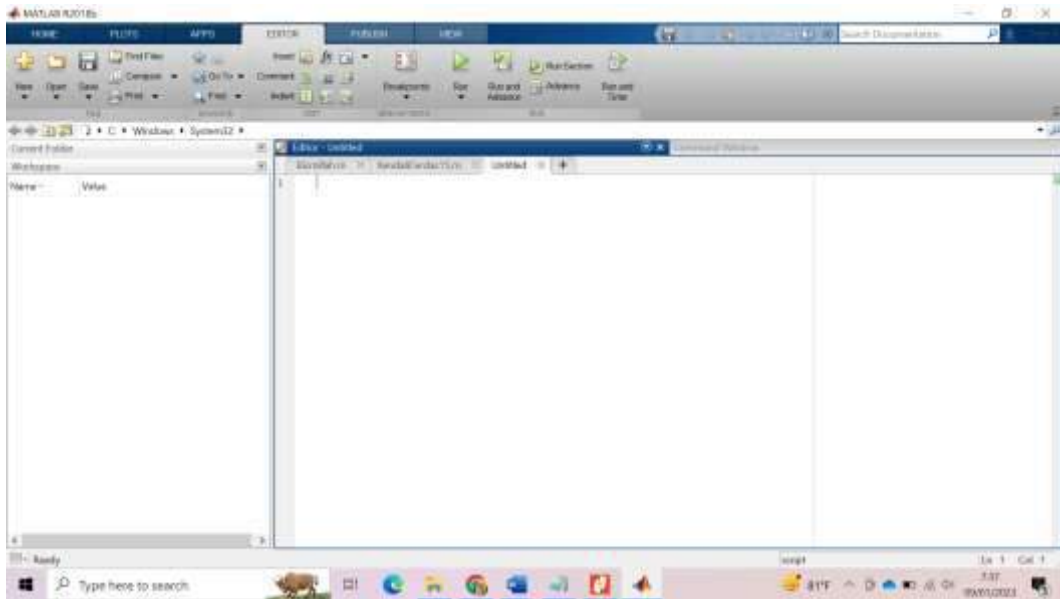


Gambar 4.1 Konstruksi Motor DC

K. 2.6 Software MATLAB

MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta

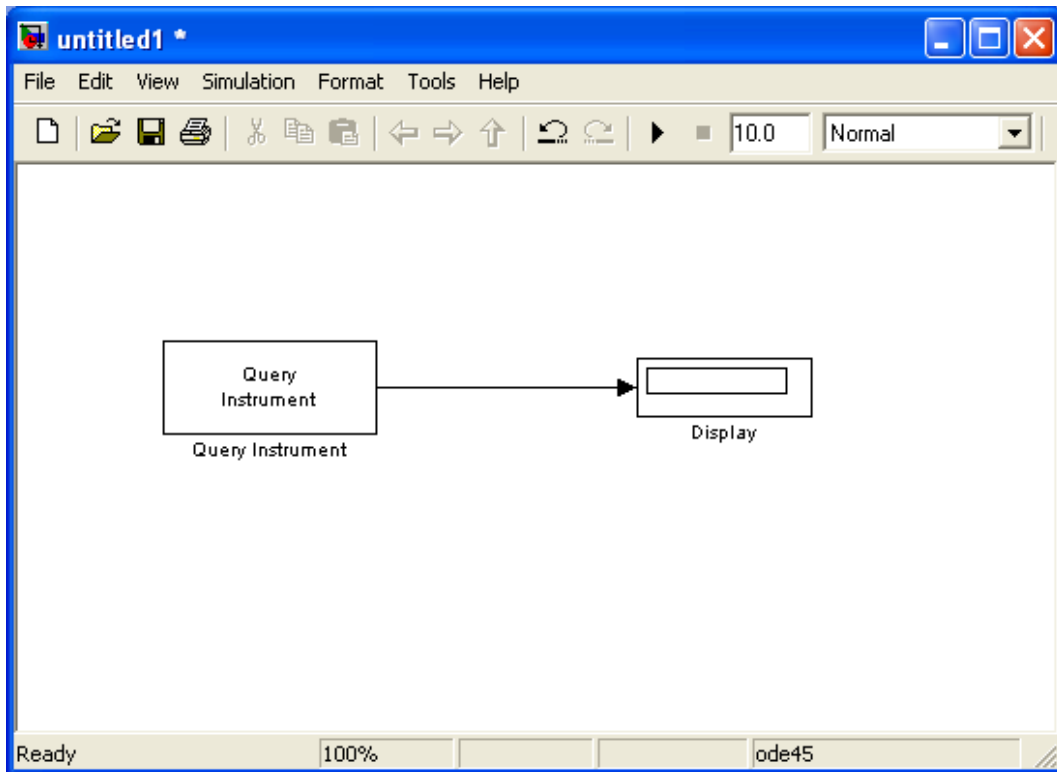
menciptakan pemodelan dan aplikasi. Tampilan *software* MATLAB seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 4.2 Tampilan MATLAB

Pada simulasi untuk melihat respon yang dihasilkan oleh motor DC penulis menggunakan fitur Simulink pada MATLAB. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis.

Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 4.3 Tampilan Simulink MATLAB

L. 2.7Pemodelan Motor DC M644E

Specification: dc servo motor M600 series

Specification	Units	Servo motors		Motor-tacho	
		M642E	M644E	M642TE	M644TE
Maximum Voltage	Vdc	60	60	60	60
Typical Voltage	Vdc	24	50	24	50
Maximum Continuous Output Power	Watts	150	440	150	440
Maximum No-load speed	rpm	4000	4000	4000	4000
Typical speed @ rated torque	rpm	2250	3000	2250	3000
Rated Torque	Nm	0.65	1.4	0.65	1.4
Maximum Peak Torque	Nm	3.3	6.36	3.3	6.36
Typical No load current	Amps	0.5	0.30	0.5	0.30
Rotor Inertia	kgcm ²	1.2	2.4	1.3	2.6
Mechanical time constant	milli secs	8.1	6.5	8.1	6.8
Torque Constant	Nm / A	0.0816	0.130	0.0816	0.130
Voltage Constant	V / 1000 rpm	8.6	13.4	8.6	13.4
Terminal Resistance	Ohms	0.6	0.46	0.6	0.46
Rotor inductance	mH	0.42	0.64	0.42	0.64
Commutation		copper-graphite			
Bearings		pre-loaded ball			
Maximum radial load		45 N			
Maximum axial load		130N			
Tacho Specification					
Voltage constant	V/1000 rpm			14 ± 10%	
Average ripple	peak / peak			0.7 @ 1000 rpm	
Ripple frequency	Per rev.			21	
Rotor resistance	Ohms			600-800	
Max. continuous speed	rpm			4,000	

Gambar 4.4 Datasheet Motor DC tipe M644E

Momen inersia (J): 2.4 kg.m²/s²

Redaman sistem mekanik (B): 0.01 Nms

Konstanta Motor (K): 0.130 Nm/A

Resistansi (R): 0.46 ohm

Induktansi (L): 0.00064 H

Dari *datasheet* dapat di tentukan pula model matematis sistem orde satu dari motor DC M644E. Sistem orde satu merupakan suatu sistem yang di dalamnya terdapat perubahan satu kali. Berikut rincian pemodelan sistem orde satu.

Berdasarkan datsheet motor DC, maka diperoleh persamaan orde 1 :

Dimana $\tau = K \cdot L$, Sehingga

$$K = \tau i = 1,478 = 0,184 \quad (1)$$

Keterangan :

$$Gs = \quad (2)$$

Gain

= Arus

= Torsi

= Konstanta

Persamaan Orde 1 :

$$Gs = Kzs + 1 \quad (3)$$

$$Gs = 0,1841,47s + 1 \quad (4)$$

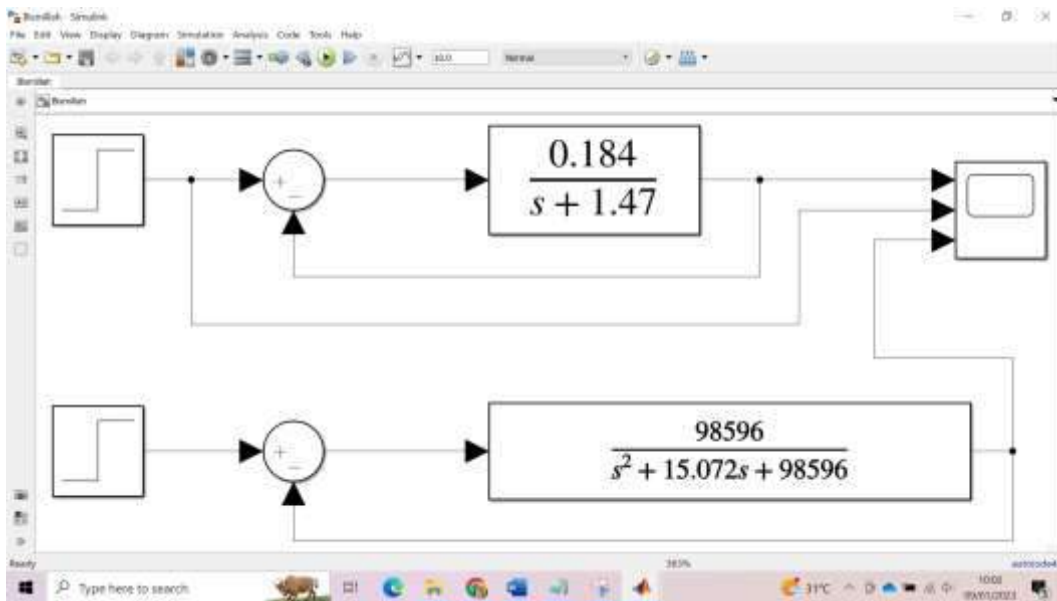
M. 2.8 Perancangan LQR Motor DC FAPG36-BL3650 pada Simulink

N. 2.8.1Daftar komponen

Tabel 4.2

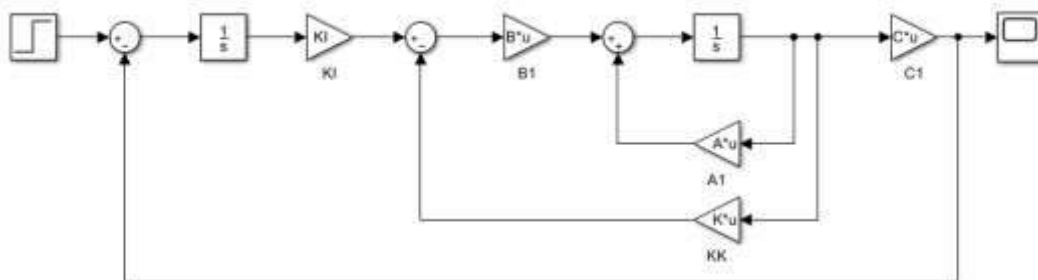
Gambar 2.8.1 Komponen Simulink

O. 2.8.2 Rangkaian Motor DC M644E Orde 1 & 2



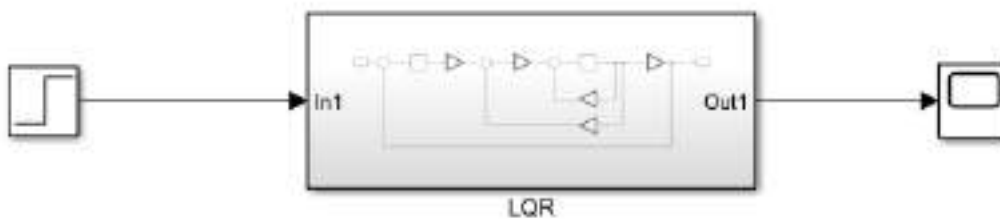
Gambar 4.5 Rangkaian Orde 1 & 2 M644E

P. 2.8.3 Rangkaian LQR



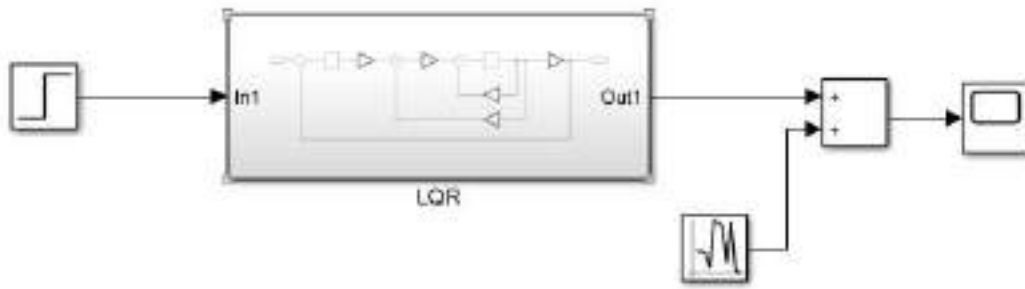
Gambar 4.6 Rangkaian LQR

Q. 2.8.4 Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



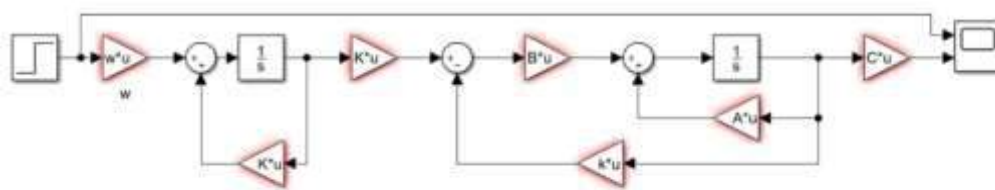
Gambar 4.7 Rangkaian LQR tanpa noise

R. 2.8.5 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



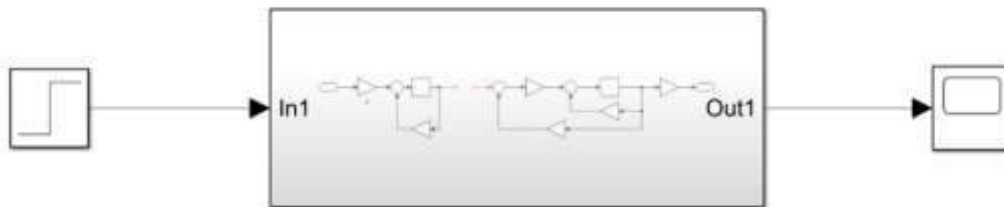
Gambar 4.8 Rangkaian LQR tanpa noise

S. 2.8.6 Rangkaian LQT



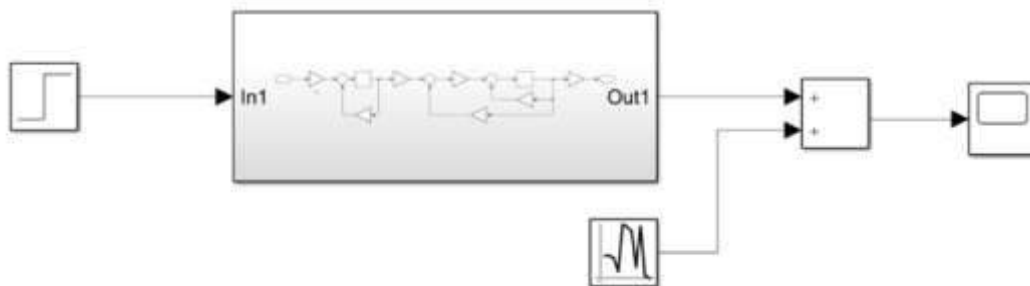
Gambar 4.9 Rangkaian LQT

T. 2.8.7 Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 4.10 Rangkaian LQT tanpa noise

U. 2.8.8 Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 4.11 Rangkaian LQT dengan noise

V. HASIL DAN Pembahasan

W. 3.1 Program Matlab LQR

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 2.4 ; b = 0.01 ; K = 0.013 ; R = 0.46 ; L = 0.00064 ;

% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K = konstanta, R = resistansi, L = Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [ A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA, BB, J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

    0 1 0;

    0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA, BB, Q, R)

KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];
```

X. 3.2 Program Matlab LQT

```
% OPTIMASI SISTEM LQT PADA MOTOR DC

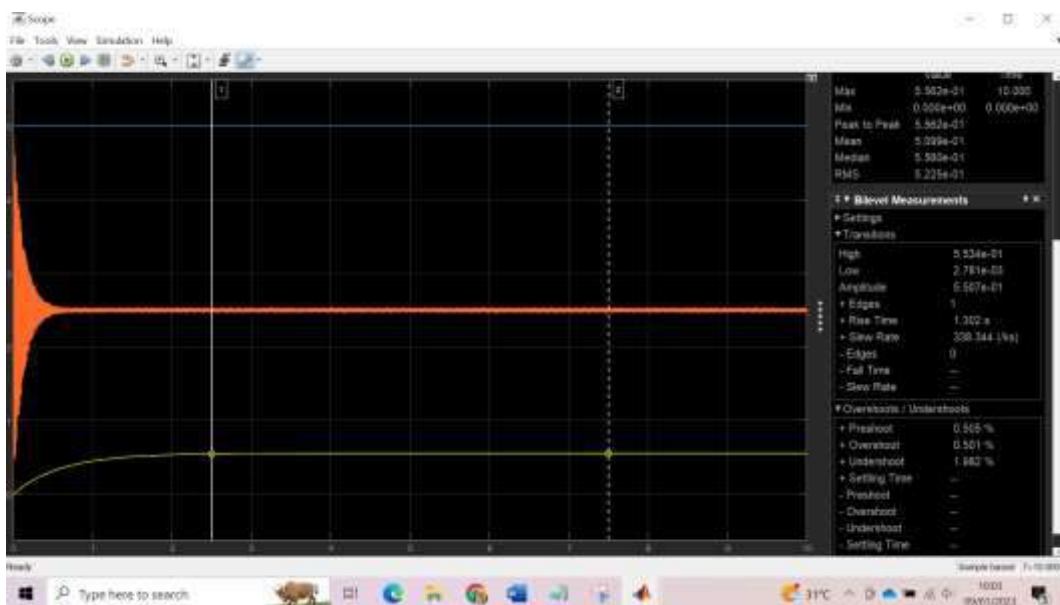
clear;
```

```

clc;
% Model Motor DC
J = 2.4 ; b = 0.01 ; K = 0.013 ; R = 0.46 ; L = 0.00064 ;
% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0]
Q = 10; R=0.0000000001; %0.000000000000001
W=C'*Q; %
[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P
K=inv(R)*B'*S %feedback Gain
ACL=(A-B*K)'
L=inv(R)*B' %model following gain

```

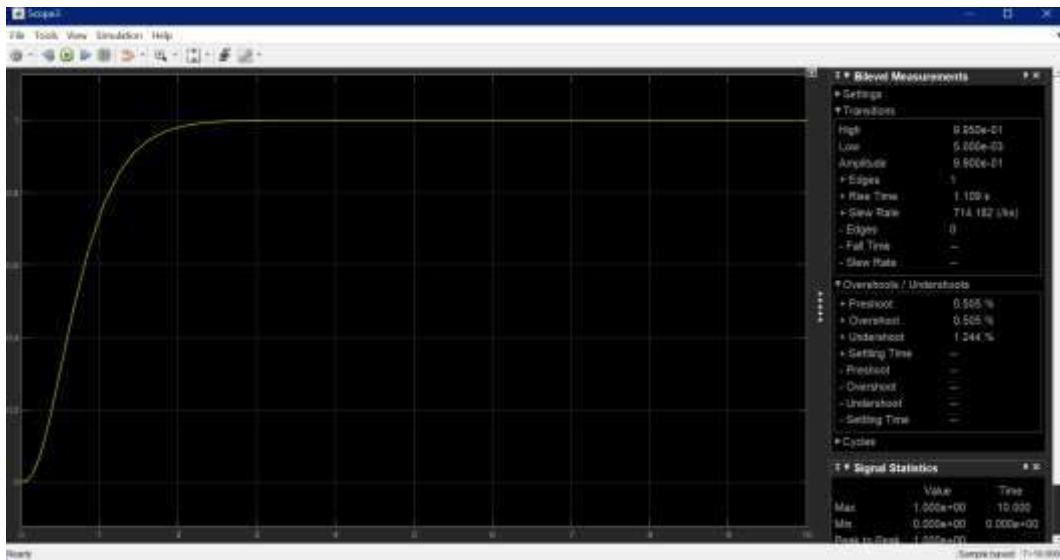
Y. 3.3 Hasil Simulasi Motor DC M644E Orde 1 & 2



Gambar 4.12 Simulasi Motor DC M644E orde 1 & 2

Pada Gambar 3.3 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M644E Pada SISO berorde 1 & 2 tanpa *noise* didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,507 (tidak mencapai *set point*) dengan *rise time* 1,302s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 1.982%.

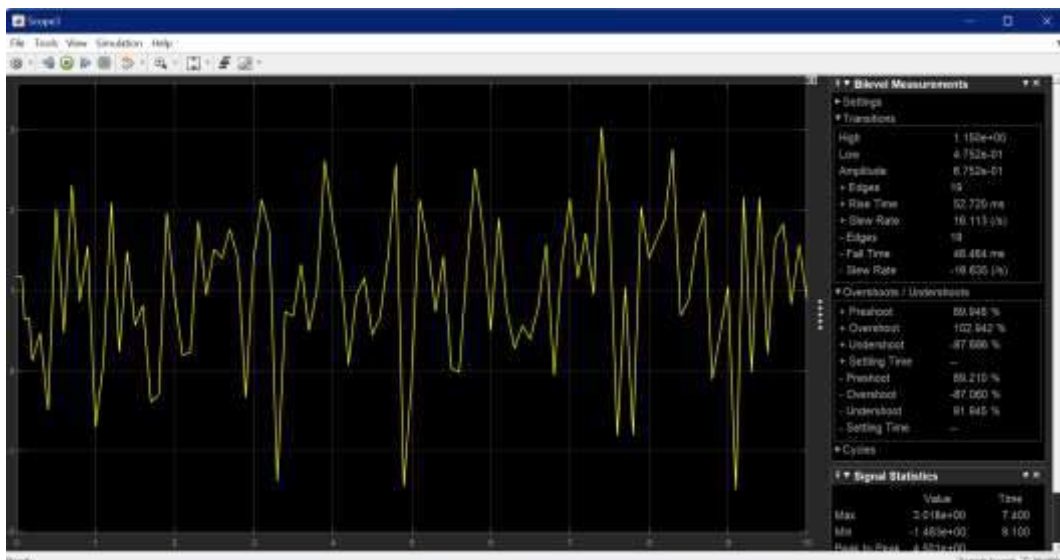
Z. 3.4 Hasil Simulasi LQR tanpa Noise



Gambar 4.13 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

Pada Gambar 3.4 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M644E LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC M644E mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1,109s dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 0.505%.

AA. 3.5 Hasil Simulasi LQR dengan Noise

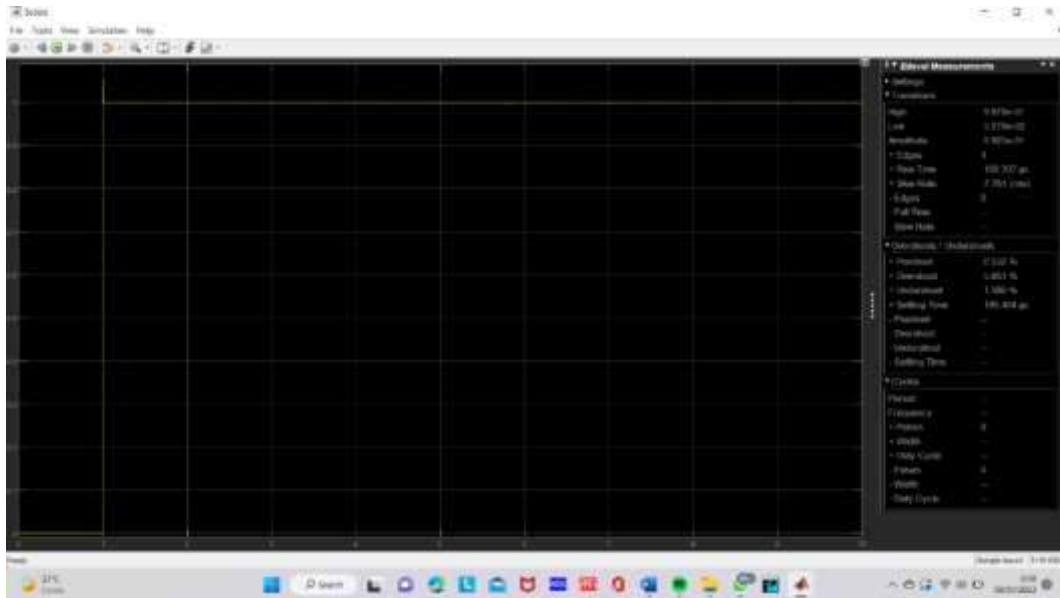


Gambar 4.14 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Pada Gambar 3.5 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M644E LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC M644E hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar

0,67 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 52.720ms dan memiliki *overshoot* sebesar 102.942% serta *undershoot* diangka -87.686%.

AB. 3.6 Hasil Simulasi LQT tanpa Noise



Gambar 4.15 Tampilan Step Response LQT tanpa Noise

Pada gambar 3.6 merupakan grafik respon output yang dihasilkan oleh rangkaian LQT tanpa noise dari plant motor DC BN28. Terlihat pada grafik output memiliki amplitudo sebesar 9,925 dan mengalami overshoot sebesar 5,58% dan menunjukkan pada rangkaian LQT tersebut mengalami overshoot yang cukup besar. Tidak seperti grafik output LQR yang overshootnya sedikit dan dapat mencapai setpoint secara perlahan dan bertahap

M644E dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang stabil, memiliki *rise time* yang cepat, serta memiliki *overshoot dan undershoot* dengan nilai yang kecil.

Respon output yang dihasilkan oleh rangkaian LQT pada plant motor DC M644E dengan noise. Pada grafik LQT dengan noise memiliki undershoot sebesar -9,136% dan overshoot 13,219%, pada rangkaian ini hanya menunjukkan grafik fluktuatif diakibatkan noise yang diberikan atau dipasang komponen (random number). Rangkaian tidak mencapai set point, memiliki rise time yang cukup maksimal pada angka 50,013 ms.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Jami'in, MA, Budiawati, R, Rahmat, MB, Darmajanti, P and "Rancangan Listrik Kapal." ID Patent EC002,023,136,593, 2023
- [2] Nugraha, AT. "Tracking Quadcopter Menggunakan Metode Command-Generator Tracker Dengan Efek Integrator." Jurnal Teknologi Elektro 8.2, 2017, p. 143151.
- [3] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP and Priyambodo, D. "Battery Charger Design in a Renewable Energy Portable Power Plant Based on Arduino Uno R3." Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical ..., 2022
- [4] Juniani, AI, Nugraha, AT, Setiawan, E, Amelia, P, Handandi, ZZ and Hidayana, E. "Enhancing water quality prediction using the decision tree approach with the C4. 5 Algorithm." JEEMECs (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2025
- [5] Sheila, SY, As'ad, RF, Rochmawati, NW, Riyadi, F and Nugraha, AT. "RANCANG BANGUN PENSTABIL SUHU DAN KELEMBAPAN KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH UNTUK MENCEGAH TERJADINYA CORONA DENGAN METODE FUZZ." ID Patent EC00,202,294,930, 2022
- [6] Lumintang, AADC, Yuniza, SI, Hidayat, EP, Nugraha, AT and Indarti, R. "Rancang Bangun Pendeteksi Kebakaran Dini Pada Kapal Ikan Berbasis IoT Dengan Komunikasi LoRa." Jurnal 7 Samudra 8.1, 2023
- [7] Zaibah, S and Nugraha, AT. "Pembangkit Energi Listrik Pico Hydro Terapung Menggunakan Underwater Turbine Untuk Mendukung Pemenuhan Rasio Elektrifikasi Dan Energi Listrik Di Daerah 3t." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [8] Nugraha, AT, Sari, DP, Anindita, G, Setiawan, E, diyah, AS, Asri, P and "Buku Harmoni Laut: Pelestarian Penyu Mutiara dan Kolaborasi.", 2024
- [9] Dwicahyo, A, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Purwarupa Monitoring Fresh Water Tank pada Kapal Berbasis Mikrokontroler." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.1, 2021, pp. 12-19.
- [10] Nugraha, AT, Mudjiono, U, Subiyanto, L, Widodo, HA, Hidayat, EP and "TRAINER KIT KOORDINASI PROTEKSI PADA SISTEM DISTRIBUSI PT. X MENGGUNAKAN TEORI GRAPH." Seminar MASTER PPNS 8.1, 2023, pp. 1-8.
- [11] Nugraha, AT, Cahyadi, MH, Agna, DIY and Sugianto, MGPA. "Effect of Thyristor on Speed Regulation of Single-Phase AC Motor with Frequency Parameter." Journal of Electrical, Marine and Its Application 2.1, 2024, pp. 1-9.
- [12] Pratama, MST, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Elektromekanis dan Analisis Fungsi Alih Motor DC Maxon DCX 35 L untuk Sistem Kontrol Presisi." Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1, 2025
- [13] Lesmana, SV, Nugraha, AT, Ashlah, MB and Sobhita, RA. "Sistem Simulasi Pembagi Beban Otomatis Tiga Fasa Berbasis Phase Tapping menggunakan Matlab dengan metode Naive Bayes." Seminar MASTER PPNS 10.1, 2025, pp. 217-227.

- [14] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Gas Pressure Measurement On Rocket Chamber Based On Strain Gauge Sensor." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [15] Nugraha, AT. "TRACKING QUADCOPTER MENGGUNAKAN COMMAND GENERATOR TRACKER BERBASIS LOS SAAT ADANYA DISTURBANCE PADA LINTASAN PERSEGI." Prosiding SENIATI 4.2, 2018, pp. 7-13.
- [16] Pratama, AC, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Remote Monitoring and Optimization of Solar Panel Power Efficiency: A Community Engagement Approach." Conference of Electrical, Marine and Its Application 1.1, 2022, pp. 37-45.
- [17] Syaifudin, MM, Saputra, DE and Nugraha, AT. "Single-phase Half-wave Uncontrolled Converter with A Single-phase AC Generator." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 2.2, 2025, pp. 13-19.
- [18] Nugraha, AT, Leonard, R, Sriwijayasih, I, Novianarenti, E and Disrinama, AM. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using ..., 2025
- [19] Sheila, SY, Rochamwati, NW, Riyadi, F, As'ad, RF and Nugraha, AT. "Desain and Build a Medium Voltage Cubicles Temperature and Humidity Optimization Tool to Minimize the Occurrence of Corona Disease with the PLC-Based Fuzzy Method." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2022
- [20] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Single-phase uncontrolled full-wave rectifier on a three-phase AC generator.." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 1.1, 2023, pp. 11-20.

BAB V

Optimalisasi Motor DC dengan Metode LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking)

Oleh: **Muhammad Dhifa Alfitra**, Email :

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *Linier Quadratic Regulator, Linier Quadratic Tracking, Motor DC*

DC motors or direct current motors are electronic devices that can be found in industrial environments to everyday life. So that the performance of the DC motor can run well, a controller is needed so that the performance of the DC motor is better. Optimization of signals on DC motors by applying the LQR and LQT methods to the control system is carried out to analyze and carry out a comparison to obtain a technique from various technical responses that have been simulated through the application of a control system. The implementers used in research using LQR and LQT are because these two methods are able to reach the optimum point and reduce the percentage of errors in a tool so that the work of a tool can be adjusted as desired and obtain an effective output. The object chosen for the implementation uses a DC motor that already has a data sheet. the advantages of a DC motor the reactive power produced does not have a disadvantage, the torque obtained is also quite large, it is easy to use as a linear controller, the controller in this DC motor can minimize delay time, rise time, steady state time and the amount of spikes that occur or errors that will be obtained in an application system. With the data sheet on the DC motor, a transfer function can be carried out and will obtain order 1 and order 2 which can be used as a reference in carrying out the four implementations of the control system. The collection method was carried out by authentic research and direct observation to see the results displayed in the experiment. Explanations are applied through the form of narration, tables and diagrams.

Abstrak

Motor DC atau motor arus searah merupakan perangkat elektronik yang dapat ditemui pada lingkungan industri hingga kehidupan sehari-hari. Agar kinerja motor DC dapat berjalan dengan baik maka diperlukan pengontrol agar kinerja dari motor DC lebih baik. Pengoptimalan sinyal pada motor DC dengan menerapkan metode LQR dan LQT pada sistem control dilakukan untuk menganalisa dan melakukan suatu perbandingan untuk mendapatkan suatu teknik dari berbagai respon teknik yang telah disimulasikan melalui

penerapan sistem kendali. Penerapan yang digunakan pada penelitian dengan menggunakan LQR dan LQT dikarenakan kedua metode tersebut mampu meraih titik optimum dan mengurangi persentase error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat diatur sesuai dengan keinginan dan memperoleh output yang efektif. Objek yang dipilih untuk dilakukan penerapan tersebut menggunakan motor DC yang telah memiliki data *sheet*. kelebihan dari motor DC daya reaktif yang dihasilkan tidak memiliki suatu kerugian, torsi yang diperoleh juga cukup besar, mudah dijadikan pengontrol linier, *kontroler* yang ada pada motor DC ini dapat meminimalkan waktu tunda, waktu bangkit, waktu keadaan tunak dan besarnya lonjakan yang terjadi maupun kesalahan yang akan diperlohe pada suatu sistem penerapan tersebut. Dengan adanya data *sheet* pada motor DC tersebut dapat dilakukan suatu *transfer function* dan akan memperoleh orde 1 dan orde 2 yang dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan empat penerapan dari sistem kendali tersebut. Metode pengumpulan dilakukan dengan penelitian otentik dan observasi langsung untuk melihat hasil yang ditampilkan pada percobaan tersebut. Penjelasan yang diterapkan melalui bentuk narasi, tabel dan juga diagram.

PENDAHULUAN

Persoalan kontrol optimal telah menarik perhatian yang sangat besar pada saat ini, hal itu diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan sistem dengan performansi tinggi. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik Dalam menyelesaikan sistem kontrol optimal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya.

Pada kesempatan ini penulis membahas metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*) yang merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone *quadcopter*. Metode LQR ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita. LQT merupakan sistem pengaturan linear yang *output* sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang

diinginkan(Akbar et al., 2016). *Linear quadratic tracker* (LQT) adalah mekanisme kontrol pelacakan berbasis model yang menggunakan *affine state-feedback* untuk memberikan upaya pengendalian yang optimal. LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi(Saleem et al., 2018). Biasanya LQT digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan *tracking*.

Dengan menggunakan dua metode tersebut penulis membahas penerapan metode LQR plant motor DC yang telah disertai *datasheet*. *Datasheet* tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan *software* MATLAB Simulink untuk melihat *step response*. Motor DC yang digunakan yaitu tipe Maxon DC Motor RE40 Seri 148877 yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 LQR (*Linier Quadratic Regulator*)

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Dengan menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari *set point* yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/*noise*.

2.2LQT (*Linier Quadratic Tracking*)

LQT merupakan sistem pengaturan linier yang keluarannya mengikuti (*tracking*) jalur yang telah ditetapkan melalui masukan. Akan dijelaskan bagaimana LQT dapat diterapkan untuk mengatur keluaran sistem agar mendekati keluaran yang diinginkan dengan energi kontrol minimal. Persamaan 1 di bawah ini adalah observable system yang linear.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(t)$$

Dengan vektor kesalahan seperti pada Persamaan 2.

$$e(t) = z(t) - y(t) \quad (2)$$

di mana $e(t)$ adalah kesalahan yang didapat dari selisih antara masukan yang diinginkan $z(t)$ dan keluaran sistem $y(t)$. dan indeks performansi seperti pada Persamaan 3 berikut.

$$J = \frac{1}{2} e'(t_f) F(t_f) e(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [e'(t) Q(t) e(t) + u'(t) R(t) u(t)] dt \quad (3)$$

Gambar 5.1

Dengan fungsi matriks P(t) harus memenuhi persamaan:

$$P'(t) = -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + P(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)P(t) + C'(t)Q(t)C(t) \quad (4)$$

atau bisa ditulis :

$$0 = -P(t)A(t) - A'(t)P(t) + P(t)B(t)R^{-1}(t)B'(t)P(t) + C'(t)Q(t)C(t) \quad (5)$$

Untuk matrix Q dan R, diasumsikan sesuai dengan performa yang diinginkan untuk sistem. Setelah mendapatkan persamaan Riccati, dapatkan persamaan diferensial vektor non-homogen dengan Persamaan 6.

$$g'(t) = -[A - B(t)R^{-1}B'(t)P(t)]' g(t) - C'(t)Q(t)z(t) \quad (6)$$

Dengan didaparkannya P(t) dan g(t), hanya tersisa gain K(t) untuk dicari. K(t) didapatkan dengan Persamaan 7.

$$K(t) = R^{-1}(t)B'(t)P(t) \quad (7)$$

Semua parameter yang dibutuhkan untuk metode LQT telah didapatkan. Sekarang saatnya untuk mencari kontrol optimal $u^*(t)$ dengan Persamaan 8.

$$u^*(t) = -K(t)x^*(t) + R^{-1}(t)B'(t)g(t) \quad (8)$$

Dengan $x^*(t)$ adalah umpan balik dari sistem. Umpan balik nantinya akan dikalikan dengan gain kontrol K(t) dan ditambahkan dengan $R^{-1}(t)B'(t)g(t)$ untuk menghasilkan $u^*(t)$ yang akan digunakan sebagai masukan kepada sistem agar hasil yang diinginkan tercapai.

2.3 Fungsi Alih

Fungsi alih merupakan perbandingan fungsi laplace output dengan fungsi laplace input dengan semua kondisi mula dianggap nol. Fungsi alih berfungsi untuk memudahkan melihat karakteristik suatu sistem. Secara umum bentuk sistem orde 1 dapat dituliskan sebagai berikut :

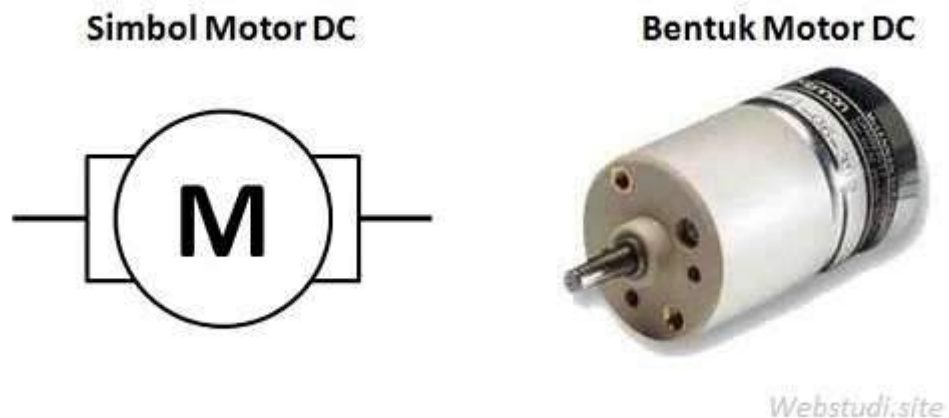
$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Sedangkan untuk bentuk umum dari sistem orde 2 dapat dinyatakan dalam bentuk standar berikut :

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (2)$$

A. 2.4 Motor DC

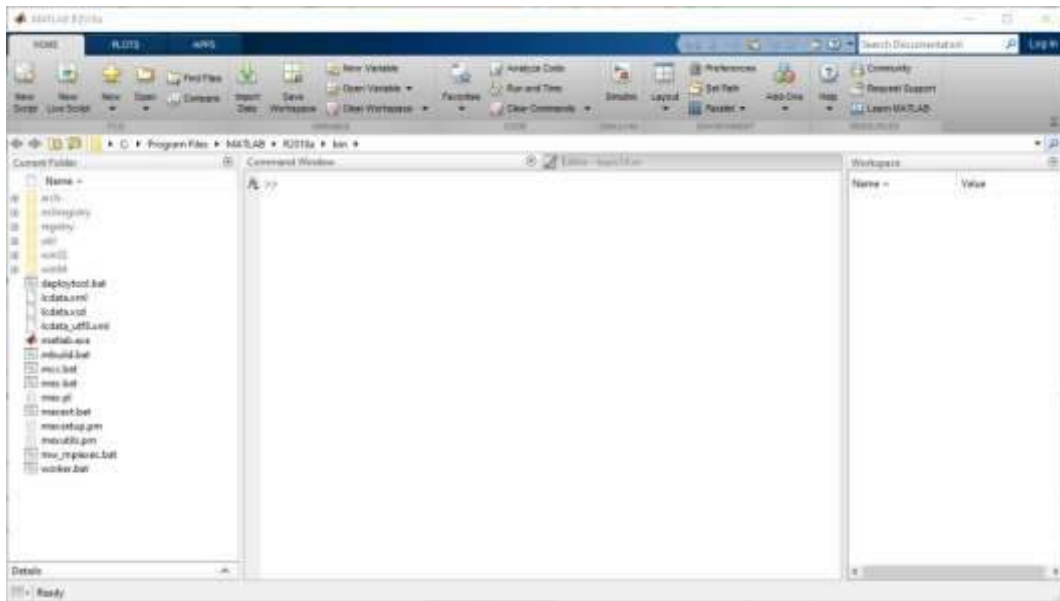
Motor Listrik DC atau DC Motor adalah suatu perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi kinetik atau gerakan (*motion*). Motor DC ini juga dapat disebut sebagai Motor Arus Searah. Seperti namanya, DC Motor memiliki dua terminal dan memerlukan tegangan arus searah atau DC (*Direct Current*) untuk dapat menggerakannya. Motor Listrik DC ini biasanya digunakan pada perangkat-perangkat Elektronik dan listrik yang menggunakan sumber listrik DC seperti *vibrator* ponsel, Kipas DC dan Bor Listrik DC. Konstruksi motor DC seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 5.2 Konstruksi Motor DC

B. 2.5 Software MATLAB

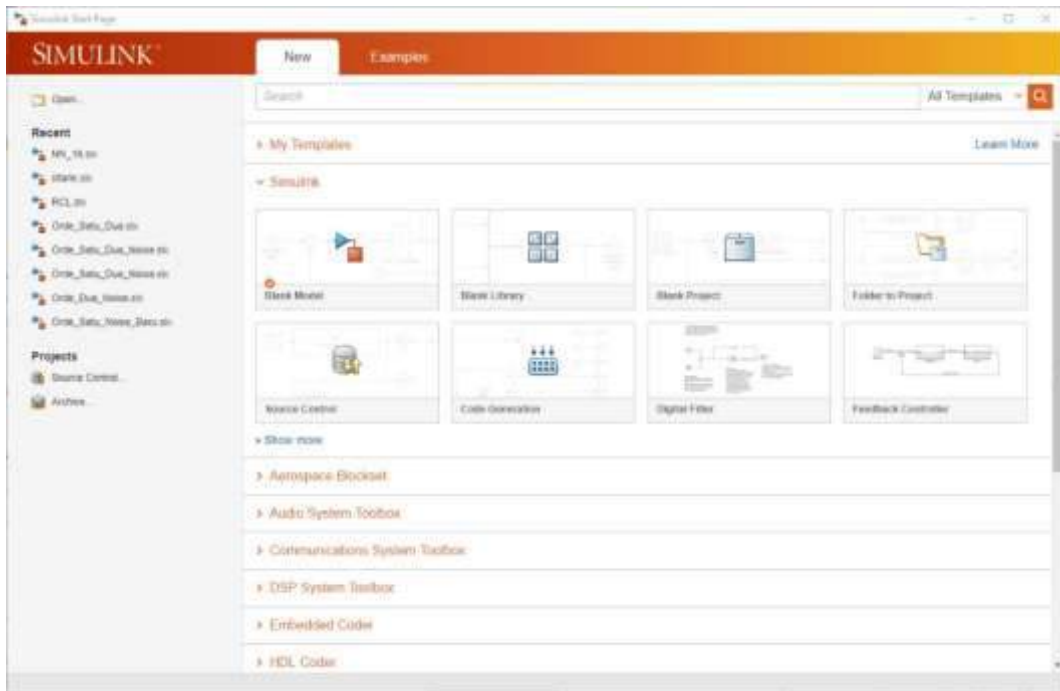
MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta menciptakan pemodelan dan aplikasi. Tampilan *software* MATLAB seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 5.3 2Tampilan MATLAB

Pada simulasi untuk melihat respon yang dihasilkan oleh motor DC penulis menggunakan fitur Simulink pada MATLAB. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis.

Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 5.4 Tampilan Simulink MATLAB

2.5 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam praktikum kali ini, yaitu:

Laptop

Software Matlab

Datasheet Maxon DC Motor RE40 seri 148877

Analisa Perhitungan

Spesifikasi Motor

Nama Motor= Maxon DC Motor RE40 seri 148877

$$\tau = 184 \text{ mNm/A} = 0,184 \text{ N/m}$$

$$\text{Momen Inersia (J)} = 1380 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2$$

$$\text{Redaman Sistem Mekanik (B)} = 4,39 \text{ ms}$$

$$\text{Konstanta Motor (K)} = 0,603 \text{ Nm/A}$$

$$\text{Resistansi (R)} = 1,16 \text{ Ohm}$$

$$\text{Induktansi (L)} = 0,000329 \text{ H}$$

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (4)$$

Dimana sehingga

$$K = \tau i = 0,1843,12 = 0,0589 \quad (5)$$

Persamaan orde 1 motor dc :

$$G(s) = 0,05890,184s + 1 \quad (6)$$

C. 2.7 Program Script Matlab

2.7.1 LQR

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 1.380 ; b= 4.39 ; K= 0.603 ; R= 1.16 ; L = 0.000329 ;

% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

0 1 0;

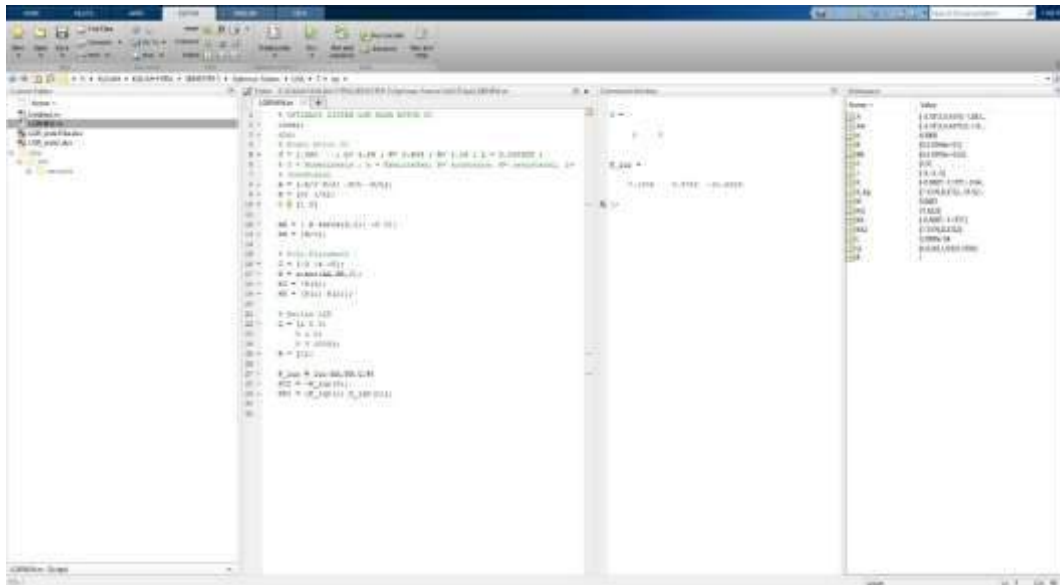
0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];



Gambar 5.6

2.7.2 LQT

```
clear;
```

```
clc;
```

```
% Model Motor DC
```

```
J = 1.380 ; b = 4.39 ; K = 0.603 ; R = 1.16 ; L = 0.000329 ;
```

```
% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K = konstanta, R = resistansi, L = Induktansi
```

```
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
```

```
B = [0; 1/L];
```

```
C = [1 0]
```

```
Q = 10; R = 0.0000000001; % 0.00000000000001
```

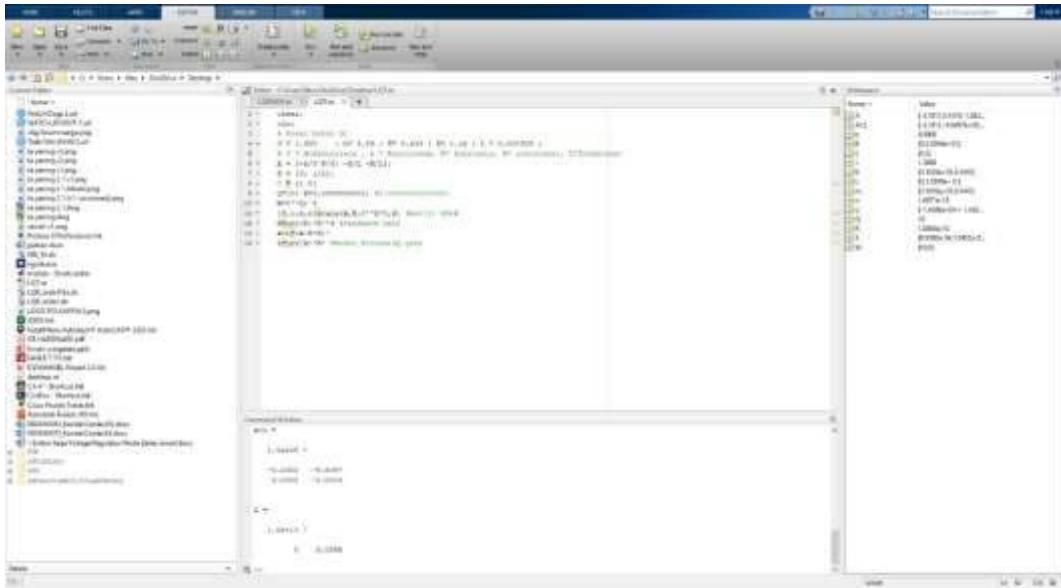
```
W = C'*Q; %
```

```
[S, o, m, n] = care(A, B, C'*Q, R) % m = v(t) % S = P
```

```
K = inv(R)*B'*S % feedback Gain
```

```
ACL = (A - B*K)'
```

```
L = inv(R)*B' % model following gain
```



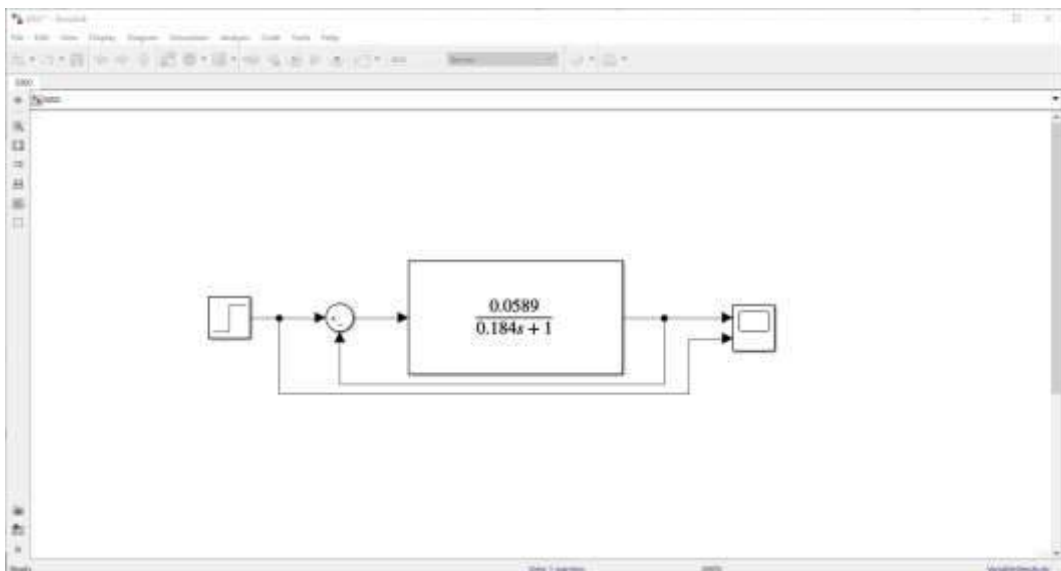
Gambar 5.7

2.8 Perancangan Maxon DC Motor RE40 seri 148877 pada Simulink

D. 2.8.1 Daftar komponen

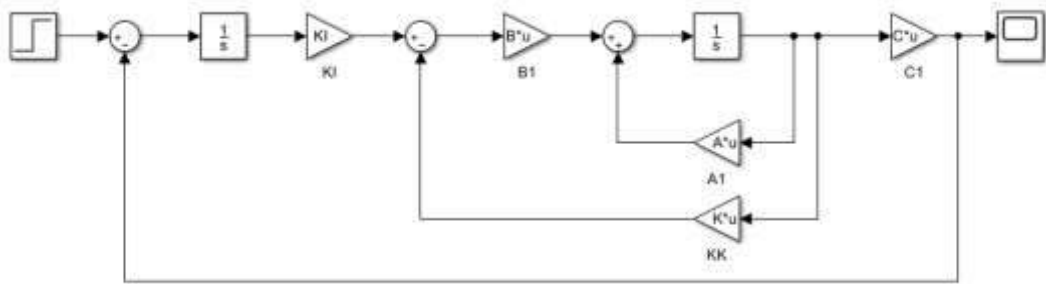
Tabel 5.1

E. Rangkaian Maxon DC Motor RE40 seri 148877 Orde 1



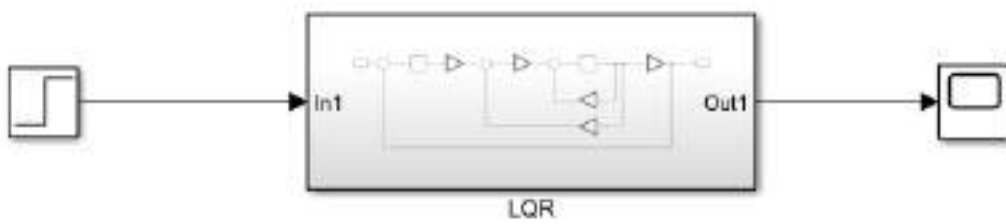
Gambar 5.8

F. Rangkaian LQR



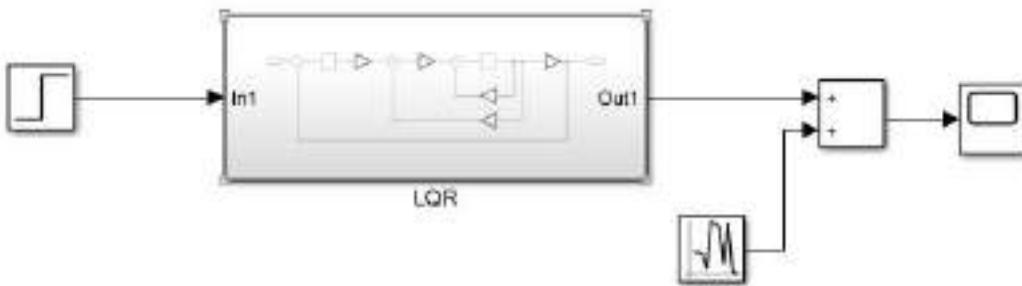
Gambar 5.9

G. Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



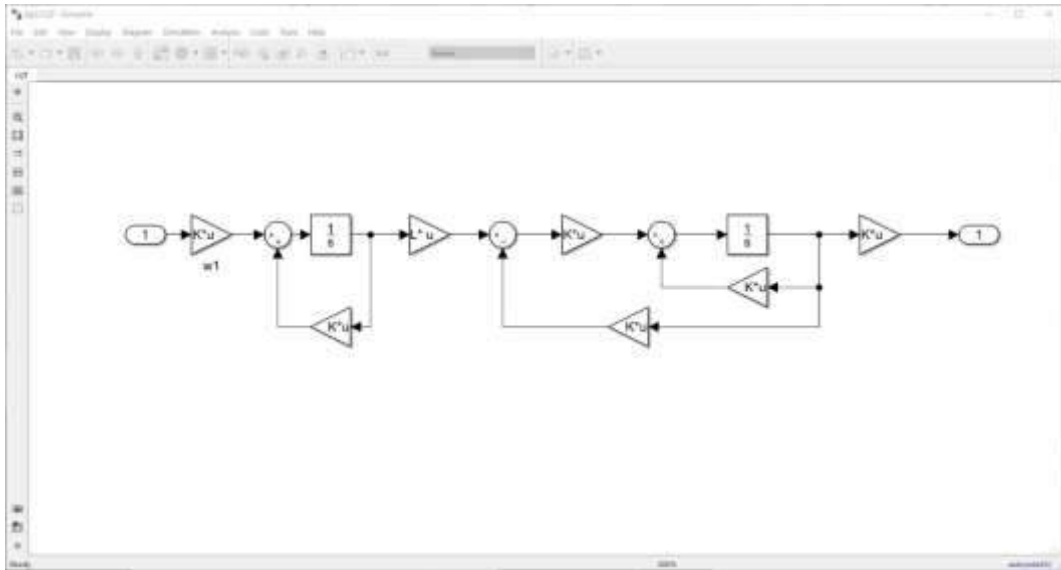
Gambar 5.10

H. Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



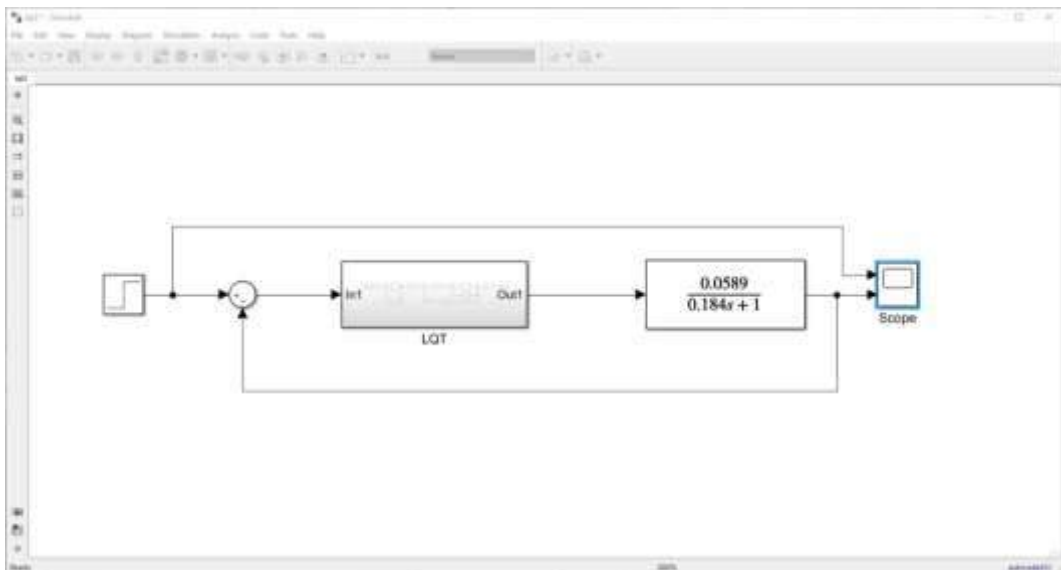
Gambar 5.11

Rangkaian LQT



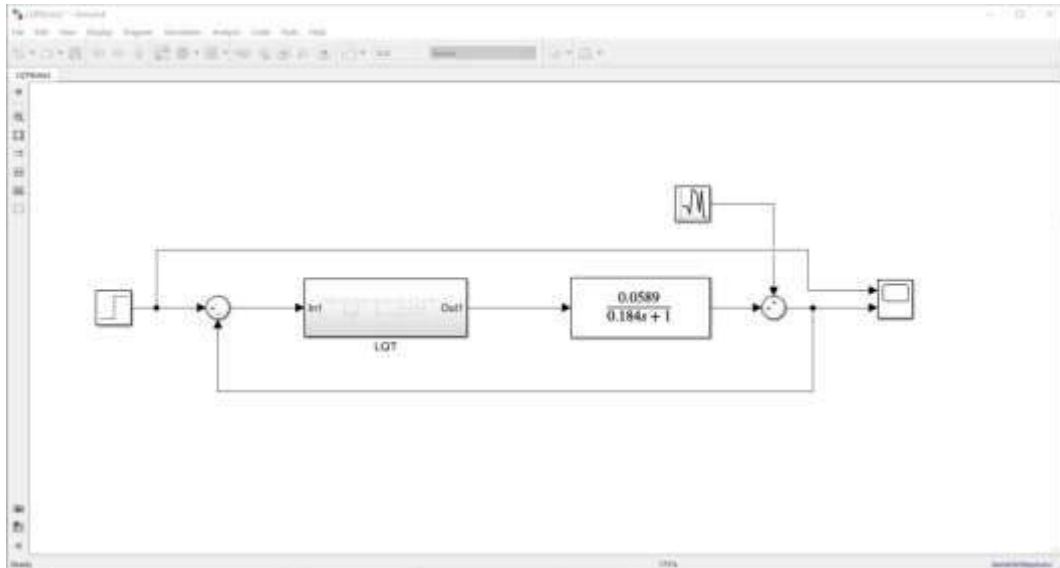
Gambar 5.12

Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 5.13

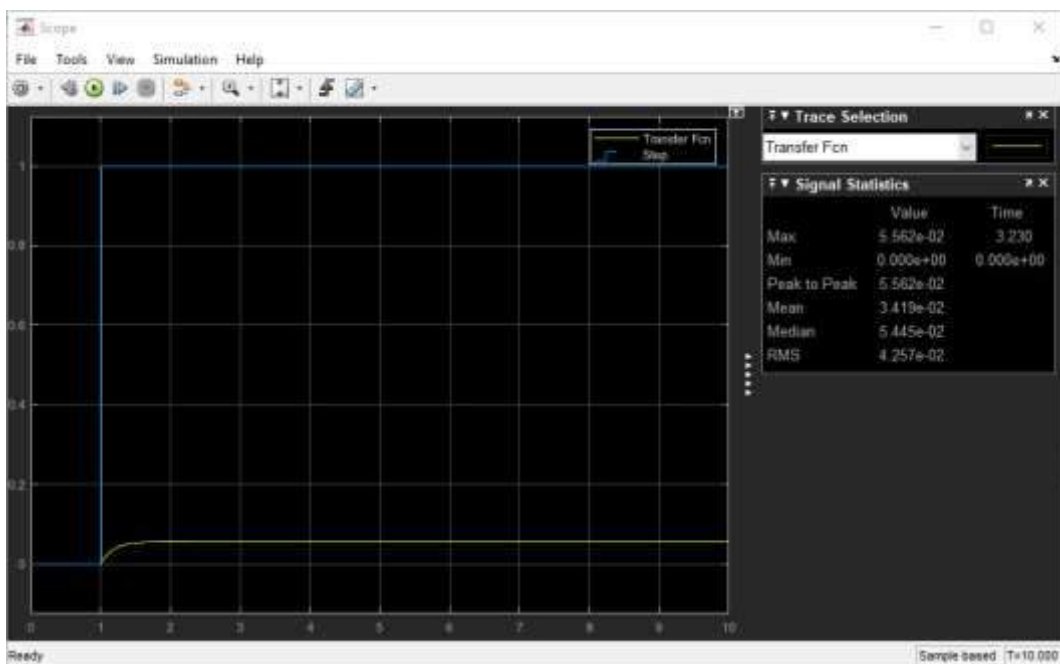
Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 5.14

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

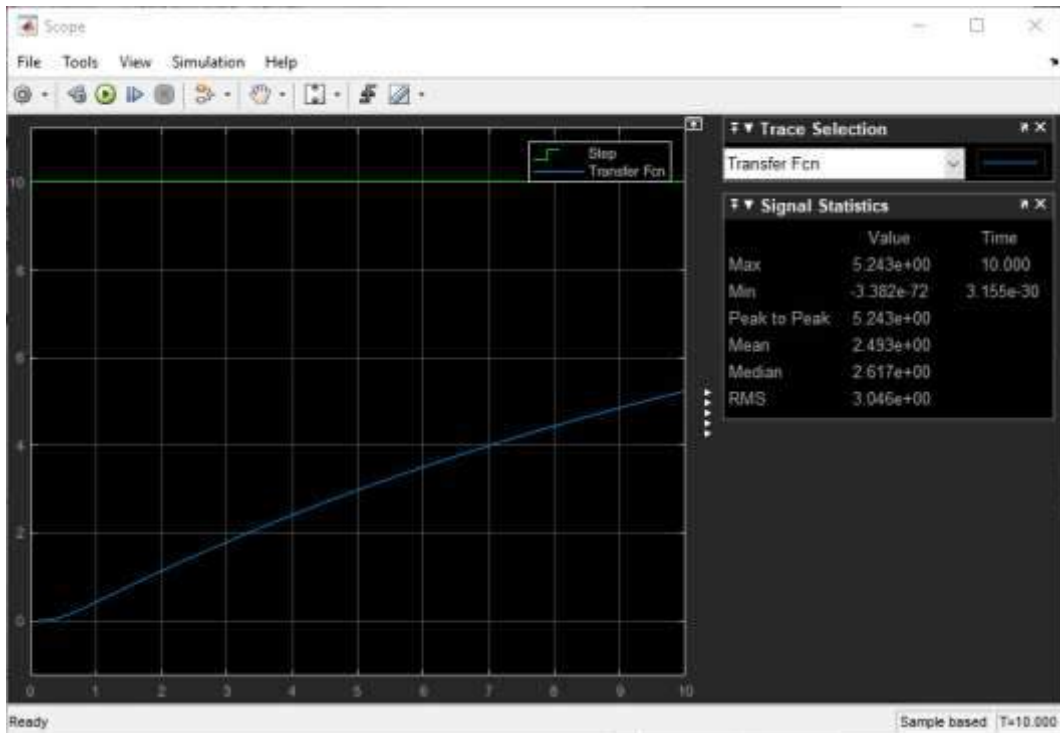
Hasil Simulasi Maxon DC Motor RE40 seri 148877 Orde 1



Gambar 5.15 Tampilan Step Response

Pada Gambar 3.1 merupakan tampilan *step response* dari motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877 Pada SISO berorde satu tanpa *noise* didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 5,507 (tidak mencapai *set point*) dengan *rise time* 377ms.

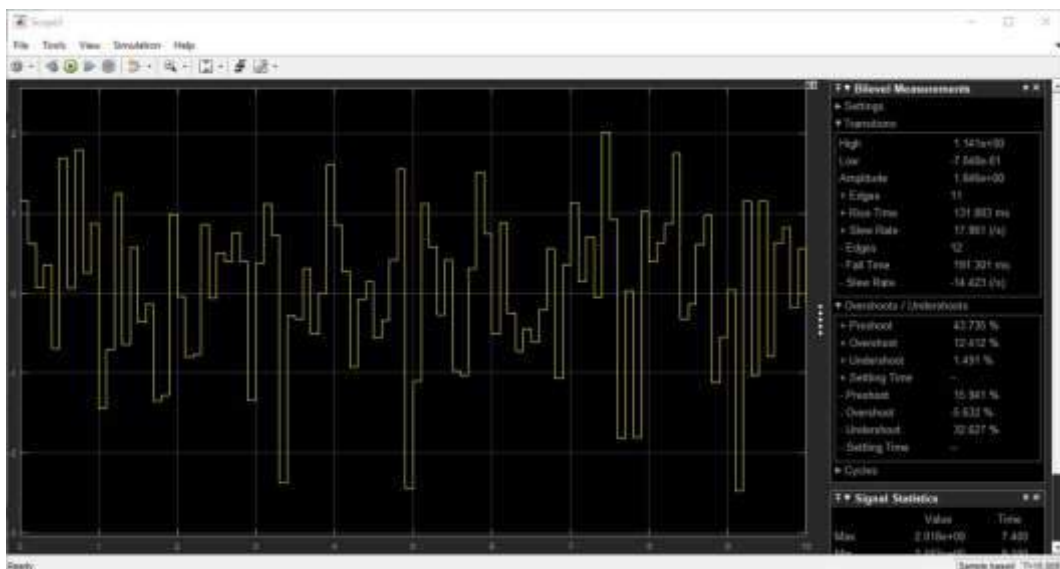
3.2 Hasil Simulasi LQR tanpa *Noise*



Gambar 5.16 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

Pada Gambar 3.2 merupakan tampilan *step response* dari motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877 LQR tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC BN-42 mencapai amplitudo sebesar 5. sehingga belum mencapai *setpoint*.

I. 3.2 Hasil Simulasi LQR dengan Noise



Gambar 5.17 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Pada Gambar 3.3 merupakan tampilan *step response* dari motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877 LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise*

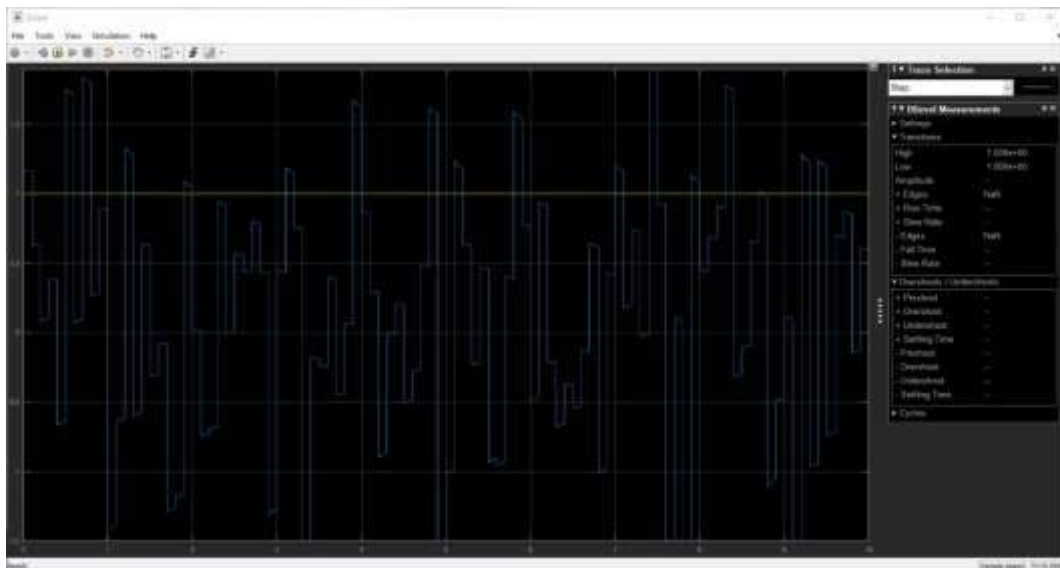
yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 1,84 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 191,301ms dan memiliki *overshoot* sebesar 12.412% serta *undershoot* diangka 1.491%

3.4 Hasil Simulasi LQT



Gambar 5.18

Tanpa Noise



Gambar 5.19 Hasil Simulasi LQT dengan Noise dan Tanpa Noise

Dengan Noise

Berdasarkan hasil yang ditampilkan oleh scope dapat dikatakan bahwa keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC noise ini mencapai *set point* yang diinginkan, tetapi terdapat tambahan dari input noise dan mengakibatkan grafik tidak beratur. Grafik yang berwarna

kuning merupakan nilai *input* dari *step*. Sedangkan grafik berwarna biru merupakan keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC noise.

KESIMPULAN

$$G(s) = 0,05890.184s + 1 \quad (7)$$

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan *datasheet* motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan *transfer function* dan dengan hasil *run script* matlab LQR didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada *workspace*.

Hasil *step response* dari motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877 berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 5,507 dalam artian belum mencapai *setpoint* sebesar 1 dengan rise time 377ms dan sistem mengalami overshoot sebesar 0,485% dan undershoot 1.226%. Sedangkan *output step response* dari Maxon DC Motor RE40 seri 148877 mencapai amplitudo sebesar 4,037 belum mencapai *setpoint*.

Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil *step response* kedua sistem bahwa sistem motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang belum maksimal dari motor Maxon DC Motor RE40 seri 148877orde 1 karena dengan menggunakan LQR, *step response* dari Maxon DC Motor RE40 seri 148877 belum dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang masih menanjak, memiliki, serta memiliki *overshoot dan undershoot* dengan nilai yang kecil.

Dalam melakukan simulasi Simulink pada *software* MATLAB diperlukan fungsi transfer yang didapat dari pemodelan motor DC orde 1 untuk mengetahui *step response* dari sistem LQR & LQT motor DC. Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 diperlukan *datasheet* motor DC yang mendukung. Pada percobaan ini menggunakan *datasheet* dari Maxon DC Motor RE40 seri 148877. Hasil simulasi dari sistem LQR & LQT dengan menggunakan fungsi transfer dari pemodelan matematis Maxon DC Motor RE40 seri 148877 orde 1 memiliki keluaran *set point* yang diinginkan

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Widiarti, Y, Rachman, I, Riantini, R, Pambudi, DSA and "Instalasi Listrik Kapal." ID Patent EC002,023,136,868, 2023
- [2] Jamaludin, M and Nugraha, AT. "Optimizing the Output System of PG36M555 DC Carbon-Brush Motors Using LQR and LQT Methods in MATLAB Simulink." Journal of Electrical, Marine and Its Application 1.1, 2023, pp. 1-8.

- [3] Rahman, FWN, Setiawan, E, Juniani, AI and Nugraha, AT. "Application of ant colony optimization algorithm in determining PID parameters in AC motor control." *Brilliance: Research of Artificial Intelligence* 4.2, 2024, pp. 538-549.
- [4] Nugraha, AT, Ruddianto, Ahmad, MM, Pambudi, DSA, Utomo, AP and "Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine." ID Patent EC00,202,204,473, 2022
- [5] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "TUNING PID UNTUK KONTROL KECEPATAN MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 88-97.
- [6] Nugraha, AT, ad, RF As' and Abdullayev, VH. "Design and fabrication of temperature and humidity stabilizer on low voltage distribution panel with plc-based fuzzy method to prevent excessive temperature and humidity on the" *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics* ..., 2022
- [7] Almunawar, D, Anto, DR, Alfitra, MD, Hasin, MDW, Jami'in, MA, Adhitya, RY and "Perancangan Sistem Pendukung Keputusan Mesin e-Fill Berbasis ANFIS." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 5.1, 2024
- [8] Dermawan, D, Yuniza, SI, Septiandi, IN and Nugraha, AT. "Penyearah Setengah Gelombang 3 Fasa Tak Terkendali dari Generator AC 3 Fasa." *Seminar MASTER PPNS 8.1, 2023*, pp. 244-251.
- [9] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Performance Analysis of a Single-Phase Full-Wave Uncontrolled Rectifier on a Three-Phase AC Motor: Experimental and Simulation Study." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [10] Sutrisna, VHK, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Comparative Analysis of PID and LQR Controllers for Speed Regulation of Series DC Motors." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.2, 2024, pp. 1-9.
- [11] Nugraha, AT. "Rancang Bangun Charger Controller Pada Pembangkit Listrik Energi Angin Berbasis Arduino Uno." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [12] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Distributed Panel-based Fire Alarm Design." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science* ..., 2022
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "PENYEARAH TIDAK TERKONTROL SATU PHASA SETENGAH GELOMBANG MENGGUNAKAN MOTOR AC 1 PHASA." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 112-116.
- [14] Nugraha, AT, Santosa, AF and Sobhita, RA. "A Comparative Study on DC Motor Speed Regulation Using Full-Wave Uncontrolled Rectifiers." *Sustainable Energy Control and Optimization* 1.1, 2025, pp. 43-52.
- [15] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "ANALISIS KONTROL KECEPATAN PUTARAN MOTOR SATU FASA MENGGUNAKAN PARAMETER FREKUENSI." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 103-111.
- [16] Ferdinandus, AR Andrew, Nugraha, AT and Jamaaluddin, J. "Setting Neuro-Fuzzy PID Control In Plant Nonlinear Active Suspension." *Journal of Physics: Conference Series* 1114.1, 2018, p. 12063.
- [17] Sheila, SY, As'ad, RF, Rochmawati, NW, Riyadi, F and Nugraha, AT. "RANCANG BANGUN PENSTABIL SUHU DAN KELEMBAPAN KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH UNTUK MENCEGAH TERJADINYA CORONA DENGAN METODE FUZZ." ID Patent EC00,202,294,930, 2022
- [18] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Controlled Single-Phase Full-Wave Rectifier Experiment for DC Shunt Motor Control." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 1.1, 2023, pp. 1-10.

- [19] Budi, FS, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Comparison of LQR and LQT Control of Uncertain Nonlinear Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 10-17.
- [20] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Water Purification Technology Implementation Design." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...)*, 2020

BAB VI

Identifikasi Motor DC 37GB500-72-2463 dengan Metode Linear Quadratic Regulator dan Linear Quadratic Tracking

Oleh: **Muhammad Dzi Washfil Hasin**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: Motor DC, optimasi sistem, sistem kontrol, Linear Quadratic Regulator, Linear Quadratic Tracking, Matlab dan Model Matematis

¹Muhammad Dzi Washfil Hasin

Teknik Otomasi, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

In a DC motor is an electric machine that consumes DC electric power so as to produce mechanical torque. Because they have a relatively high load carrying torque compared to permanent magnet motors of the same size, DC motors are widely used in a variety of applications. Permanent magnet motors are linear while DC motors are non-linear. Applications that require automatic speed control will find it difficult to implement DC motor nonlinearity. The non-linear dynamic model of the DC motor has limitations in the design of the closed-loop feedback controller circuit. Saturation and friction can degrade the performance of Conventional Controls. DC motors are also widely used in various industries as they serve both high and low power applications and in both fixed and variable speed electric drives. This paper analyzes the temporary parameters of DC motor speed which are expressed separately using the Linear Quadratic Regulator (LQR) method. DC motor speed is analyzed by measuring the output. The LQR method has been applied to three different motors with different specifications. The speeds of the three motors are compared based on temporary specifications using the LQR method. Simulation of dc motors in MATLAB software has shown that the performance of motors with low power applications has a significant and better response quality with the LQR method. Properties such as minimizing deviations in speed, easy design and cost savings make them efficient to use in balanced and balanced systems. These properties improve DC motor speed control by achieving the desired performance for systems where different power ratings occur. Linear Quadratic Tracking (LQT) for translational motion control. Genetic Algorithm (GA) is used to get parameters from LQT.

.Keywords: *DC motors, system optimization, control systems, Linear Quadratic Regulator, Linear Quadratic Tracking, Matlab and Mathematical Models.*

Abstrak

Dalam sebuah motor DC adalah mesin listrik yang mengkonsumsi daya listrik DC sehingga menghasilkan torsi mekanik. Karena memiliki torsi yang relatif tinggi untuk memikul beban dibandingkan dengan motor magnet permanen dengan ukuran yang sama, motor DC yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Motor permanen magnet bersifat linear sedangkan motor DC bersifat *non linear*. Aplikasi yang membutuhkan kontrol kecepatannya secara otomatis akan sulit mengaplikasikan ketidak linieran Motor DC. *Non linear* model dinamik dari motor DC memiliki keterbatasan pada desain dari rangkaian *close-loop feedback controller*. Saturasi dan gesekan dapat menurunkan kinerja dari Kontrol Konvensional. Motor DC juga banyak digunakan di berbagai industri karena mereka melayani aplikasi daya tinggi dan rendah dan inboth penggerak listrik kecepatan tetap dan variabel. Makalah ini menganalisis parameter sementara kecepatan motor DC yang diekspresikan secara terpisah menggunakan metode Linear Quadratic Regulator (LQR). Kecepatan motor DC dianalisis dengan mengukur output. Metode LQR telah diterapkan pada tiga motor berbeda dengan spesifikasi berbeda. Kecepatan ketiga motor tersebut dibandingkan berdasarkan spesifikasi sementara menggunakan metode LQR. Simulasi motor dc pada *software* MATLAB telah menunjukkan bahwa kinerja motor dengan aplikasi daya rendah memiliki respons kualitas yang signifikan dan lebih baik dengan metode LQR. Properti seperti meminimalkan penyimpangan dalam kecepatan, desain yang mudah dan pengurangan biaya membuatnya efisien untuk digunakan dalam sistem yang terkontrol dan seimbang. Sifat-sifat ini meningkatkan kontrol kecepatan motor DC dengan mencapai kinerja yang diinginkan untuk sistem di mana peringkat daya yang berbeda terjadi. Linear Quadratic Tracking (LQT) untuk pengendalian gerak translasi. Untuk mendapatkan parameter dari LQT digunakan Algoritma Genetika (GA).

A. Pendahuluan

Dalam sebuah kontrol optimal telah menjadi hal yang menarik yang sangat besar pada era sekarang, hal ini dikarenakan meningkatnya seluruh kebutuhan sistem dengan performa yang tinggi. Pada konsep optimasi sistem kontrol memiliki sebuah pemilihan indeks performa dan rekayasa yang akan menghasilkan sebuah sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik. Untuk menyelesaikan sistem kontrol optimal, maka diinginkan mencari

sebuah aturan akan diambil sebuah keputusan pada sistem kontrol yang akan meminimalisirkan suatu ukuran simpangan dari pemformansi idealnya.

Pada laporan ini penulis membahas metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) yang terkandung pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS yaitu. “Optimasi Sistem”. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone *quadcopter*. Metode LQR ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi error pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita.

Kebutuhan akan motor elektrik merupakan kebutuhan pokok untuk memajukan suatu industri. Proyeksi kebutuhan akan motor elektrik di dunia akan meningkat 6,5 % setiap tahun. Wilayah Asia/Pasifik yang memiliki penjualan terbesar. Data ini menunjukkan bahwa motor elektrik, salah satunya motor DC sangat berperan penting dalam kecepatan produksi dan kualitas. Namun, seringkali dalam penggunaan motor DC di lingkungan industri mengalami kesulitan dalam hal pengaturan nilai torsi. Para peneliti juga memaparkan bahwa variabel torsi pada motor DC sulit untuk diukur sehingga mereka hanya bisa mencari estimasi variabel torsi.

Motor DC bekerja secara nonlinear terutama saat terjadi diberi variasi beban. Pengendali konvensional, seperti *PID controller* sangat umum digunakan karena memiliki performa yang baik dalam mengendalikan sistem linear. Pada memaparkan sistem pengendalian motor induksi menggunakan kontroler PID dengan metode *field oriented control* (FOC). Metode ini digunakan untuk memperbaiki sinyal kontrol arus torsi di dalam sistem kontroler PID. Selain itu, teknik kendali optimal telah digunakan oleh beberapa peneliti seperti menggunakan linear quadratic regulator (LQR). Pada makalah ini digunakan Motor DC dengan magnet permanen sebagai *plant* yang akan diidentifikasi serta dikendalikan dengan dengan teknik kendali optimal LQR. Pada penelitian ini juga dikembangkan modul identifikasi Motor DC menggunakan Simulink-Matlab. Nilai gain feedback dan indeks performansi dari LQR bergantung pada kombinasi dari Q dan R. Untuk mendapatkan kombinasi Q dan R dapat digunakan metode tuning manual (try and error). Namun sering kali didapatkan hasil yang tidak optimal. Oleh karena

itu pada penelitian ini digunakan metode Algoritma Genetika (GA) untuk menggantikan metode tuning manual.

B. Metodologi Penelitian

C. 2.1 Fungsi Alih

Fungsi alih merupakan perbandingan fungsi laplace output dengan fungsi laplace input dengan semua kondisi mula dianggap nol. Fungsi alih berfungsi untuk memudahkan melihat karakteristik suatu sistem. Secara umum bentuk sistem orde 1 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Sedangkan untuk bentuk umum dari sistem orde 2 dapat dinyatakan dalam bentuk standar berikut:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

D. Linear Quadratic Regulator

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam control theory modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-negara. Karena kesederhanaan metode ruang negara, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini.

Aplikasi luas membuat penggunaan teknik desain regulator kuadrat linier. 2 mewakili diagram blok sistem kontrol motor DC dengan Pengontrol LQR. Kecepatan motor dapat berubah pada paparan perubahan dalam beban dan gangguan eksternal lainnya. Pengurangan minimalisasi penyimpangan dalam kecepatan motor adalah fungsi LQR. Output dari sistem, kecepatan motor dibandingkan dengan input yang diterapkan pada sistem yaitu tegangan motor. Pengurangan penyimpangan kecepatan motor dilakukan oleh LQR.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

$$y = Cx \quad (4)$$

Indeks performansi dari minimum energi (costfunction/quadratic function) ditunjukkan oleh Persamaan (2).

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5)$$

(4)

Persamaan regulator dapat diselesaikan dengan menyelesaikan persamaan aljabar Riccati sesuai dengan Persamaan (5)-(7).

$$ATP+PA-PBR-1BTP+Q=0 \tag{6}$$

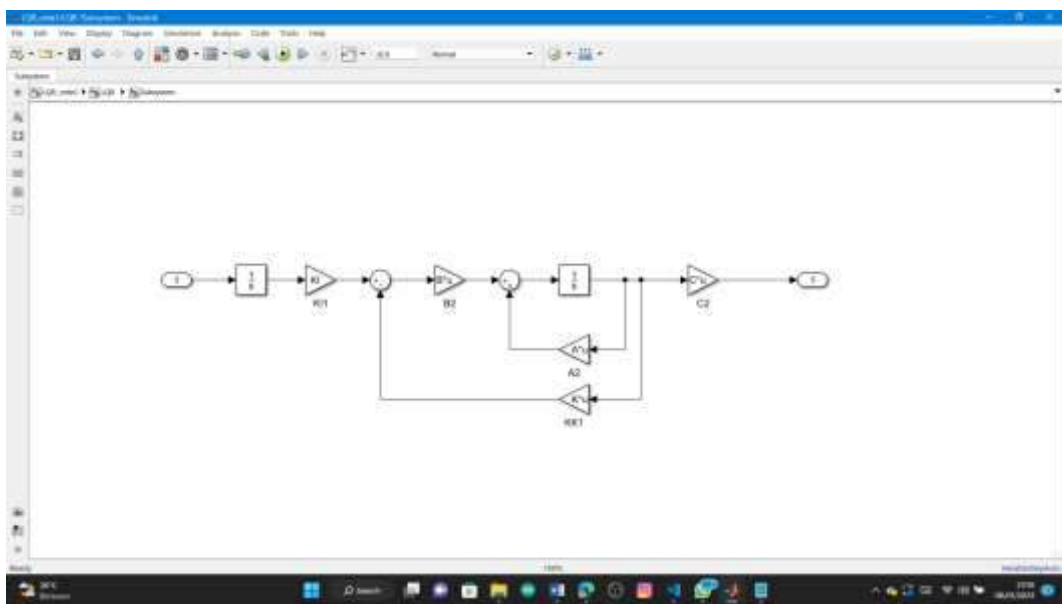
(5)

$$-K=R-1BTP \tag{7}$$

(6)

$$u=-Kx \tag{8}$$

(7)



Gambar 6.1 Pemodelan Linear Quadratic Regulator

E. Linear Quadratic Tracking

Linear Quadratic Tracking merupakan sistem pengaturan linear yang output sistem mengikuti referensi (trajectory) yang diinginkan. Suatu sistem mempunyai persamaan state (3) dan vektor kesalahan seperti Persamaan (4). Indeks performansi didefinisikan pada Persamaan (5).

$$x= Ax+Bu \tag{9}$$

$$y=Cx \tag{10}$$

(8)

$$e=z-y \tag{11}$$

(9)

$$J= \int_0^{\infty} e' F e dt + \int_0^{\infty} u' R u dt \tag{12}$$

(10)

Setelah mendapatkan model matematika sistem dalam bentuk state-space, matriks penyelesaian persamaan differential Riccati dapat didapatkan dengan Persamaan (11) untuk infinite-time case.

$$0 = -PA - A'P + PBR^{-1}B'P + C'QC \quad (13)$$

(11)

Matriks Q dan R dapat diasumsikan sesuai dengan performansi yang diinginkan sistem. Setelah mendapatkan persamaan Riccati, persamaan diferensial vektor nonhomogen dapat dicari menggunakan Persamaan (12).

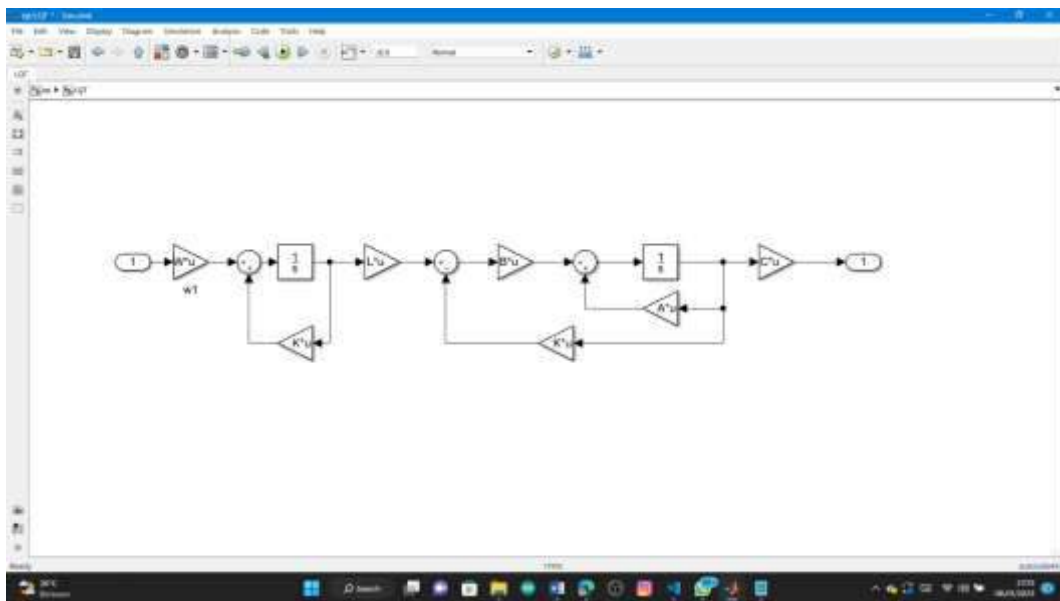
$$g = -A - BR^{-1}B'P \quad g - C'Qz \quad (14)$$

(12)

Setelah mendapatkan matriks P yang merupakan matriks definit positif yang simetris dan g, nilai gain feedback K dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (13).

$$K = R^{-1}B'P \quad (15)$$

(13)



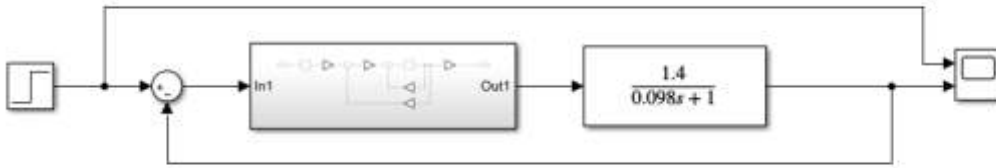
Gambar 6.2 Pemodelan Linear Quadratic Regulator

F. Noise

Pada sistem komunikasi *noise* merupakan sebuah sinyal-sinyal yang tidak diinginkan yang selalu ada dalam suatu sistem transmisi. *Noise* ini akan mengganggu kualitas dari sinyal terima yang diinginkan dan akhirnya mengganggu proses penerimaan dan pengiriman data.

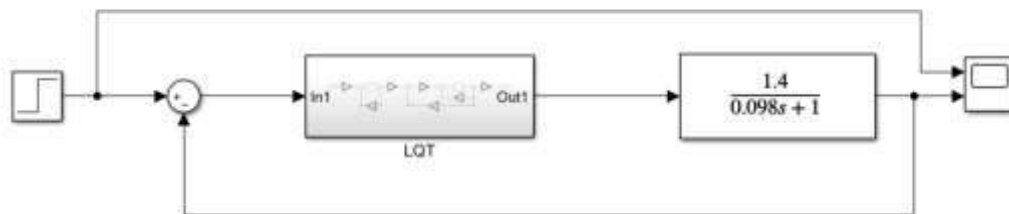
G. Pemodelan Motor DC

H. 2.3.1 LQR Orde 1 Motor DC



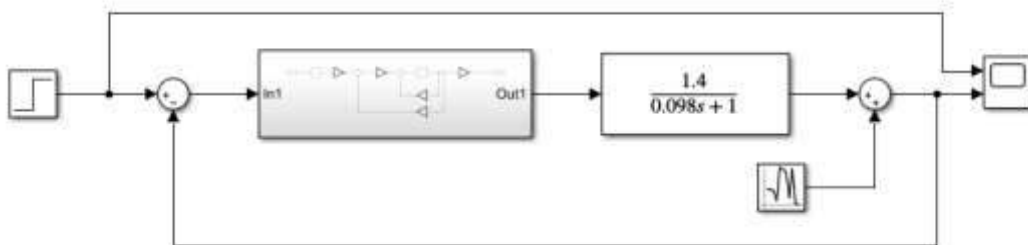
Gambar 6.3 LQR Pemodelan Orde 1 Motor DC

I. 2.3.2 LQT Orde 1 Motor DC



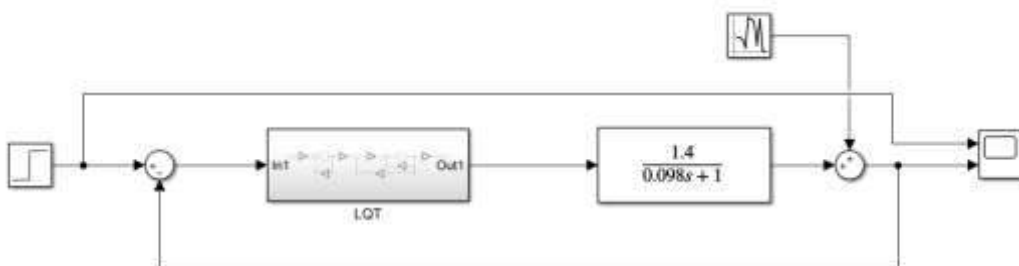
Gambar 6.4 LQR Pemodelan Orde 2 Motor DC

J. 2.3.3 LQR Orde 1 Motor DC dengan Noise



Gambar 6.5 LQR Pemodelan Orde 2 Motor DC dengan Noise

K. 2.3.4 LQT Orde 1 Motor DC dengan Noise



Gambar 6.6 LQR Pemodelan Orde 2 Motor DC dengan Noise

L. 2.4 Pemodelan Motor DC

Motor Parameters

- Length, θ and τ
- Block Performance
- Director of Rotation
- Reducer Ratio

Motor Length	Stage Number	Reducer Ratio									
18.5	2	10.01									
21.5	2	10.31	10.01								
24	2	10.61	10.31	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01
26.5	2	10.91	10.61	10.31	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01
29	2	11.21	10.91	10.61	10.31	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01

Motor Length	Motor Parameters		Motor Performance									
	Speed	Current	Speed	Current	Speed	Current	Speed	Current	Speed	Current	Speed	Current
18.5	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01	10.01
21.5	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31	10.31
24	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61	10.61
26.5	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91	10.91
29	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21	11.21

Gambar 6.7 Spesifikasi Motor DC 37GB500-72-2463

Nama Motor= Motor DC 37GB500-72-2463

$$\tau = 98,14 \text{ mNm} = 0,098 \text{ N/m}$$

$$\text{Current} = 70 \text{ mA} = 0,07 \text{ A}$$

$$\text{Voltage} = 24\text{V}$$

$$\text{Speed} = 270.91 \text{ m/s}$$

$$= 10,1$$

$$\text{Resistansi} = 342,85 \text{ ohm}$$

$$\text{Induktansi} = 0.00001805 \text{ H}$$

$$12 \times m (R12 + R22) \tag{16}$$

Momen Inersia=

$$12 \times 0,032 (112 + 112) \tag{17}$$

=

$$3,87 \text{ kg}\backslash\text{m}^2 \tag{18}$$

=

M. Model Matematika Orde 1 dan Orde 2

Orde 1

Bentuk umum fungsi alih orde 1

$$G(s) = Kts + I \tag{19}$$

(14)

Orde 1 Motor DC Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1

Dimana

$$\tau = K \cdot i \quad (20)$$

$$\tau = 0,098 \text{ Nm} \quad i = 0,07 \text{ A} \quad (21)$$

sehingga Persamaan umum orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (22)$$

$$K = \tau / i \quad (23)$$

$$K = 0,098 / 0,07 = 1,4 \quad (24)$$

Keterangan :

K = Koefisien motor DC = Torsi motor DC

I = Arus motor DC

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (25)$$

$$G(s) = 1,40,098s + 1 \quad (26)$$

Sehingga diperoleh Persamaan orde 1 motor DC :

Orde 2

Bentuk umum fungsi alih orde 2 sebagai berikut :

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (27)$$

Bentuk umum fungsi alih orde 2 sebagai berikut :

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (28)$$

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 2 pada motor dc sebagai berikut :

Diketahui :

$$\text{rasio redaman } \zeta = 10,3 : 1 \quad \omega = 2\pi f = 2 \times 3,14 \times 50 \text{ Hz} = 314 \text{ rad/s} \quad \omega^2 = 314^2 = 98596$$

Persamaan Umum Orde 2

$$: G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad G(s) = 98596s^2 + 231410,3 + 98596 \quad G(s) = 98596s^2 + 6468,4 + 98596 \quad (29)$$

Keterangan :

$$\omega_n = \text{frekuensi natural} \quad (30)$$

$$\zeta = \text{Rasio Redaman} \quad (31)$$

(17)

N. Script Matlab Linear Quadratic Regulator

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

```

clc;

% Model Motor DC

J = 3.872 ; b= 10.1 ; K= 1.4 ; R= 342.85 ; L = 0.00015 ;

% J = Momen inertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=

% Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [ zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

     0 1 0;

     0 0 1000];

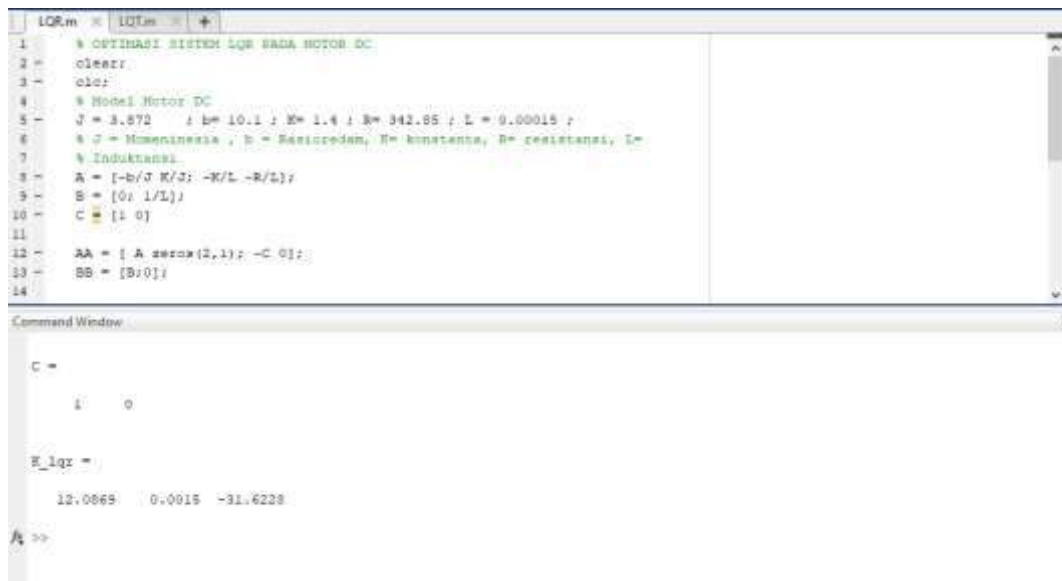
R = [1];

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];

```



```

1 % OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC
2 clear
3 clc
4 % Model Motor DC
5 J = 3.872 ; b= 10.1 ; K= 1.4 ; R= 342.85 ; L = 0.00015 ;
6 % J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=
7 % Induktansi
8 A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
9 B = [0; 1/L];
10 C = [1 0]
11
12 AA = [A zeros(2,1); -C 0];
13 BB = [B;0];
14

```

Command Window

```

C =
     1     0

K_lqr =
    12.0869    0.0015   -31.6228

```

Gambar 6.8 Hasil Running dari Script Matlab LQR

O. Script Matlab Linear Quadratic Tracking

```

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 3.872 ; b= 10.1 ; K= 1.4 ; R= 342.85 ; L = 0.00015 ;

% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

Q=10; R=0.0000000001; %0.00000000000001

W=C'*Q; %

[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P

K=inv(R)*B'*S %feedback Gain

ACL=(A-B*K)'

L=inv(R)*B' %model following gain

```

```

1 - clear;
2 - clc;
3 - % Model Motor DC
4 - J = 3.872 ; b = 10.1 ; K = 1.4 ; R = 343.85 ; L = 0.00015 ;
5 - % J = Momentum, b = konstanta, K = konstanta, R = resistansi, L = induktansi
6 - A = [-b/J K/J; -R/L -R/L];
7 - B = [0; 1/L];
8 - C = [1 0];
9 - Q=10; R=0.0000000001; %0.0000000000001
10 - K=C'*Q;
11 - [S,O,N,H]=eig(A,B,C'*Q+C,R) %eigenvalue & eigenvector & D
12 - %eigenvalue & feedback gain
13 - A_CL=(A-B*K)';
14 - %eigenvalue & model following gain

```

Command Window

```

1.0e+05 *
|
|-0.0000 -2.0918
| 0.0000 -0.0023
|
L =
1.0e+13 *
|
| 0 6.6667

```

Gambar 6.9 Hasil Running dari Script Matlab LQT

P. HASIL DAN Pembahasan

Pada hasil simulasi dapat dilihat nilai *input*, *output* dari *feedback* metode *Linear Quadratic Regulator* dan *Linear Quadratic Tracking*. Pada setiap percobaan memiliki hasil yang berbeda karena di setiap percobaannya memiliki rangkaian Simulink pada MATLAB yang berbeda semua. Untuk beberapa hasil pada MATLAB memiliki hasil yang melebihi batas dari perhitungan sehingga hasil simulasi tidak dapat di ketahui perhitungannya, dan pada beberapa simulasi yang menggunakan *noise* memiliki grafik yang susah untuk dilihat karena input dari simulasi sangat bermacam – macam.

Keterangan:

A = TUK SISO

B = TUK SISO dengan *NOISE*

Q. 3.1 Hasil Simulasi Motor DC

Tabel 6.1 Hasil Simulasi LQR dan LQT

Metode	Scope	Tanpa Noise	
		Set Point	Undershoot
LQR		1	-0.505%
LQT		1	-

Berdasarkan hasil yang ditampilkan oleh scope dapat dikatakan bahwa keluaran dari LQR orde 1 motor DC ini mencapai *set point* yang diinginkan meskipun awalnya melebihi atau undershoot -0.505% , sedangkan LQT orde 1 motor DC ini berbeda tidak mencapai *set*

point yang diinginkan. Grafik yang berwarna hijau dan kuning merupakan nilai *input* dari *step*. Sedangkan grafik berwarna biru merupakan keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC.

R. Hasil Simulasi Motor DC dengan Noise

Tabel 6.2 Hasil Simulasi SIMO dan SIMO Noise

Metode	Scope	Dengan Noise	
		Set Point	Undershoot
LQR		1	-0.505%
LQT		1	-0.505%

Berdasarkan hasil yang ditampilkan oleh scope dapat dikatakan bahwa keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC noise ini mencapai *set point* yang telah diinginkan, akan tetapi terdapat tambahan dari input noise dan mengakibatkan grafik tidak beraturan. Grafik yang berwarna kuning merupakan nilai *input* dari *step*. Sedangkan grafik berwarna biru merupakan keluaran dari LQR & LQT orde 1 motor DC noise.

S. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dalam melakukan simulasi Simulink pada *software* MATLAB adalah diperlukan fungsi *transfer* yang didapat dari pemodelan motor DC orde 1 untuk mengetahui *step response* dari sistem LQR & LQT motor DC. Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 diperlukan *datasheet* Motor DC 37GB500-72-2463 yang mendukung. Pada percobaan ini menggunakan *datasheet* dari Motor DC 37GB500-72-2463. Hasil simulasi dari sistem LQR & LQT dengan menggunakan fungsi transfer dari pemodelan matematis Motor DC 37GB500-72-2463 orde 1 memiliki keluaran *set point* yang diinginkan.

Daftar Pustaka

- [1] Lumintang, AADC, Yuniza, SI, Hidayat, EP, Nugraha, AT and Indarti, R. "Rancang Bangun Pendeteksi Kebakaran Dini Pada Kapal Ikan Berbasis IoT Dengan Komunikasi LoRa." Jurnal 7 Samudra 8.1, 2023
- [2] Tamimah, N, Sa'diyah, A, Ramadani, TA, Kusminah, IL, Sari, DP and "Penerapan Filtrasi Anaerobik di Masjid Sungai Geneng, Lamongan." Jurnal Cakrawala Maritim 8.1, 2025, pp. 105-114.
- [3] Nugraha, AT, Asri, P, Widodo, HA, Poetro, JE, Jamiin, MA, Mudjiono, U and "Anticipation of Deep Discharge of Batteries in Solar Panels Based on the Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm." SAGA: Journal of Technology and Information System 2.2, 2024, pp. 212-227.

- [4] Nugraha, AT and Sugianto, MGPA. "Development of a Monitoring System for Daily Fuel Tank Levels on Ships." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.1, 2024, pp. 23-31.
- [5] Ihsanudin, Y, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Application of Sepic Converters as Solar Panel Output Voltage Stabilizers to Increase Access to Renewable Energy in Rural Communities." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.1, 2024, pp. 40-45.
- [6] Fatqurrochman, MI and Nugraha, AT. "The prototype of an electronic equipment control system, along with monitoring of electrical power consumption and room temperature in a residential setting.." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [7] Nugraha, AT, Sobhita, RA and Firdaus, AA. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." *Emerging Trends in Industrial Electronics* 1.1, 2025, pp. 1-8.
- [8] Bintari, A, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Analisa Pentahanan Netral dengan Tahan Menggunakan Sistem TN-C." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 12.2, 2022, pp. 92-108.
- [9] Pradana, SY, Hazim, A and Nugraha, AT. "Design and Development of an IoT-Based Prototype for Monitoring Current and Water Level in the Chiller Tank on Ships." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [10] Evendi, M, Muttaqin, H, Aziz, N, Faza, M, Putra, M, Tadika, R, Nugraha, A and "Fungsi Ilmu dan Filsafat Ilmu dalam Kehidupan."
- [11] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [12] Nugraha, AT, Pratama, NA, Yuniza, SI and Maulana, MN. "Development of a Single-Phase Fully Controlled Rectifier for 2 HP DC Motor Applications." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 2.1, 2023, pp. 1-10.
- [13] Nugraha, AT, Setiyoko, AS, Hidayat, EP, Mudjiono, U, Widodo, HA and "Inspeksi Sistem Kelistrikan Kapal." ID Patent EC002,023,136,971, 2023
- [14] Arifuddin, R, Dirgantara, W, Sumarahinsih, A, Hafsari, RPI, Maulana, FI and "Baby room temperature and humidity control system using fuzzy logic." *Emitor: Jurnal teknik elektro*, 2024, pp. 275-280.
- [15] Rohman, YF, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Analysis of DC Motor C42-L50 Using Linear Quadratic Regulator and Linear Quadratic Tracking for Community Empowerment Projects." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025
- [16] Nugraha, AT, Widodo, HA, Pambudi, DSA, Cahyono, L, Apriani, M and "'PORTABLE-2WG'" Inovasi Turbin Pembangkit Listrik Portable Air Dan Angin Untuk Kebutuhan Rumah Tangga Pada Penduduk Daerah Aliran Sungai." ID Patent EC00,202,223,113, 2022
- [17] Hidayat, MS, Pambudi, DSA and Nugraha, AT. "Sistem Monitoring Air Compressor pada Sistem Pendistribusian Udara Berbasis IoT." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 12.2, 2022, pp. 126-140.
- [18] Nugraha, AT, Rudianto, Ahmad, MM, Prambudi, DSA, Utomo, AP and "Buku Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine.", 2021
- [19] Putra, MDH. "Rancang Bangun Battery Charger Dengan Sistem Constant Voltage Berbasis Kontrol Pi." *Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*, 2021
- [20] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L and Utomo, AP. "Eco Friendly Artificial Coral Reefs Melalui Recovery Limbah Cangkang Kerang Di Pantai Mutiara Desa Wisata." ID Patent EC002,022,116,738, 2022

BAB VII

Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) pada Motor DC M66 Series

Oleh: **Muhammad Indrastata Ifititana Arvi**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *Kontrol, LQR, LQT, Motor DC, Noise, Optimal*

Some industry players build or improve systems within an industry to produce better products than their competitors. The optimal control problem has recently attracted a lot of attention due to the increasing demand for high performance systems. The control system optimization concept compromises the selection and design of key performance indicators leading to an optimal control system under physical boundary conditions. When solving an optimal control system, one wants to find decision rules for the control system that minimize deviations from the ideal behavior. LQR is one of the optimal control methods for state space-based systems. The LQR controller has two parameters, namely the Q and R weight matrices, which must be determined so as to produce the appropriate optimal control action. LQT is an optimal control method that minimizes the objective function (Performance Index) and regulates the system (Plant) so that it tracks according to the desired reference. The output step response from the LQR DC motor M66 Series reaches an amplitude of 0.799 which can be rounded up to 1 so that it has reached the setpoint. For the step response of the LQT system, it has maximum results from LQR, namely achieving an amplitude of 0.99 which can be rounded up to 1 so that it has reached the setpoint. Has a rise time that is more optimal than the rise time step response LQR without noise at 1,509 ms and has an overshoot of 1.05% and an undershoot of 1.05%. It can be concluded from the results of the step response of the two systems that the M66 Series DC motor system using LQR has the same results. more optimal than the order 1 M66 Series DC motor because by using LQR, the step response of the M66 Series DC motor can reach a set point, has a stable graph, has a fast rise time, and has overshoot and undershoot with small values.

Abstrak

Beberapa pelaku industri membangun atau meningkatkan sistem dalam suatu industri untuk menghasilkan produk yang lebih baik dari pesaing mereka. Masalah kontrol optimal baru-baru ini menarik banyak perhatian karena meningkatnya permintaan untuk sistem berkinerja tinggi. Konsep optimalisasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan dan

desain indikator kinerja utama yang mengarah ke sistem kontrol yang optimal di bawah kondisi batas fisik. Saat menyelesaikan sistem kontrol optimal, seseorang ingin menemukan aturan keputusan untuk sistem kontrol yang meminimalkan penyimpangan dari perilaku idealnya. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. LQT adalah metode kontrol optimal yang meminimalisir fungsi tujuan (Performance Index) dan mengatur sistem (Plant) agar melakukan penjejakan sesuai referensi yang diinginkan Output step response dari LQR motor DC M66 Series mencapai amplitudo sebesar 0,799 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai setpoint. Untuk step response dari sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari LQR yaitu mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai setpoint. Memiliki rise time yang lebih maksimal dari rise time step response LQR tanpa noise di angka 1.509 ms dan memiliki overshoot 1,05% serta undershoot 1.05%. Dapat disimpulkan dari hasil step response kedua sistem bahwa sistem motor DC M66 Series dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor DC M66 Series orde 1 karena dengan menggunakan LQR, step response dari motor DC M66 Series dapat mencapai set point, memiliki grafik yang stabil, memiliki rise time yang cepat, serta memiliki overshoot dan undershoot dengan nilai yang kecil.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi yang pesat mempengaruhi semua bidang kehidupan saat ini. Tidak dapat dipungkiri bahwa kebutuhan akan teknologi lebih besar dibandingkan beberapa dekade yang lalu. Salah satu akibatnya adalah persaingan global, khususnya di sektor industri. Beberapa pelaku industri membangun atau meningkatkan sistem dalam suatu industri untuk menghasilkan produk yang lebih baik dari pesaing mereka. Masalah kontrol optimal baru-baru ini menarik banyak perhatian karena meningkatnya permintaan untuk sistem berkinerja tinggi. Konsep optimalisasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan dan desain indikator kinerja utama yang mengarah ke sistem kontrol yang optimal di bawah kondisi batas fisik. Saat menyelesaikan sistem kontrol optimal, seseorang ingin menemukan aturan keputusan untuk sistem kontrol yang meminimalkan penyimpangan dari perilaku idealnya.

Tujuan dari optimasi sistem adalah menentukan sinyal kendali yang tepat agar keluaran sistem dapat menjaga atau mengikuti referensi yang diberikan dan disaat yang sama,

meminimalkan atau memaksimalkan suatu indeks performansi yang diberikan. Kendali optimal terbagi menjadi 2 kasus, yaitu kasus *regulator* (dikenal sebagai *Linear Quadratic Regulator*) dan kasus *tracking* (dikenal sebagai *Linear Quadratic Tracking*). Pada kasus *tracking*. Pada laporan ini penulis membahas metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*). yang terkandung pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS yaitu. “Optimasi Sistem”.

2. METODOLOGI PENELITIAN

A. 2.1 LQR (Linear Quadratic Regulator)

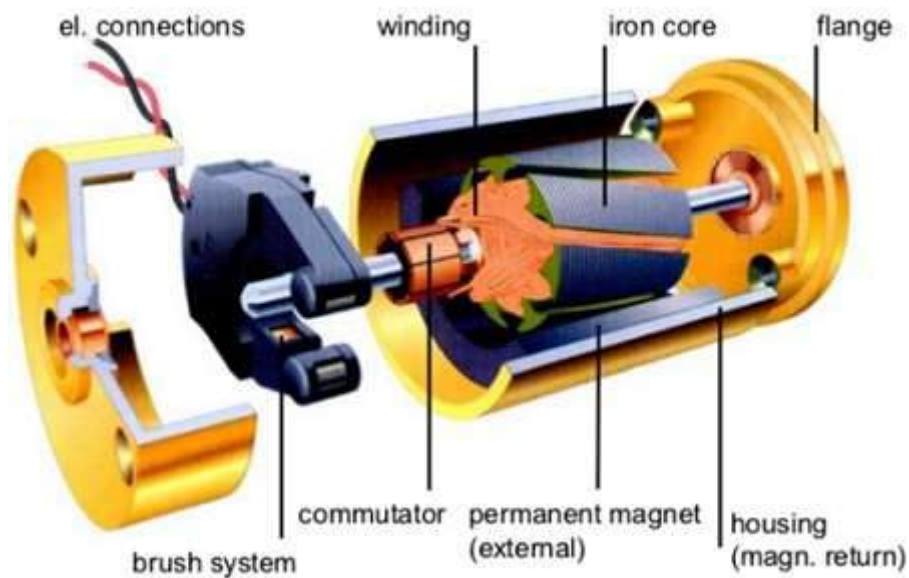
LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone quadcopter. Dengan menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari set point yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/noise.

B. 2.2 LQT (Linear Quadratic Tracking)

LQT adalah metode kontrol optimal yang meminimalisir fungsi tujuan (Performance Index) dan mengatur sistem (Plant) agar melakukan penjejakan sesuai referensi yang diinginkan (Naidu, 2018). Aktuator sistem kendali merupakan hasil dari pengendali pasif. Aktuator sendiri menggunakan nilai voltase yang dihasilkan dari LQT berdasarkan model dan setpoint yang telah ditentukan. LQT dipilih karena menggunakan pendekatan secara analitik dan sering digunakan untuk masalah penjejakan. Permasalahan yang telah diuraikan menjadi menarik untuk dikaji apabila LQT diterapkan pada sistem penjejak PV secara metode pasif. Tujuan dari penelitian ini adalah mengendalikan motor untuk menggerakkan motor DC Maxon EC60FLAT sedemikian dengan perhitungan secara analitik. Sehingga pada tulisan ini akan menghasilkan dan menganalisis penerapan LQT pada motor DC Maxon EC60FLAT sumbu tunggal dengan kendali pasif saja, lalu melakukan analisis simulasi dengan mengganti beberapa variasi nilai parameter momen inersia (J) terhadap model matematika motor DC.

C. 2.3 Motor DC

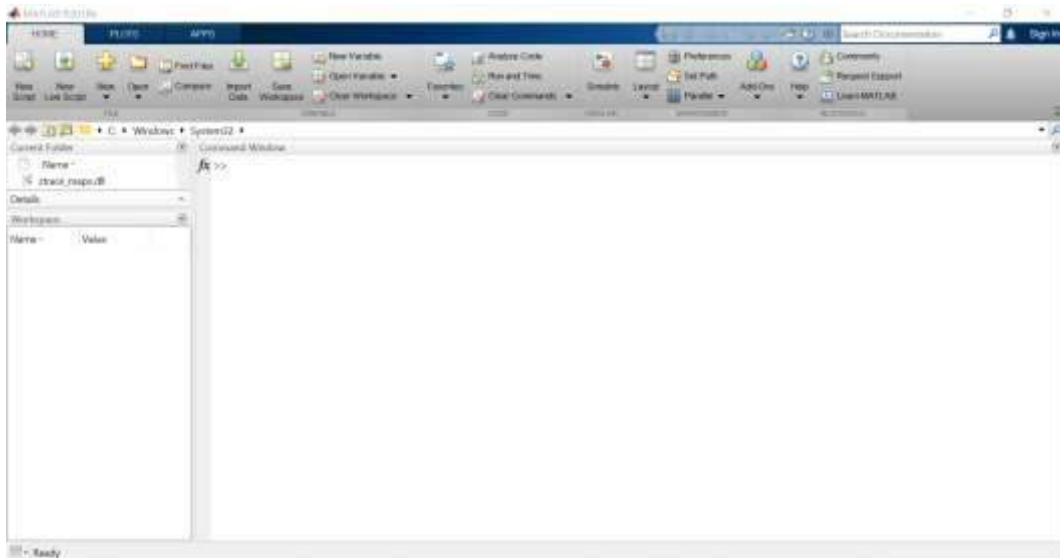
Motor Listrik DC atau DC Motor adalah suatu perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi kinetik atau gerakan (*motion*). Motor DC ini juga dapat disebut sebagai Motor Arus Searah. Seperti namanya, DC Motor memiliki dua terminal dan memerlukan tegangan arus searah atau DC (*Direct Current*) untuk dapat menggerakannya. Motor Listrik DC ini biasanya digunakan pada perangkat-perangkat Elektronik dan listrik yang menggunakan sumber listrik DC seperti *vibrator* ponsel, Kipas DC dan Bor Listrik DC. Konstruksi motor DC seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 7.1 Kontruksi Motor DC

2.4 Matlab

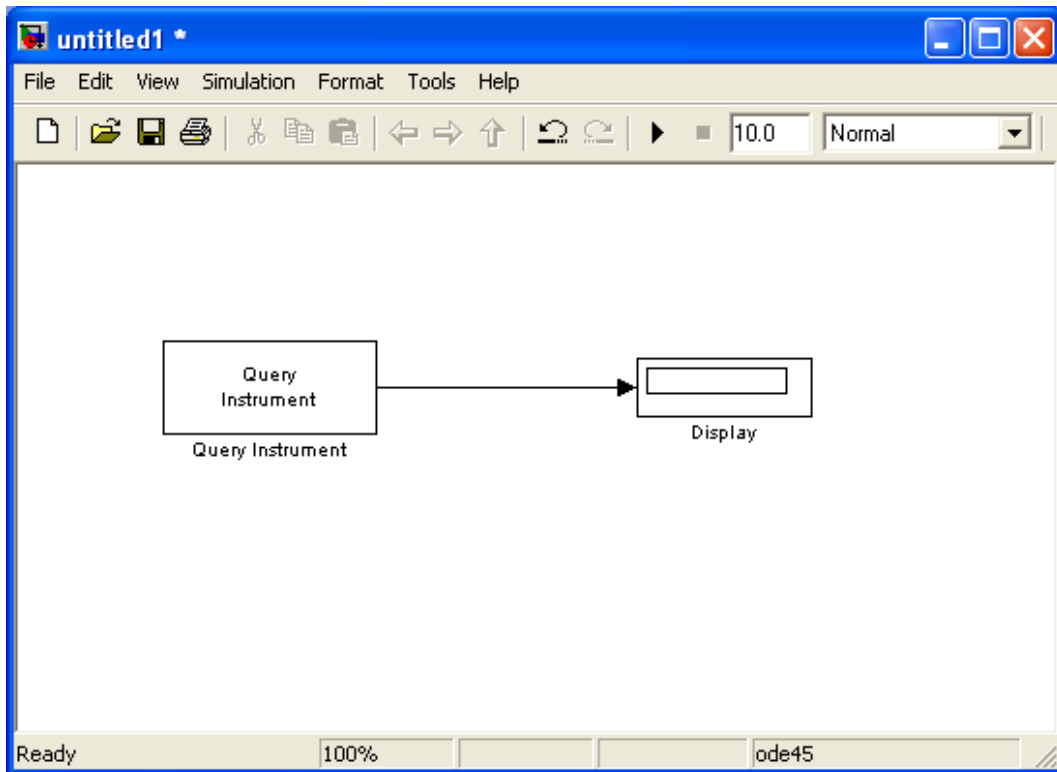
MATLAB adalah platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga umumnya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta menciptakan pemodelan dan aplikasi. Tampilan *software* MATLAB seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 7.2 Tampilan MATLAB

Pada simulasi untuk melihat respon yang dihasilkan oleh motor DC penulis menggunakan fitur Simulink pada MATLAB. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang berperan sebagai pemrograman grafis.

Kegunaan utama dari Simulink adalah untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasi dilakukan menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing secara ekuivalen. Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 7.3 Tampilan Simulink MATLAB

D. 2.5 Noise

Noise atau disturbance merupakan suatu sinyal yang cenderung mempengaruhi nilai keluaran dari suatu sistem. Disturbance yang dihasilkan oleh sistem dinamakan internal disturbance sedangkan disturbance yang muncul dari luar sistem disebut external disturbance. Noise tersebut tentunya akan membuat nilai keluaran menjadi tidak sesuai dengan apa yang kita inginkan (**I, 2013).

2.6 Identifikasi Motor DC

Motor DC atau motor arus searah adalah jenis motor listrik yang dapat mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanis . Prinsip kerjanya berdasarkan interaksi antar kedua fluks magnetik yang disebut dengan kumparan medan dan kumparan jangkar. Bentuk energi yang dihasilkan berupa putaran. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar).

Pada percobaan kali ini saya menggunakan motor DC M66 Series, dibawah ini Spesifikasi motor DC M66 Series

Specification: *Special models*

Special models:	M66CE-12/ DB24	M66CE-24 /DB12	
Nominal Motor Voltage	12 Vdc	24 Vdc	
Nominal Brake Voltage	24 Vdc	12 Vdc	
Specification			
Applied motor Voltage (Vdc)	12	30	24
Maximum Output Power (Watts)	15	30	20
No-load speed (rpm)	2,700	2,900	2,300
Speed @ rated torque (rpm)	1,800	2,300	1,600
Rated Torque (Ncm)	8	12	12
Peak Torque (Ncm)	25	36	27
Max. No load current (milli Amps)	120	65	60
Rotor Inertia (Kgcm ²)	0.214	0.214	
Mechanical time constant (milli secs)	24.5	17	
Torque Constant (Ncm / A)	4.1	9.8	
Voltage Constant (V / 1000 rpm)	4.27	10.3	
Rotor Resistance (Ohms)	1.9	7.8	
Rotor inductance (mH)	1.0	5.0	
Commutation	copper -graphite		
Bearings	pre-loaded ball		
Maximum radial load	100 N, 12 mm from bearing face		
Maximum axial load	15 N		
Ambient operating temperature range	-10 to +60 °C		
Brake specification			
Nominal Brake Voltage (Vdc)	24		12
Operating Current (Amps)	0.22		0.50
Min. Pull-in voltage (Vdc)	18		10
Max. Drop-out voltage (Vdc)	8		6
Holding Torque, de-energised (Ncm)	10		10

Gambar 7.4 Spesifikasi Motor DC M66 Series

Spesifikasi

Momen inersia (J): 0.214 kg.m²/s²

Redaman sistem mekanik (B): 0,1 Nms

Konstanta Motor (K): 0.32 Nm/A

Resistansi (R): 1.9 ohm

Induktansi (L): 0.001 H

Dari *datasheet* dapat di tentukan pula model matematis sistem orde satu dari motor DC IG-22GM. Sistem orde satu merupakan suatu sistem yang di dalamnya terdapat perubahan satu kali [10]. Berikut rincian pemodelan sistem orde satu.

Persamaan umum fungsi alih orde 1:

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

(2)

Berdasarkan *datasheet* motor DC IG-22GM maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

$$K = \tau i = 0.080 \cdot 25 = 0.32 \text{ nm} \quad (3)$$

Dimana sehingga Persamaan orde 1 motor dc : (3)

$$G(s) = 0.320.08s + 1 \quad (4)$$

2.7 Program Script Matlab

E. 2.7.1 Program Script Matlab LQR

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC m66 series
clear;
clc;
% Model Motor DC
J = 0.214 ; b= 0.1 ; K= 0.32 ; R= 1.9 ; L = 0.001 ;
% J = Momen inertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=
% Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
B = [0; 1/L];
C = [1 0]
AA = [ A zeros(2,1); -C 0];
BB = [B;0];
% Pole Placement
J = [-3 -4 -5];
K = acker(AA,BB,J);
KI = -K(3);
KK = [K(1) K(2)];
% Matrix LQR
Q = [1 0 0;
     0 1 0;
     0 0 1000];
R = [1] ;
K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)
KI2 = -K_lqr(3);
```

```
KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];
```

F. 2.7.2 Program Script Matlab LQT

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC m66 series  
clear;  
clc;  
% Model Motor DC  
J = 0.214 ; b = 0.1 ; K = 0.32 ; R = 1.9 ; L = 0.001 ;  
% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K = konstanta, R = resistansi, L = Induktansi  
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];  
B = [0; 1/L];  
C = [1 0]  
Q = 10; R = 0.0000000001; % 0.00000000000001  
W = C'*Q; %  
[S,o,m,n] = care(A,B,C'*Q*C,R) % m = v(t) % S = P  
K = inv(R)*B'*S % feedback Gain  
ACL = (A - B*K)'  
L = inv(R)*B' % model following gain
```

G. 2.8 Rangkaian LQR dan LQT

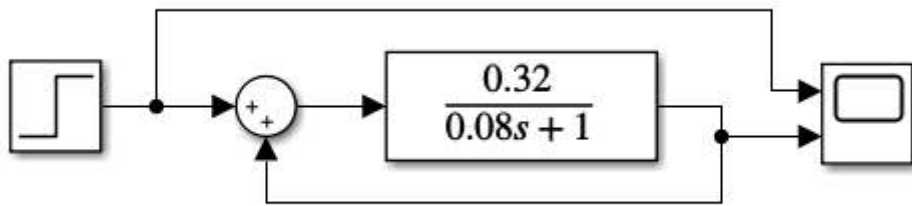
MATLAB merupakan platform pemrograman yang didesain khusus untuk pengolahan numerik. Menurut MathWorks sebagai pengembang dari MATLAB itu sendiri, MATLAB merupakan platform pemrograman yang menggunakan bahasa berbasis matriks sehingga biasanya digunakan untuk menganalisis data, membuat algoritma, serta menciptakan pemodelan dan aplikasi. Pada Percobaan ini saya menggunakan software Matlab dengan menggunakan salah satu fungsi pada software ini yaitu Simulink. Simulink merupakan salah satu komponen dari MATLAB yang memiliki fungsi sebagai pemrograman grafis untuk membuat simulasi sistem dinamik. Proses simulasinya menggunakan diagram fungsional yang meliputi blok yang terhubung dengan fungsinya masing-masing.

H. 2.8.1 Tabel Komponen

Tabel 7.1

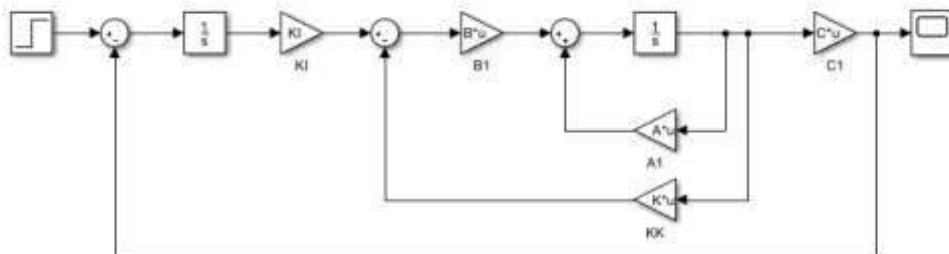
Daftar Komponen Simulink	

I. 2.8.2 Rangkaian Motor DC M66 Series



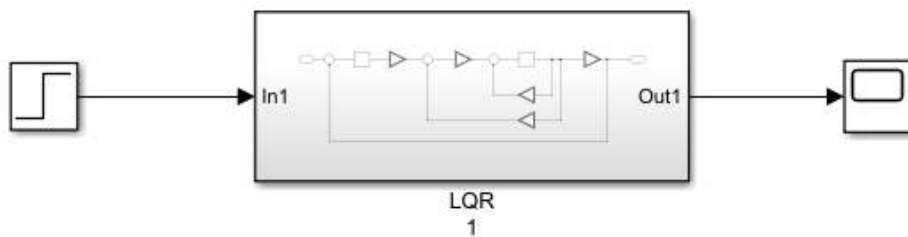
Gambar 7.5

J. 2.8.3 Rangkaian LQR



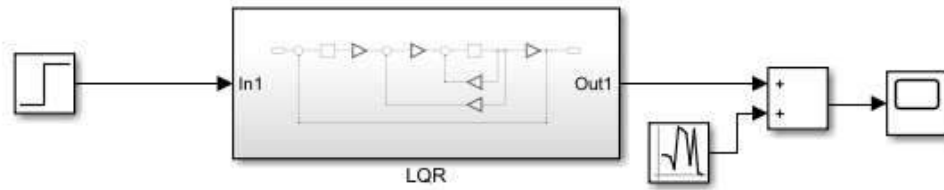
Gambar 7.6

K. 2.8.4 Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



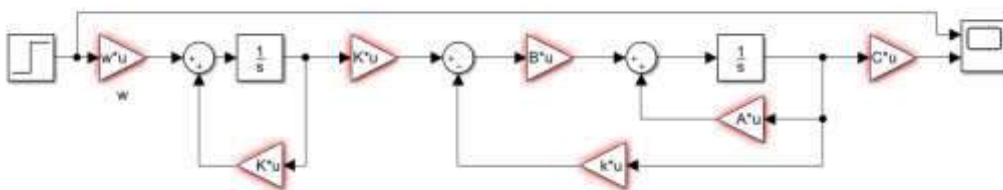
Gambar 7.7

L. 2.8.5 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



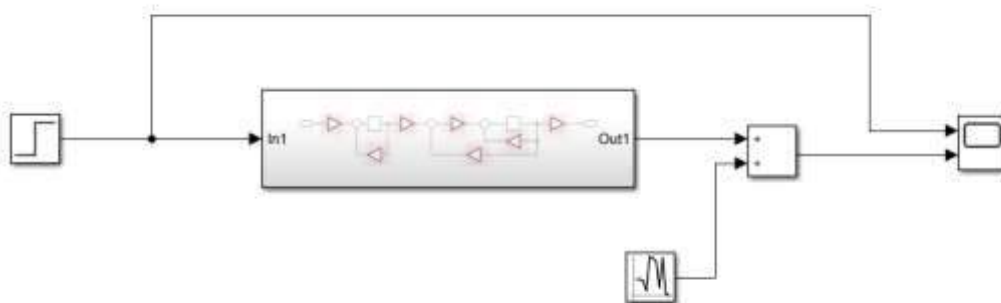
Gambar 7.8

2.8.6 Rangkaian LQT



Gambar 7.9

M. 2.8.7 Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 7.10

2.8.8 Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise

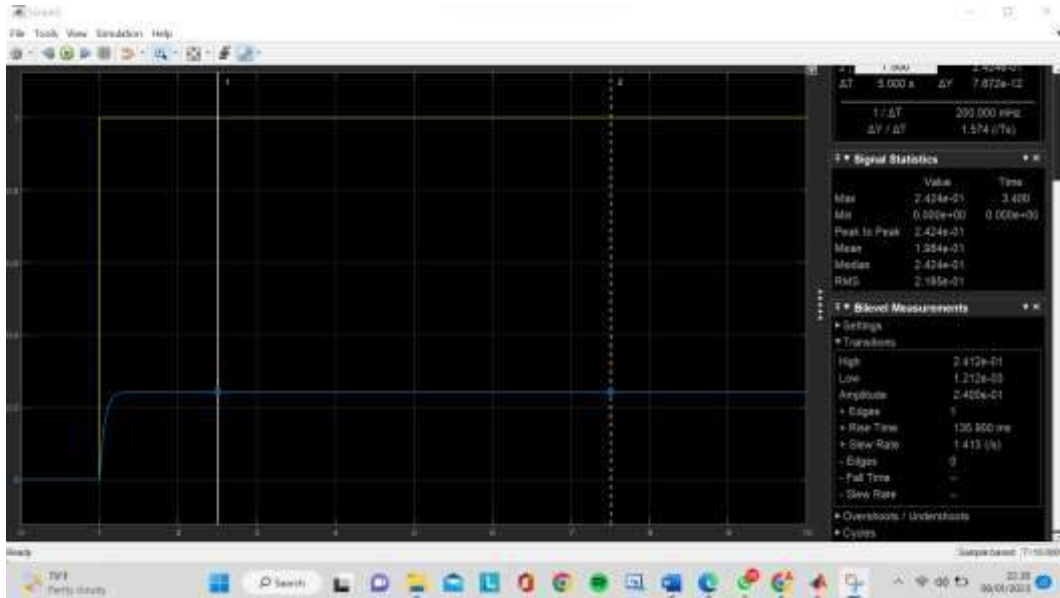


Gambar 7.11

N. HASIL DAN Pembahasan

O. 3.1. Hasil Simulasi

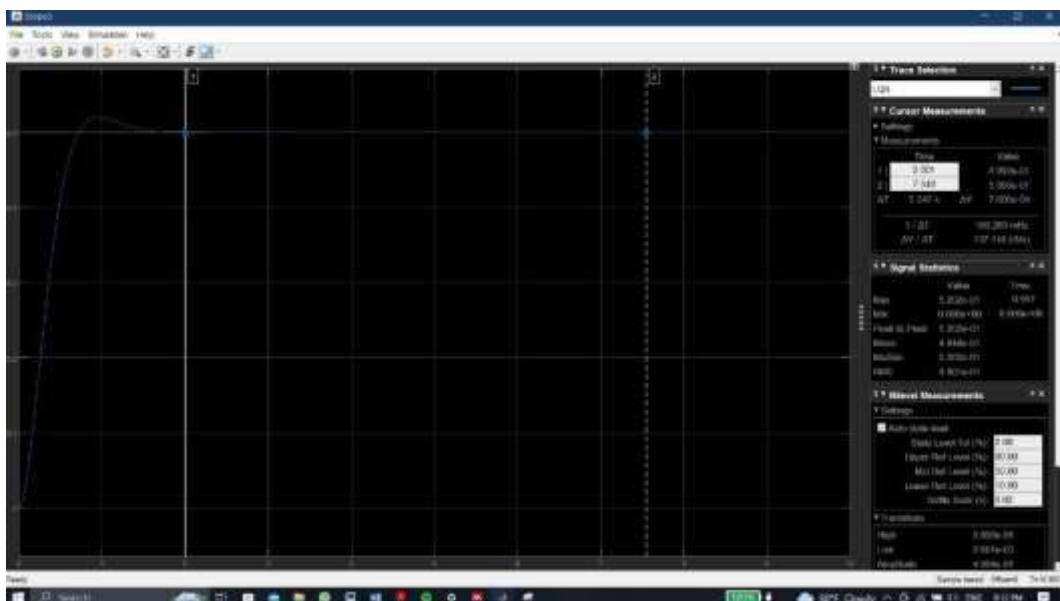
P. 3.1.1 Hasil Simulasi Motor DC M66 Series



Gambar 7.12 Tampilan Step Response

Pada Gambar 3.1 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M66 Series Pada LQR berorde satu tanpa *noise* didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,24 (tidak mencapai *set point*) dengan *rise time* 0,1359s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 0,472%.

Q. 3.1.2 Hasil Simulasi LQR tanpa Noise



Gambar 7.13 Tampilan Step Response LQR tanpa Noise

Pada Gambar 3.2 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M66 Series tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC M66 Series mencapai amplitudo sebesar 0.799 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga hampir mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1.509ms dan memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 1.05%.

R. 3.1.3 Hasil Simulasi LQR dengan Noise



Gambar 7.14 Tampilan Step Response LQR dengan Noise

Pada Gambar 3.3 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M66 Series LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC M66 Series hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 1,395 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 45.640ms dan memiliki *overshoot* sebesar 15.425% serta *undershoot* diangka -12.091%

Tabel 7.2 Data Simulasi Sistem LQR

No	Model Sistem	Amplitudo	Rise Time	Overshoot	Undershoot
1	LQR tanpa Noise	0.799	1.509 ms	1.05%	1.05%
2	LQR dengan Noise	1.395	45.640 ms	15.425%	-12.091%

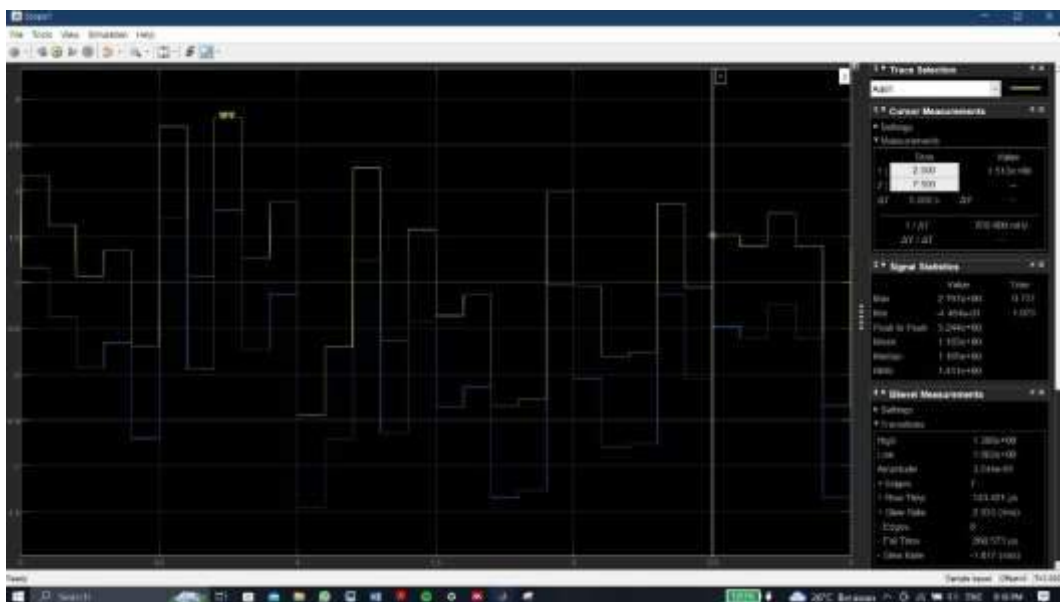
S. 3.1.4 Hasil Simulasi LQT tanpa Noise



Gambar 7.15 Tampilan Step Response LQT tanpa Noise

Pada Gambar 3.4 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M66 Series tanpa *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* mencapai amplitudo sebesar 0.99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 1.646 ms dan memiliki *overshoot* 1.531% dan *undershoot* yang cukup kecil diangka 1.18%.

T. 3.1.5 Hasil Simulasi LQT dengan Noise



Gambar 7.16 Tampilan Step Response LQT dengan Noise

Pada Gambar 3.5 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M66 Series LQR dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC M66 Series hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar 0.324 sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka 143.421 ms dan memiliki *overshoot* sebesar -193.474% serta *undershoot* diangka -193.474%

Tabel 7.3 Data Simulasi Sistem LQT

No	Model Sistem	Amplitudo	Rise Time	Overshoot	Undershoot
1	LQT tanpa Noise	0.99	1.646 ms	1.531%	1.18%
2	LQT dengan Noise	0.324	143.421ms	-193.474%	193.474%

U. Kesimpulan

$$G(s) = 0,029 \ 0.231s + 1 \quad (5)$$

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan *datasheet* motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan *transfer function* dan dengan hasil *run script* matlab LQR didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada *workspace*.

Hasil *step response* dari motor DC M66 Series berorde 1 didapat grafik *step response* yang stabil dengan amplitudo sebesar 0,24 dalam artian mencapai *setpoint* sebesar 1 dengan *rise time* 0,1359s dan sistem mengalami *overshoot* sebesar 0,501% dan *undershoot* 0,472%. Sedangkan *output step response* dari LQR motor DC M66 Series mencapai amplitudo sebesar 0,799 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*.

Untuk *step response* dari sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari LQR yaitu mencapai amplitudo sebesar 0,99 dapat dibulatkan menjadi 1 sehingga telah mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang lebih maksimal dari *rise time step response* LQR tanpa *noise* di angka 1.509 ms dan memiliki *overshoot* 1,05% serta *undershoot* 1.05%.

Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil *step response* kedua sistem bahwa sistem motor DC M66 Series dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor DC M66 Series orde 1 karena dengan menggunakan LQR, *step response* dari motor DC M66 Series dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang stabil, memiliki *rise time* yang cepat, serta memiliki *overshoot dan undershoot* dengan nilai yang kecil.

Daftar Pustaka

- [1] Shiddiq, MJ, Ramadhan, MF and Nugraha, AT. "Perencanaan Pembangkit Listrik Energi Bayu Kincir Savonius Guna Mewujudkan Pemanfaatan Renewable Energy Pada Jembatan Suramadu." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [2] Khabibi, SR, Poetro, JE and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Panel Sistem Kontrol dan Monitoring Motor 3 Fasa Dual Speed Berbasis Mikrokontroler." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 61-68.
- [3] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Optimization of Application Control Using LQR and LQT Approaches: A Study on Community-Based Development Programs." *Maritime in Community Service and Empowerment* 1.1, 2023, pp. 9-17.
- [4] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "TUNING PID UNTUK KONTROL KECEPATAN MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 88-97.
- [5] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Development of rocket telemetry in chamber gas pressure monitoring with the MPXV7002DP gas pressure sensor." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [6] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Controlled Single-Phase Full-Wave Rectifier Experiment for DC Shunt Motor Control." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 1.1, 2023, pp. 1-10.
- [7] Priyambodo, D and Nugraha, AT. "Design and build a photovoltaic and vertical Savonius turbine power plant as an alternative power supply to help save energy in skyscrapers." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2021
- [8] Ruddianto, R, Nugraha, AT and Pambudi, DSA. "The experiment practical design of marine auxiliary engine monitoring and control system." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2021
- [9] Cahyono, L, Apriani, M, Utomo, AP, Nugraha, AT, Setiawan, A, Fatoni, A and "Pelatihan Pembuatan Lilin Aromaterapi dari Minyak Jelantah Sebagai Sarana Peduli Lingkungan Perairan dan Implementasi Konsep Ekonomi Sirkular Warga Bumi Suko Indah." *Dharma Raflesia: Jurnal Ilmiah Pengembangan dan Penerapan IPTEKS* 20.1, 2022, pp. 53-67.
- [10] Febrianto, R and Nugraha, AT. "Perancangan Battery Charger Menggunakan Energi Penggerak Mikro Hidro Berbasis Arduino Uno." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [11] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 29-38.
- [12] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP, Priyambodo, D, Hari, MD and "Rancang Bangun Battery Charger Pada Pembangkit Listrik Portabel Energi Terbarukan Berbasis Arduino Uno R3." ID Patent EC002,022,104,299, 2022
- [13] Negeri, ATNPP and Negeri, MJSPP. "Comparison of Insulated Switch Gear with Desiccant Addition to SF6 Gas Quality System at Waru Substation."
- [14] Zaldi, HF, Subiyanto, L and Nugraha, AT. "Sistem Monitoring Pengujian Tekanan pada Pipa Air PVC Berbasis Arduino dan IoT." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.2, 2021, pp. 40-48.
- [15] Ainudin, FH and Nugraha, AT. "Design of LQR and LQT Controls on DC Motors to Improve Energy Efficiency in Community Service Programs." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2, 2024, pp. 7-13.
- [16] Hidayat, EP, Asri, P, Nugraha, AT and Agna, DIY. "PROTOTIPE SISTEM PENGENDALIAN DAN PEMANTAUAN CARGO HOLD BILGE KAPAL DENGAN METODE DECISION TREE BERBASIS MIKROKONTROLER." *Jurnal 7 Samudra* 8.2, 2023, pp. 93-108.
- [17] Intyanto, GW, Trihatmojo, AA, Yuniarti, DAF and Nugraha, AT. "ELDOC-Design of Electric Dolly Camera for Video Recording Using the Omni-Direction Wheel." *Walisongo Journal of Information Technology* 5.1, 2023, pp. 41-52.

- [18] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "KONTROL LQT UNTUK LEPAS LANDAS DAN Pendaratan Vertikal pada Pesawat Tanpa Awak Coaxial Trirotor." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 56-64.
- [19] Fatqurrochman, MI, Saputra, DE and Nugraha, AT. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motors in K3 System Using LQR Tracking Controller for Improved Operational Efficiency and Safety." Journal of Safety, Health, and Environmental Engineering 3.2, 2025, pp. 1-9.
- [20] Pratama, MST, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Elektromekanis dan Analisis Fungsi Alih Motor DC Maxon DCX 35 L untuk Sistem Kontrol Presisi." Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1, 2025

BAB VIII

Respons Output dengan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 834-7641

Oleh: **Muhammad Iqbal Al Haidar**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: DC RS PRO 834-7641, LQR, LQT, optimasi sistem, SISO, MISO, SIMO, MIMO

Technology is developing very fast, in making technology, of course, there are various methods that are applied by each maker. One of the methods in making technology is by way of system optimization. System optimization is one of the ways to give the best results for a technology that was created. In system optimization there are also various methods, namely SISO, MISO, SIMO, MIMO, and also Noise. In this discussion, we will discuss a system optimization with a series of SISO, MISO, SIMO, MIMO using the RS PRO 834-7641 DC Motor as a plan. In the self-control system, the RS PRO 834-7641 DC Motor is one of the plants that has very easy access. LQR is one of the optimal control methods for state space-based systems. The LQR controller has two parameters, namely the Q and R weight matrices, which must be determined so as to produce the appropriate optimal control action. LQT (Linear-Quadratic Tracker) is the main method for tracking problem classes in linear systems. LQT is designed to design the optimal control in such a way that the linear control system can track the specified reference path.

Abstrak

Teknologi berkembang sangat cepat, dalam pembuatan teknologi tentu memiliki berbagai macam metode yang diterapkan masing-masing pembuatnya. Salah satu metode dalam pembuatan teknologi dengan cara optimasi sistem. Optimasi sistem merupakan salah satu cara yang dilakukan untuk memberikan hasil terbaik suatu teknologi yang diciptakan. Dalam optimasi sistem juga terdapat berbagai macam metode yaitu SISO, MISO, SIMO, MIMO, dan juga *Noise*. Dalam pembahasan kali ini akan dibahas sebuah optimasi sistem dengan rangkaian SISO, MISO, SIMO, MIMO dengan menggunakan Motor DC RS PRO 834-7641 sebagai plan. Dalam sistem kendali sendiri Motor DC RS PRO 834-7641 merupakan salah satu plant yang memiliki akses yang sangat mudah. LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R , yang harus ditentukan sehingga

dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. LQT (Linear-Quadratic Tracker) merupakan metode utama untuk kelas masalah tracking dalam sistem linier. LQT di desain untuk merancang kontrol optimal sedemikian rupa sehingga sistem kontrol linier dapat melacak lintasan referensi yang ditentukan.

PENDAHULUAN

Persoalan kontrol optimal telah menarik perhatian yang sangat besar pada saat ini, hal itu diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan sistem dengan performansi tinggi. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik. Dalam menyelesaikan sistem kontrol optimal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya.

LQR merupakan salah satu metode kontrol optimal pada sistem yang berbasis ruang keadaan. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai. Contoh implementasi dari metode LQR seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga drone quadcopter. Dengan menggunakan LQR sistem akan mempertahankan keadaan pada titik nol dari set point yang telah ditetapkan sehingga menjaga sistem tetap stabil walaupun mendapat gangguan/noise. Metode LQR menggunakan plant motor DC yang telah disertai datasheet. Datasheet tersebut akan di masukkan pada script MATLAB kemudian disimulasikan menggunakan software MATLAB Simulink untuk melihat step response. Motor DC yang digunakan yaitu tipe BN-42 yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi.

Optimasi sistem memiliki berbagai macam rangkaian diantaranya: SISO (*single input single output*), SIMO (*single input multiple output*), MISO (*multiple input single output*), MIMO (*multiple input multiple output*), *noise*, LQR, LQT, dll. Pada penelitian ini, penulis menggunakan sistem kendali *loop* tertutup untuk mengetahui bagaimana respon motor DC tipe RS PRO 834-7641 dengan pemodelan matematis orde 1 bila menjadi plant pada suatu sistem. Penulis melakukan simulasi menggunakan metode LQR dan LQT pada motor DC tipe RS PRO 834-7641. LQR (*Linear-Quadratic Regulator*) merupakan salah satu metode kendali state space yang memerlukan informasi dari keseluruhan sistem. Untuk mencapai nilai gain optimal maka perlu melakukan pembobotan untuk nilai Q dan R pada LQR. LQT

(*Linear-Quadratic Tracker*) merupakan metode utama untuk kelas masalah *tracking* dalam sistem linier. LQT di desain untuk merancang kontrol optimal sedemikian rupa sehingga sistem kontrol linier dapat melacak lintasan referensi yang ditentukan. Kontrol optimal dapat dicapai dengan meminimalkan fungsi nilai kuadrat yang ditentukan. LQT terdiri dari bagian *feedback* dan *feed-forward* yang dihitung dengan *Algebraic Riccati Equation* (ARE).

Pada penelitian ini penulis menggunakan *Simulink* untuk mensimulasikan sistem yang dibuat menggunakan metode LQR dan LQT. *Simulink* adalah *graphical Extension Matlab* untuk memodelkan dan mensimulasikan sebuah sistem. Dalam *simulink*, sistem digambarkan sebagai sebuah block diagram, diantaranya *transfer function*, *summing junction*, di dalamnya terdapat pula *virtual input* dan *output device* seperti *function generator* dan *oscilloscope*.

Pemodelan matematis merupakan teknik untuk mempresentasikan suatu sistem yang kompleks ke dalam model matematika. Dengan demikian, model matematika yang diformulasi diharapkan mampu menjelaskan situasi kompleks yang sedang diamati. Penulis melakukan perhitungan mengacu pada *datasheet* motor DC RS PRO 834-7641 untuk mendapatkan pemodelan matematis orde 1 yang digunakan sebagai fungsi transfer (*transfer function*) *plant* yang merupakan suatu hubungan matematis antara *input* dan *output* dari komponen sistem kontrol.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Berikut merupakan tahapan dari penelitian yang dilakukan dalam penyusunan paper

Studi literatur

Pencarian referensi digunakan untuk mempermudah penulis dalam menyusun paper, referensi digunakan oleh penulis sebagai studi literatur penulis dan juga menambah pemahaman mengenai masalah yang dibahas dalam paper. Serta sebagai acuan dalam pembuatan paper.

Pembuatan model matematis

Dalam tahapan ini penulis melakukan perhitungan secara matematis untuk pembuktian secara teoritis dari studi literatur yang telah didapat. Dalam tahapan ini penulis akan mendapatkan model perhitungan matematis yang nantinya akan dimasukkan dalam rangkaian yang dibuat.

Pembuatan rangkaian

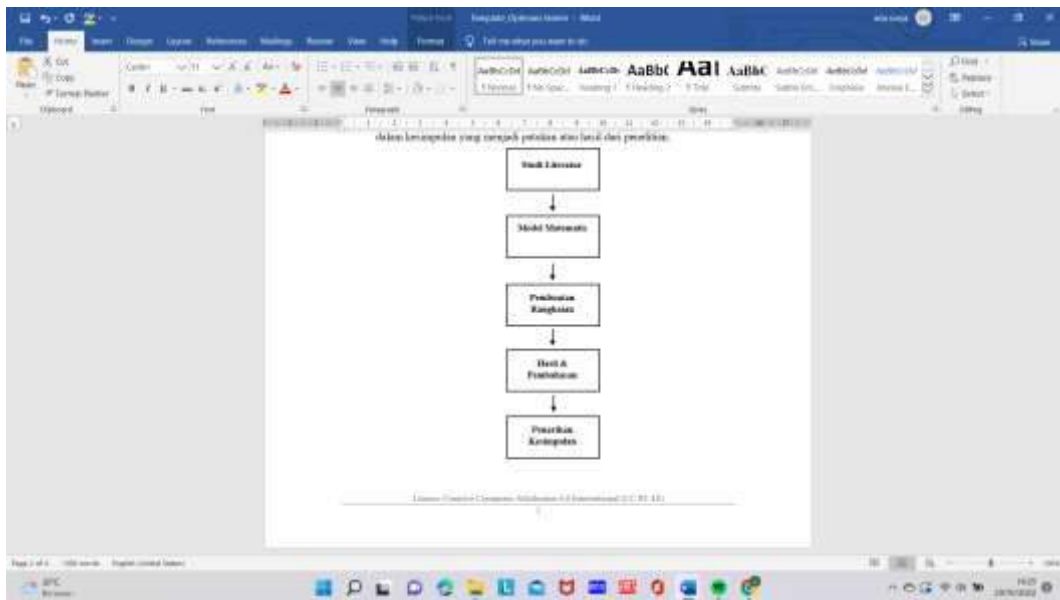
Pembuatan rangkaian LQR dan rangkaian LQT dengan plant motor DC RS PRO 834-7641 dengan menggunakan bantuan software matlab.

Hasil dan pembahasan

Hasil dan pembahasan berisi hasil dari rangkaian yang telah dibuat menggunakan matlab. Terdapat gambar rangkaian dan hasil dari gelombang yang dihasilkan oleh scope. Pembahasan berupa tabel untuk membandingkan hasil dari rangkaian LQR dan rangkaian LQT dengan plant motor DC RS PRO 834-7641.

Penarikan kesimpulan

Dalam tahapan ini penulis melakukan penarikan kesimpulan yang diambil dari hasil dan pembahasan. Terdapat beberapa poin penting yang dituliskan penulis dalam kesimpulan yang menjadi patokan atau hasil dari penelitian.



Gambar 8.1

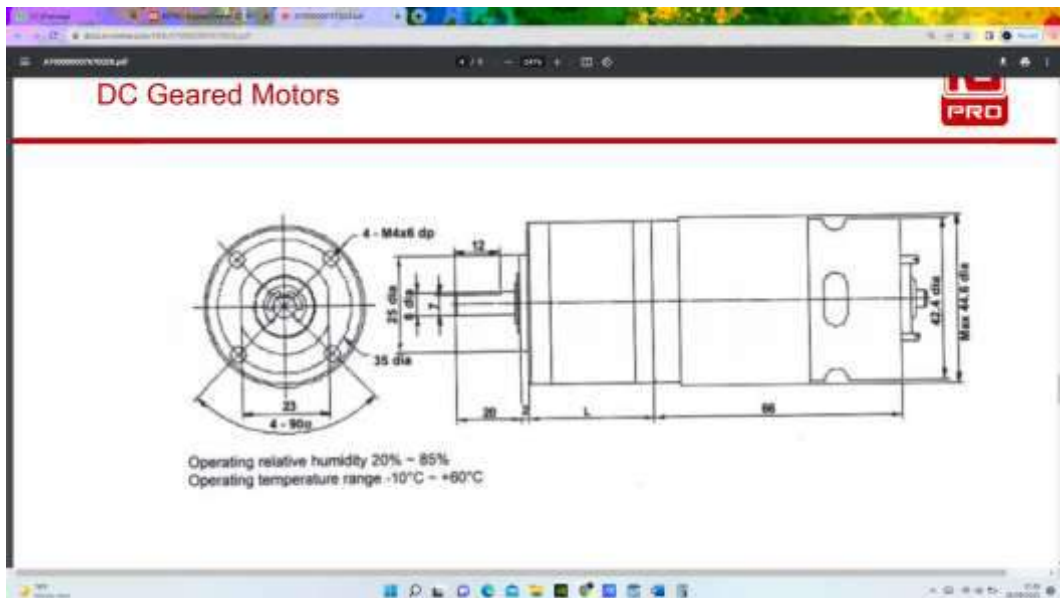
Diagram 1 Alur Tahap Penelitian

2.2 Metode Penyelesaian Masalah

1. Pemodelan Motor DC RS PRO 834-7641



Gambar 8.2 Motor DC RS PRO 834-7641



Gambar 8.3 Motor DC RS PRO 834-7641 datasheet



Gambar 8.4

Spesifikasi

Nama Motor = Motor DC RS PRO 834-7641

$\tau = 1,8 \text{ N/m}$

No load current = 900 mA = 0,9 A

Rated Current = 5500 mA = 5,5 A

Voltage = 12V

Speed = 143 rpm atau 14,97 m/s

Reduction Ratio = 1:49

Pemodelan Orde 1

Bentuk umum fungsi alih orde 1:

$$KTs + I \tag{1}$$

G (s) =

Orde 1 Motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \tag{2}$$

Dimana sehingga

$$TI = 1,85,5 = 0,32 \tag{3}$$

K =

Persamaan orde 1 motor dc :

$$KTs + 1 = 0,321,8 + 1$$

(4)

G(s) =

Program Script Matlab LQR

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J=0.00000242 ; b=0.1 ; K=0.0167 ; R=0.343 ; L =0.00018 ;

% J = Momen inertia, b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=

% Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

AA = [A zeros(2,1); -C 0];-

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J)

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

0 1 0;

0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

KI2=-K_lqr(3);

KK2=[K_lqr(1) K_lqr(2)];

Program Script Matlab LQT

clear

clc

```

%parameter sistem MSD

m=2;

k=8;

b=6;

%Matriks pada state

A=[0 1;k/m -b/m];

B=[0;1/m];

C=[1 0];

%bobot

Q=[1 0;0 1];

R=10;

[S,eig,G] = care(A,B,G) %riccati 0=A'S+SA-SB(inv R)B'S+Q

Kx=inv(R)*B'*S %feedback Gain Kx

Kr=(Kx*(inv(A))*B-eye(1))*(inv(C*(inv(A))*B))

Ahat=[0 1 0;-k/m -b/m 0;1 0 0]

Bhat=[0;1/m;0]

%bobot hat

Qhat=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];

Rhat=6;

[Shat,eighat,Ghat] = care(Ahat,Bhat,Qhat) %Riccati 0=A'S+SA-SB(inv R)B'S+Q

Khat=inv(Rhat)*Bhat'*Shat

Kw=Khat(:,3)

Tools simulink

```

Tabel 8.1 Simulink Tools

Komponen	Nama Komponen
	Add
	Step
	Random Number
	Gain
	Integrator
	Scope

2.3 Kendali Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (5)$$

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal control u yang meminimumkan indeks performansi J .

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (6)$$

LQR menemukan hukum input kontrol optimal u^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimumkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^* = -Kx \quad (7)$$

Di mana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimumkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A , B , Q dan R . Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (8)$$

$$K = A X - B K x = A - B K x \quad (9)$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi

$$\dot{x} = A X - B K x = A - B K x \quad (10)$$

2.4 Kendali Optimal Linear Quadratic Tracker (LQT)

Linear Quadratic Tracker (LQT) terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linear bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam:

$$r(t) = [V_{ref} \ 0]^T \quad (9)$$

V_{ref} merupakan sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimumkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut:

$$J = \int_0^T (x^T - r^T) T Q (x^T - r^T + dt) T R dt \quad (10)$$

Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi cost, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika state-variations besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol *affine* yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada,

$$dt = -Kx + K_{ff}v_{ref} \quad (11)$$

Dimana

$$K = R^{-1} B^T P \quad (12)$$

$$K_{ff} = R^{-1} B^T ((A - BK)^T)^{-1} H^T Q \quad (13)$$

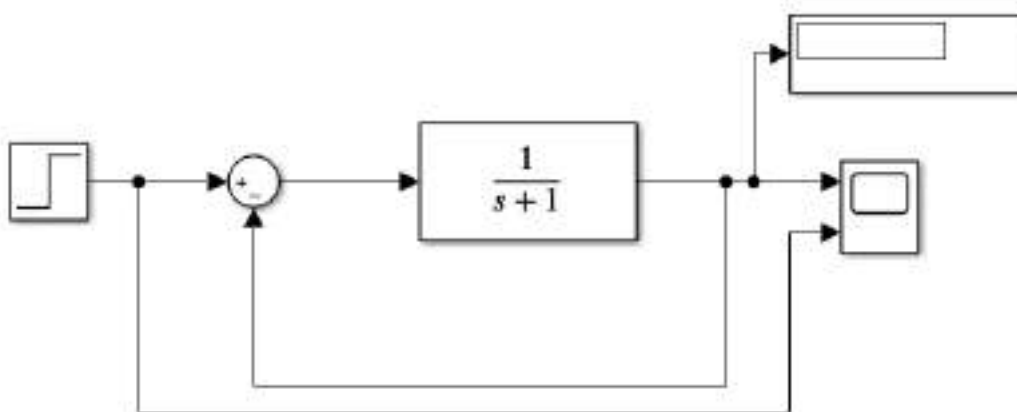
Vektor penguatan, K, membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P, ditunjukkan pada (12). Matriks, P, untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + H^T Q H = 0 \quad (14)$$

2.5 Simulasi Rangkaian Sistem pada Matlab

Rangkaian Orde Satu Motor DC RS PRO 834-7641

Rangkaian orde satu digunakan untuk mengetahui keluaran respon asli pada Motor DC RS PRO 834-7641 tanpa dipengaruhi metode optimasi dan *noise*.



Gambar 8.5

Gambar 2.4 adalah rangkaian orde satu motor DC yang terdiri dari satu *input* dan satu *output*. *Input* menggunakan jenis *step*. *Transfer function* pada rangkaian tersebut berupa

permodelan Motor DC RS PRO 834-7641 orde satu. Keluaran respon ditampilkan pada *scope* untuk melihat hasil respon.

Rangkaian *Linear Quadratic Regulation (LQR)* Motor DC RS PRO 834-7641

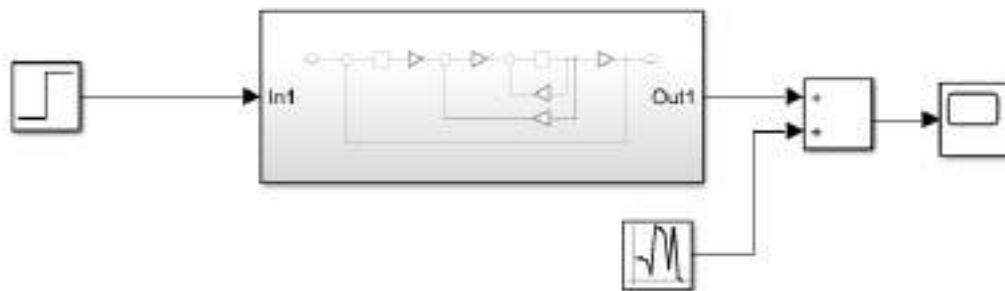
Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 834-7641 digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motr DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 8.6

Rangkaian *Linear Quadratic Regulation (LQR)* Motor DC RS PRO 834-7641 dengan *Noise*

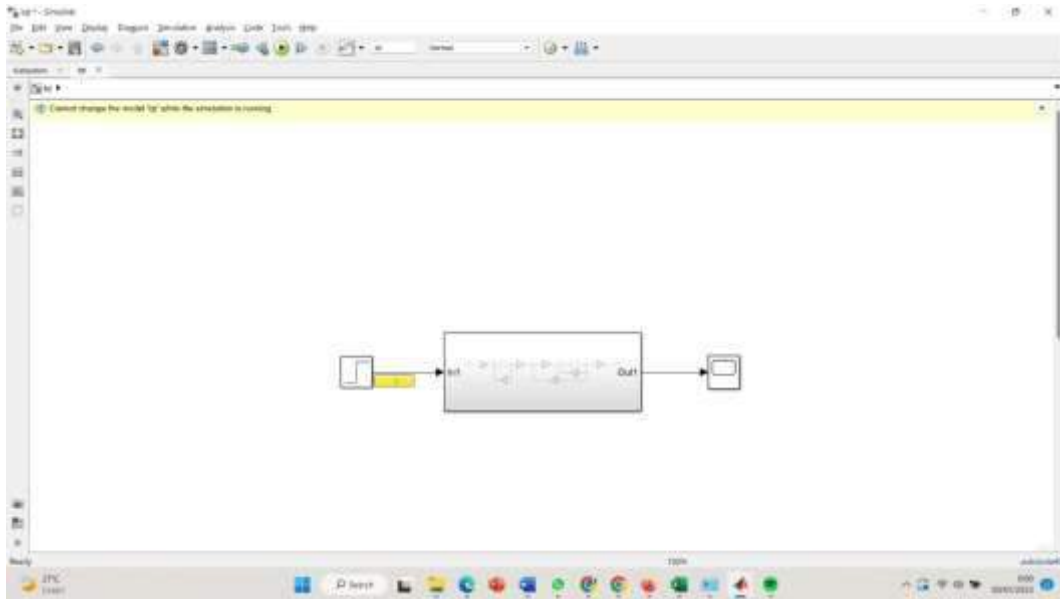
Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 834-7641 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 8.7

Rangkaian *Linear Quadratic Tracker (LQT)* Motor DC RS PRO 834-7641

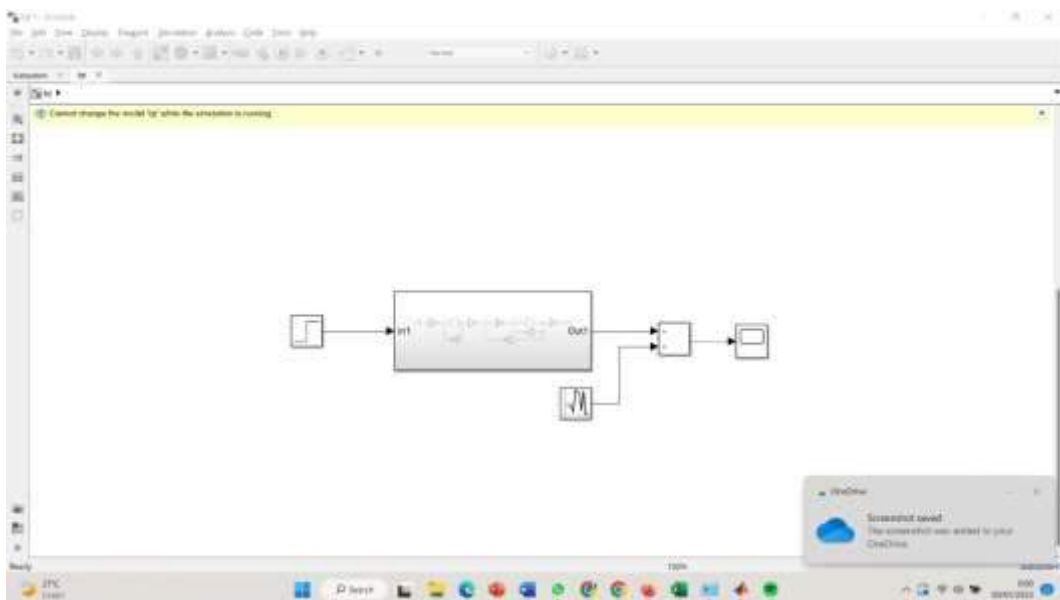
Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 834-7641 digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motr DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 8.8

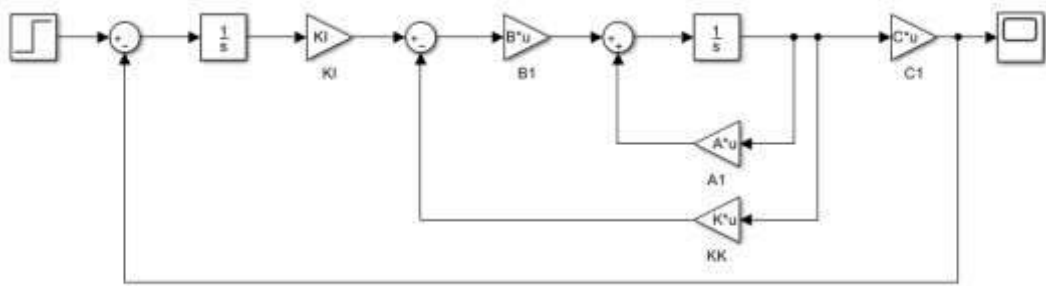
Rangkaian *Linear Quadratic Tracker (LQT)* Motor DC RS PRO 834-7641 dengan *Noise*

Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 834-7641 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQT dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.

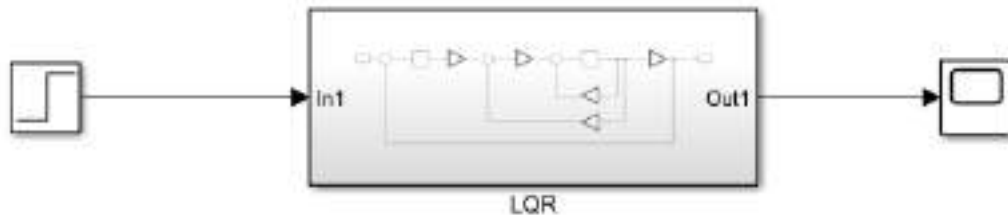


Gambar 8.9 Rangkaian LQR

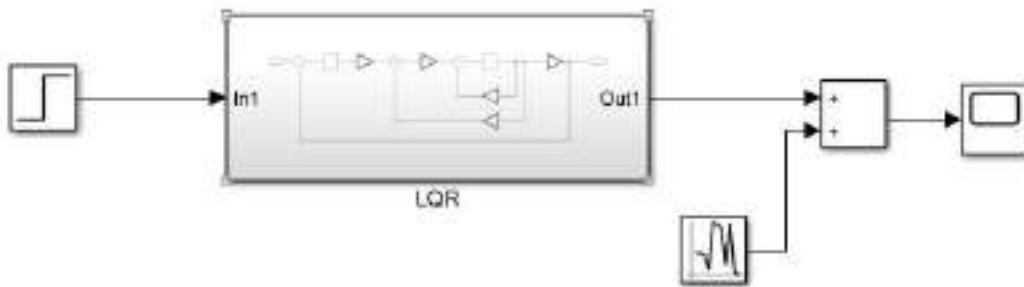
3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 8.10 Rangkaian LQR Subsystem LQR tanpa Noise



Gambar 8.11 Rangkaian LQR Subsystem LQR dengan Noise



Gambar 8.12

Hasil Respon Orde Satu Motor DC RS PRO 834-7641

Keluaran respon orde satu, terlihat grafik respon memiliki *output* yang jauh dari *set point*. Gelombang warna oranye merupakan hasil respon motor sedangkan yang warna biru adalah *set point*. *Set point* bernilai 0,5 sedangkan respon motor hanya di angka 0,07, terpaut jauh dari *set point*. Motor DC RS PRO 834-7641 memiliki karakteristik linear yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak ada *ripple*. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke 2. Respon tersebut pada optimasi terbilang lambat.



Gambar 8.13

Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR

Keluaran respon rangkaian LQR, terlihat grafik respon motor 37-GB500 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun *undershoot*. Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan metode *Linear Quadratic Regulation* (LQR) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.



Gambar 8.14 Hasil Respon Motor DC 37-GB500 dengan Metode LQR

Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR dan Tanpa Metode

Keluaran respon perbandingan antara menggunakan metode LQR dan tanpa menggunakan metode. Keluaran respon memiliki grafik yang berbeda. Gelombang warna oren merupakan *set point* yang diinginkan, warna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQR, dan gelombang warna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQR. Terlihat respon motor dengan metode LQR mempunyai respon yang paling baik jika dibandingkan dengan tanpa metode apapun. Selain memiliki respon yang sesuai dengan *set point*, respon motor juga menjadi lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.



Gambar 8.15

Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 Metode LQR dengan *Noise*

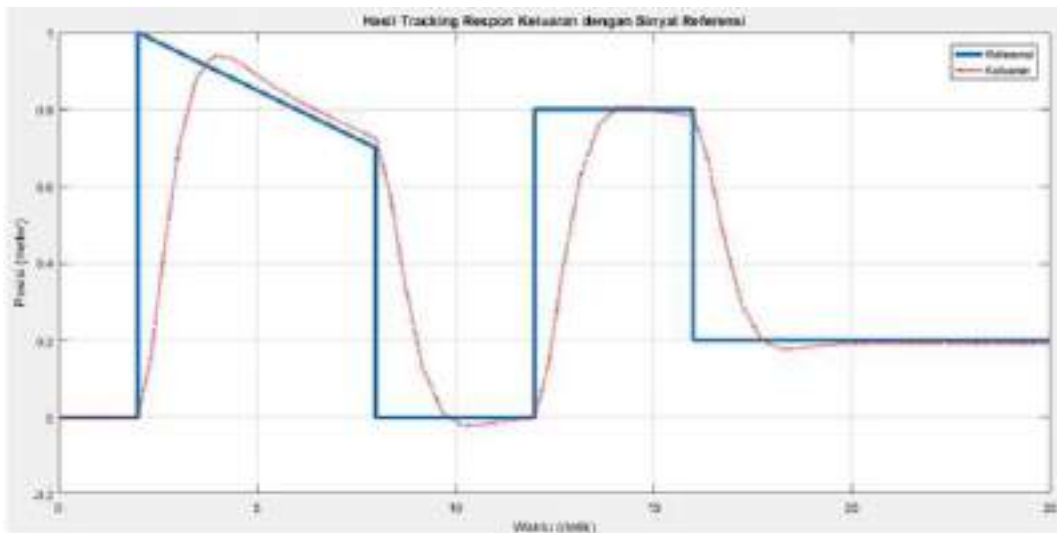
Keluaran respon rangkaian LQR dengan *noise*, terlihat sinyal berwarna kuning mengalami perubahan bentuk sebelum diberikan *noise*. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* dan mengduplikat bentuk dari sinyal *noise* yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linear dan jauh dari kondisi *steady state* pada *set point* yang telah diberikan.



Gambar 8.16

Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT

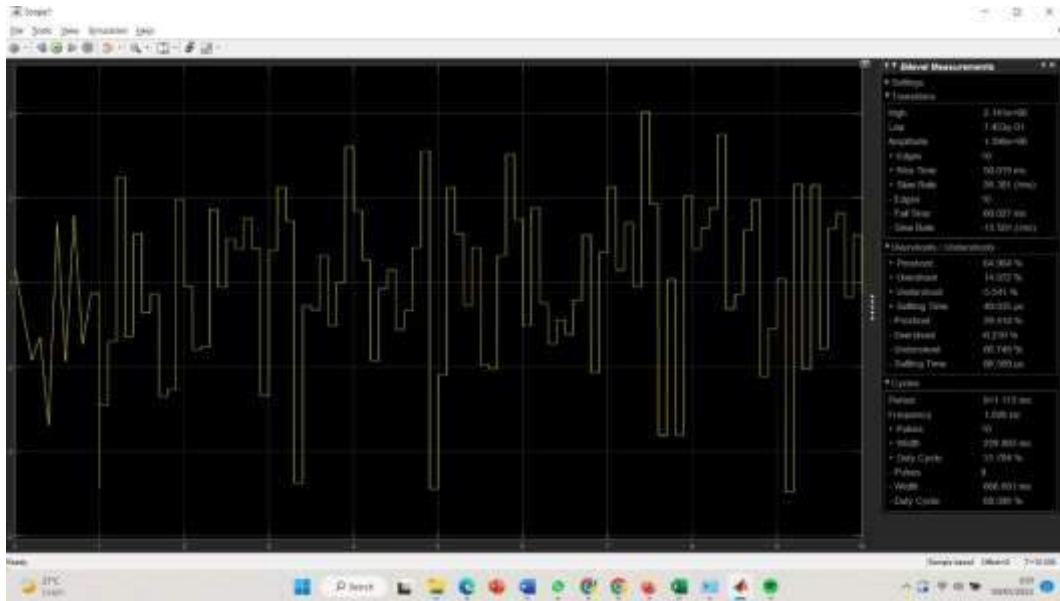
Keluaran respon rangkaian LQT, terlihat grafik respon motor 37-GB500 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun *undershoot*. Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan metode *Linear Quadratic Tracker* (LQT) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.



Gambar 8.17

Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT dan Tanpa Metode

Keluaran respon perbandingan antara menggunakan metode LQT dan tanpa menggunakan metode. Keluaran respon memiliki grafik yang berbeda. Gelombang warna oren merupakan *set point* yang diinginkan, warna biru merupakan respon motor tanpa



Gambar 8.19

A. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada Motor DC RS PRO 834-7641 pada beberapa rangkaian, didapatkan kesimpulan bahwa kedua metode yang digunakan (*Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*) memiliki pengaruh yang signifikan pada respon motor. Bentuk keluaran sinyal dari rangkaian menggunakan metode LQR, LQT, dan orde satu memiliki diferensi yang mencolok. Meski begitu, rangkaian saat ditambahkan *noise* mengalami banyak sekali *ripple*.

Dengan analisis komparasi hasil keluaran sinyal yang dilakukan, penelitian hanya terbatas pada metode yang digunakan berupa *Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT. "Buku Elektronika Industri 2 : Prinsip dan Aplikasi Sistem Pengamanan Pengaturan Otomatis Sistem Distribusi Serta Pembangkit Listrik Mikrohydro.", 2024
- [2] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "O2 Gas Generating Prototype In Public Transportation." JEEMECs (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [3] Achmad, I and Nugraha, AT. "Implementasi buck-boost converter pada hybrid turbin angin Savonius dan panel surya." Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE) 3.2, 2022
- [4] Riyanto, DK, Asri, P and Nugraha, AT. "Monitoring akselerasi getaran dan suhu motor induksi." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.1, 2021, pp. 33-39.
- [5] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "KONTROL LQT UNTUK LEPAS LANDAS DAN Pendaratan Vertikal pada Pesawat Tanpa Awak Coaxial Trirotor." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 56-64.

- [6] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "SISTEM KONTROL KESTABILAN PADA MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 23-30.
- [7] Satrianata, LJ, Widyaningrum, LA, Ferdiansyah, R, Raihan, MH and "EXAMINING OPTIMAL CONTROL THROUGH THE APPLICATION OF (LQR) AND (LQT) APPROACHES IN THE CONTEXT OF DC MOTORS." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 17-22.
- [8] Kurniawan, RF, Mudhoffar, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 23-32.
- [9] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Itislam, TA, Fathurrohman, MF and "SIMULASI SISTEM PENGISIAN BATERAI BERDASARKAN LERENG DAYA DAN TEGANGAN PADA PANEL SURYA MENGGUNAKAN KONVERTER DC-DC BUCK-BOOST UNTUK PENERANGAN JALAN UMUM BERBASIS ENERGI" *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 43-52.
- [10] Paluga, AP, Nugraha, AT, Sobhita, RA and Jamaludin, M. "Renewable Energy System Optimization: Mppt Inverter Integration, Energy Storage Systems, And Its Impact on Sustainability and Efficiency Use Of Energy." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.2, 2024, pp. 12-17.
- [11] Nugraha, AT, Tiwana, MZA and Ravi, AM. "Analisis Optimalisasi Manajemen Daya Chiller Untuk Rencana AC Sentral Industri." *Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi* 1.1, 2021, pp. 35-46.
- [12] Nugraha, AT. "Rancang Bangun Charger Controller Pada Pembangkit Listrik Energi Angin Berbasis Arduino Uno." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "TUNING PID UNTUK KONTROL KECEPATAN MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 88-97.
- [14] Pramesta, A, Wulandari, P, Mudjiono, U and Nugraha, AT. "Implementasi Sensor LDR dan Sensor Raindrop pada Prototipe Automatic Sliding Roof System." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 1-11.
- [15] Dwicahyo, A, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Purwarupa Monitoring Fresh Water Tank pada Kapal Berbasis Mikrokontroler." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 12-19.
- [16] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP, Priyambodo, D, Hari, MD and "Buku Rancang Bangun Battery Charger Pada Pembangkit Listrik Portabel Energi Terbarukan Berbasis Arduino Uno R3.", 2022
- [17] Nugraha, AT, Purwoko, ARJ, Yuniza, SI and Achmad, I. "Analisa Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Cuk Konverter." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 69-83.
- [18] Fuad, E, Nugraha, A and Khoiril, M. "Penerapan Augmented Reality Sebagai Media Informasi Kadar Nutrisi Buah Durian Melalui Objek Kemasan Produk." *Jurnal Dinamika Informatika* 6.2, 2017, pp. 17-30.
- [19] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Fatqurrochman, MI. "ZETA Converter as a Voltage Stabilizer with Fuzzy Logic Controller Method in The Pico Hydro Power Plant." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2022
- [20] Sofyan, M, Syaifudin, S, Pudji, A, Utomo, B and Nugraha, AT. "Comparative Analysis of Water and Oil Media on Temperature Stability in PID Control-Based Digital Thermometer Calibrator." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2023

BAB IX

Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) pada Motor DC M66CE-12

Oleh: **Muhammad Nial Alanus**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: Sistem, Motor, LQT, LQR

The goal of system optimization is to determine the right control signal so that the system output can maintain or follow a given reference and at the same time, minimize or maximize a given performance index. Judging from its purpose, optimal control is divided into 2 cases, namely the regulator case (known as Linear Quadratic Regulator) and the tracking case (known as Linear Quadratic Tracking). In this report the authors discuss the LQR (Linear Quadratic Regulator) and LQT (Linear Quadratic Tracking) methods. contained in the PPNS Automation Engineering course, namely. "System Optimization". In this study the authors used Simulink to simulate the system created using the LQR and LQT methods. To obtain a mathematical model of a first-order DC motor and the variables needed in LQR, a DC motor datasheet is required which is equipped with the value of the moment of inertia, motor constant, damping ratio, resistance, and inductance. With the calculation of 1st order mathematical modeling, it can be compared and concluded from the results of the step response of the two systems that the M66CE-12 DC motor system using LQR has maximum results from the 1st order M66CE-12 motor because by using LQR, the step response of the M66CE-12 DC motor can reach the set point, has a stable graph, has a fast rise time, and has overshoot and undershoot with small values. However, the step response produced by the LQT system has more maximum results than the two systems.

Abstrak

Tujuan dari optimasi sistem adalah menentukan sinyal kendali yang tepat agar keluaran sistem dapat menjaga atau mengikuti referensi yang diberikan dan disaat yang sama, meminimalkan atau memaksimalkan suatu indeks performansi yang diberikan. Dilihat dari tujuannya, kendali optimal terbagi menjadi 2 kasus, yaitu kasus regulator (dikenal sebagai *Linear Quadratic Regulator*) dan kasus *tracking* (dikenal sebagai *Linear Quadratic Tracking*). Pada laporan ini penulis membahas metode LQR dan LQT yang terkandung pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS yaitu. "Optimasi Sistem". Pada penelitian ini penulis menggunakan Simulink untuk mensimulasikan sistem yang dibuat menggunakan metode

LQR dan LQT. Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan *datasheet* motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil *step response* kedua sistem bahwa sistem motor DC M66CE-12 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor M66CE-12 orde 1 karena dengan menggunakan LQR, *step response* dari motor DC M66CE-12 dapat mencapai *set point*, memiliki grafik yang stabil, memiliki *rise time* yang cepat, serta memiliki *overshoot* dan *undershoot* dengan nilai yang kecil. Namun *step response* yang dihasilkan sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari kedua sistem tersebut.

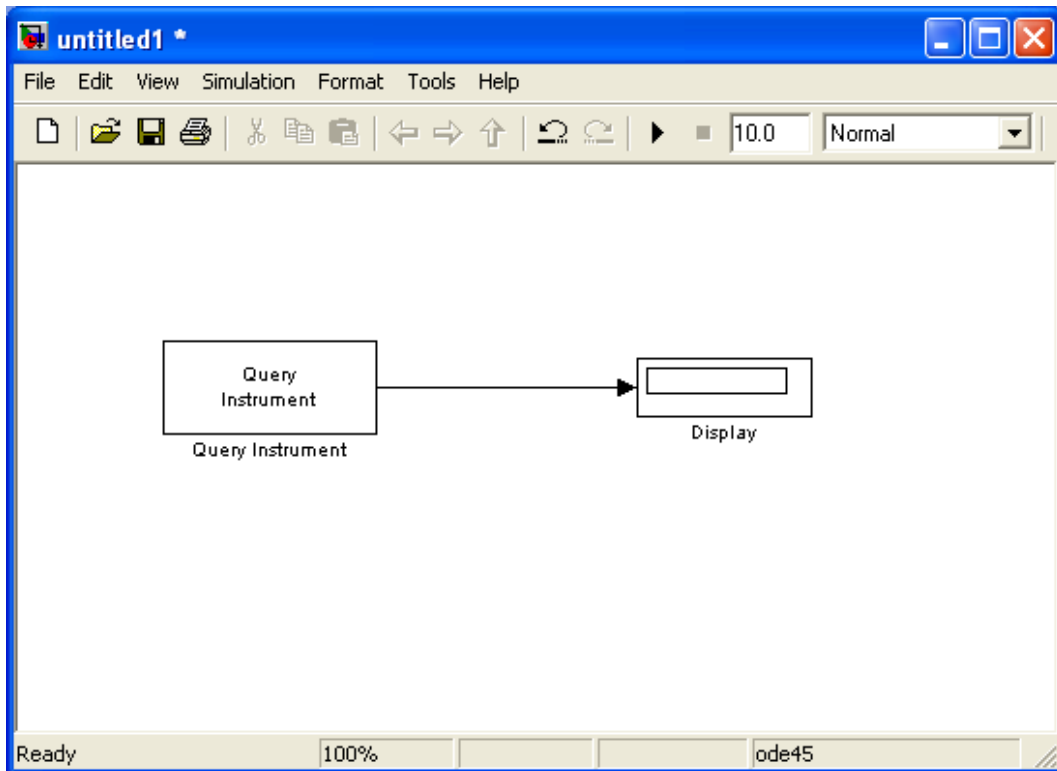
PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi saat sekarang ini begitu cepat mempengaruhi seluruh aspek pada kehidupan ini. Tidak bisa dipungkiri lagi, kebutuhan akan teknologi begitu besar bila dibandingkan beberapa dekade yang lalu. Salah satu akibatnya, adanya persaingan global, terutama dibidang industri. Beberapa pelaku industri membangun atau meng-*upgrade* sistem di Industri untuk menghasilkan produk yang unggul dari para pesaingnya. Persoalan kontrol optimal telah menarik perhatian yang sangat besar pada saat ini, hal itu diakibatkan oleh meningkatnya kebutuhan sistem dengan performansi tinggi. Konsep optimasi sistem kontrol mengkompromikan pemilihan indeks performansi dan rekayasa yang akan menghasilkan sistem kontrol optimal dalam batas-batas kendala fisik Dalam menyelesaikan sistem kontrol optimal, diinginkan mencari suatu aturan untuk mengambil keputusan sistem kontrol yang akan meminimumkan suatu ukuran simpangan dari perilaku idealnya.

Optimasi Sistem merupakan salah satu teori kendali modern. Tujuan dari optimasi sistem adalah menentukan sinyal kendali yang tepat agar keluaran sistem dapat menjaga atau mengikuti referensi yang diberikan dan disaat yang sama, meminimalkan atau memaksimalkan suatu indeks performansi yang diberikan. Dilihat dari tujuannya, kendali optimal terbagi menjadi 2 kasus, yaitu kasus *regulator* (dikenal sebagai *Linear Quadratic Regulator*) dan kasus *tracking* (dikenal sebagai *Linear Quadratic Tracking*). Pada kasus *tracking*, keluaran sistem dijaga agar mengikuti referensi yang diberikan. Pengendali *Linear Quadratic* ini memerlukan sistem yang linier dan indeks performansi yang diinginkan dibuat dalam bentuk kuadrat

Pada laporan ini penulis membahas metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan LQT (*Linear Quadratic Tracking*). yang terkandung pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS

antarmuka pengguna grafis. Simulink terdiri dari beberapa kumpulan kotak perkakas yang dapat digunakan untuk analisis sistem linier dan non-linier.



Gambar 9.2 Tampilan Simulink MATLAB

B. 2.2 Identifikasi Motor DC

Tabel 9.1 Permodelan motor dc

ELECTRICAL SPECIFICATION		
Specification	Units	M66CE-12
Maximum Voltage	VDC	12
Maximum Continous Output Power	Watts	15
Maximum No-load Speed	rpm	2700
Typical speed torque	rpm	1800
Rated Torque	Ncm	8
Peak Torque	Ncm	25
Typical no-load current	mA	120
Rotor Inertia	Kgcm ²	0.214
Mechanical time constant	msec	24.5
Torque constant	Nm/A	0.041
Voltage constant	V/1000 rpm	4.27
Rotor Resistance	Ohms	1.9
Rotor inductance	mH	1.0

Spesifikasi

Nama Motor = Motor DC M66CE-12

$\tau = 8 \text{ ncm} = 0.08 \text{ N/m}$

Rated Current = 2 A // arus

Voltage = 12 V

Speed = 2700 rpm atau 282.74 m/s

Pemodelan Orde 1

Bentuk umum fungsi alih orde 1:

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Permodelan Orde 1 Motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K \cdot i \quad (2)$$

Dimana sehingga

$$K = \tau i = 0,082 = 0,04 \quad (3)$$

(1)

$C(s) = \text{Output sistem.}$

$R(s) = \text{Input sistem.}$

$K = \text{Gain Overall.}$

$\tau s + 1 = \text{Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai } 63,2\% \text{ (detik) pada orde satu.}$ Persamaan orde 1 motor dc :

$$G(s) = 0,040,08 + 1 \quad (4)$$

(2)

Pemodelan Orde 2 Motor DC

Bentuk umum fungsi alih orde 2:

$$G(s) = \omega_n^2 s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (5)$$

$$G(s) = 2\pi f^2 s^2 + 2\zeta(2\pi f)s + 2\pi f^2 \quad (6)$$

(3)

$$G(s) = 2\pi 50^2 s^2 + 2 \cdot 0,214 \cdot (2\pi 50)s + 2\pi 50^2 \quad (7)$$

$$G(s) = 98.596s^2 + 134,392s + 98.596 \quad (8)$$

C. 2.3 Program Script Matlab Sistem LQR pada Motor DC

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

```

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 49.430 ; b= 0.1 ; K= 0.144 ; R= 0.041 ; L = ;

% J = Momeninersia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0]

AA = [ A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J);

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

Q = [1 0 0;

    0 1 0;

    0 0 1000];

R = [1] ;

K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)

KI2 = -K_lqr(3);

KK2 = [K_lqr(1) K_lqr(2)];

```

2.4 Program Script Matlab Sistem LQT pada Motor DC

```

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear;

clc;

% Model Motor DC

J = 0.214 ; b= 0.1 ; K= 0.144 ; R= 0.041 ; L = 0.001 ;

```

% J = Momeninertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=Induktansi

$A = [-b/J \quad K/J; -K/L \quad -R/L];$

$B = [0; 1/L];$

$C = [1 \quad 0]$

Q=10; R=0.0000000001; %0.000000000000001

W=C'*Q; %

[S,o,m,n]=care(A,B,C'*Q*C,R) %m=v(t) %S=P

K=inv(R)*B'*S %feedback Gain

ACL=(A-B*K)'

L=inv(R)*B' %model following gain

2.4 Merancang Sistem pada Simulink

Tabel 9.2 Daftar Komponen yang Dibutuhkan

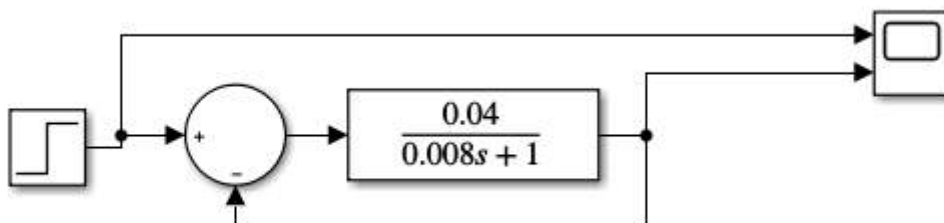
Daftar Komponen Simulink	

Mengatur konfigurasi tiap komponen

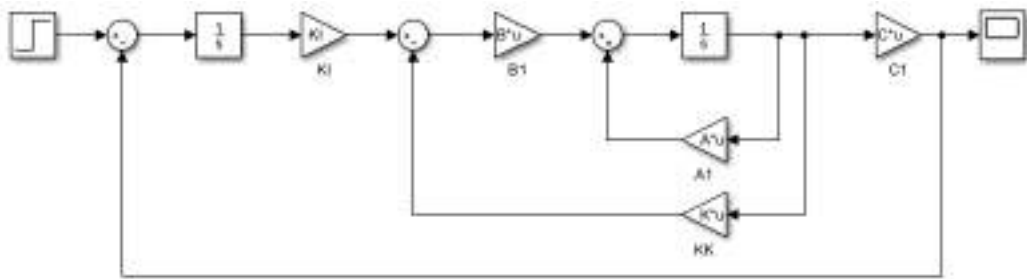
Tabel 9.3 Daftar Komponen yang Dibutuhkan

Konfigurasi Komponen	
STEP	
SUM	
TRANSFER FCN	Orde 1
	Orde 2

D. 2.6 Rangkaian Motor DC M66CE-12



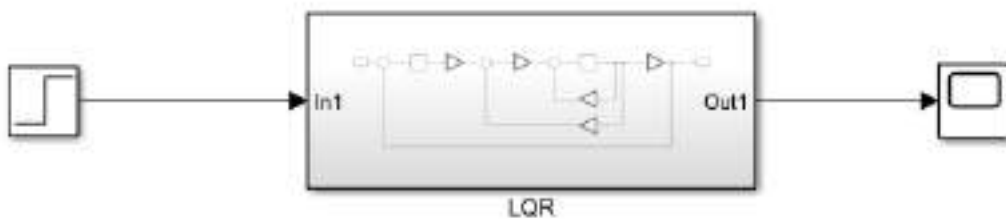
Gambar 9.3



Gambar 9.4

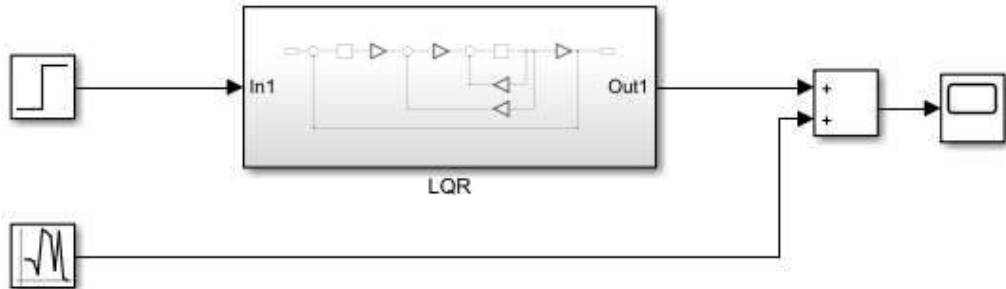
Rangkaian LQR

Rangkaian Subsystem LQR tanpa Noise



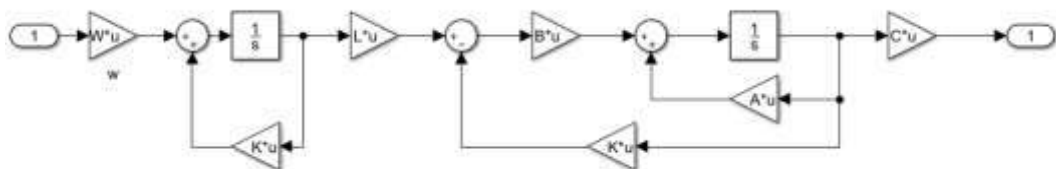
Gambar 9.5

Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



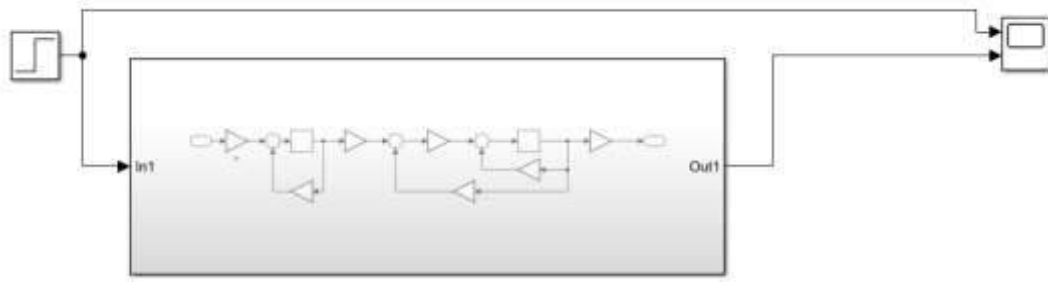
Gambar 9.6

Rangkaian LQT



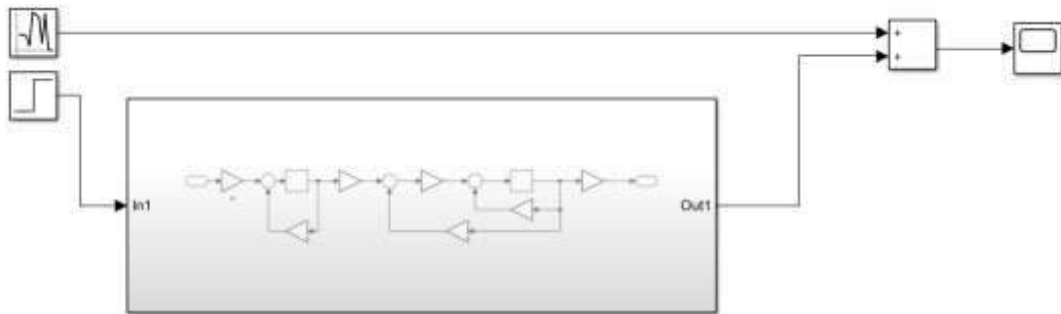
Gambar 9.7

Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 9.8

Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise



Gambar 9.9

HASIL DAN PEMBAHASAN

E. Hasil Run Script Matlab LQR

```

Command Window

C =

    1    0

K_lqr =

    8.9644    0.9658   -31.6228
  
```

Gambar 9.10

Hasil Run Script Matlab LQT

```
Command Window

C =

    1    0

S =

    1.0e-03 *

    0.9694    0.0000
    0.0000    0.0000

o =

    1.0e+04 *

   -1.0315 + 1.0315i
   -1.0315 - 1.0315i

m =

    1.0e+05 *

    3.1621    0.0002
```

Gambar 9.11

```

n =
    5.4136e-15

K =
    1.0e+05 *
    3.1621    0.0002

ACL =
    1.0e+08 *
    -0.0000    -3.1621
    0.0000    -0.0002

L =
    1.0e+13 *
    0    1.0000

```

Gambar 9.12

F. 3.3 Hasil Simulasi Pemodelan Motor M66CE-12 orde 1



Gambar 9.13 Tampilan Step Response LQR

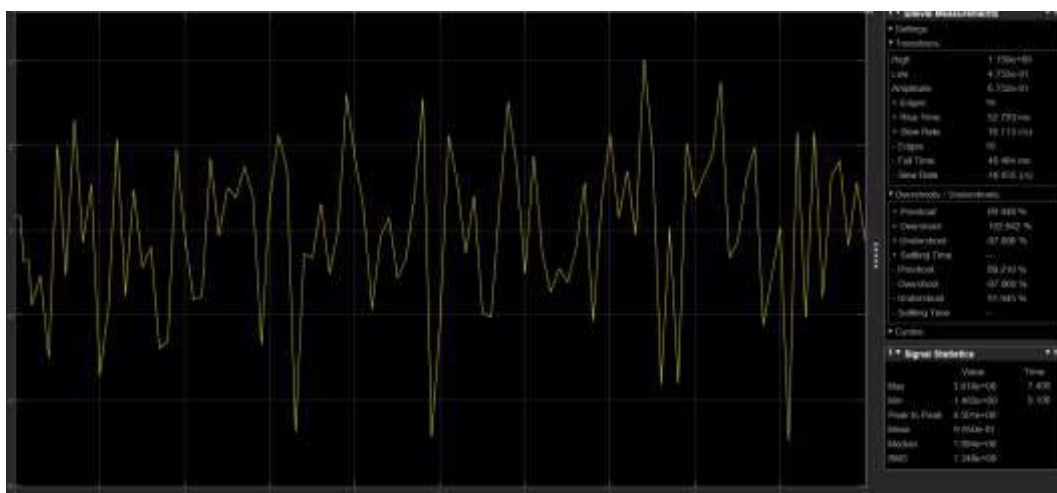
Pada Gambar 3.3 dapat dilihat terdapat grafik yaitu berwarna biru yang belum mencapai *set point*. Amplitudo yang dihasilkan dari simulasi ini **3.808e-02**. *Rise Time* yang dihasilkan **16.762 ms** dan *Overshoot* **0.495%** *Undershoot* **0.847%**.

3.4 Hasil Simulasi Pemodelan Motor M66CE-12 tanpa noise LQR



Gambar 9.14 Hasil Simulink Motor DC M66CE-12 LQR tanpa noise

Pada Gambar 3.4 dapat dilihat terdapat grafik yaitu berwarna kuning. Grafik mencapai *setpoint*. Amplitudo yang dihasilkan dari simulasi ini **9.900e-01**. *Rise Time* yang dihasilkan **1.100 s** dan *Overshoot* **1.518%** *Undershoot* **0.505%**.



Gambar 9.15 Tampilan Step Response Orde 1 dengan noise

3.5 Hasil Simulasi Pemodelan Motor M66CE-12 Orde 1 dengan noise LQR

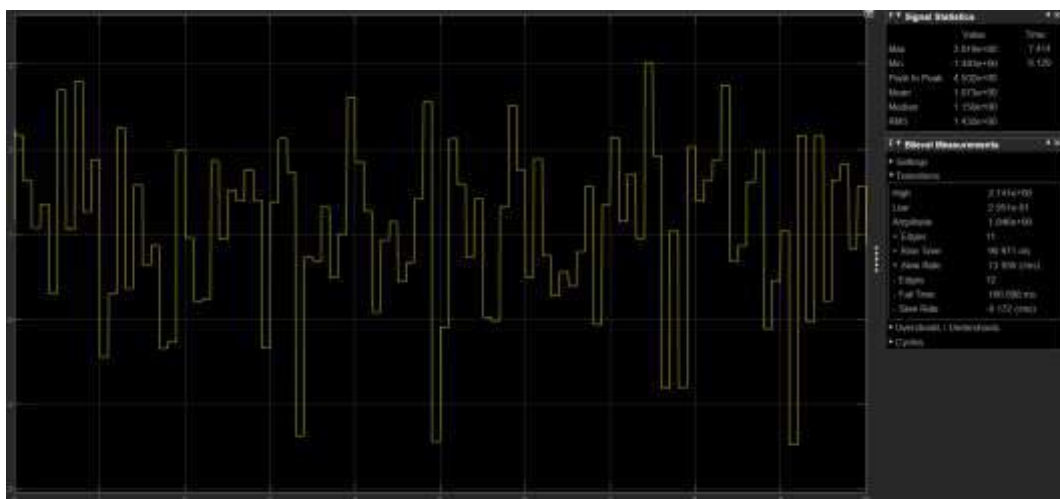
Pada Gambar 3.5 merupakan tampilan *step response* dari motor DC M66CE-12 dengan *noise*. Dapat dilihat bahwa *output step response* dari LQR motor DC M66CE-12 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan *noise* yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar **6.752e-01** sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka **52.720ms** dan memiliki *overshoot* sebesar **102.942%** serta *undershoot* diangka **-87.686%**

3.6 Hasil Simulasi Pemodelan Motor M66CE-12 tanpa Noise LQT



Gambar 9.16 Tampilan Step Response Orde 2 dengan noise

Dari hasil gambar 3.6 grafik mencapai *setpoint*. Sistem mencapai amplitudo sebesar **9.981e-01** sehingga sistem belum mencapai *setpoint*. Memiliki *rise time* yang cukup maksimal di angka **198.255us** dan memiliki *overshoot* sebesar **5.851%** serta *undershoot* di angka **0.634%**



Gambar 9.17 Tampilan Step Response Orde 1

3.7 Hasil Simulasi Pemodelan Motor M66CE-12 dengan Noise LQ

G. Pada Gambar 3.5 merupakan tampilan step response dari motor DC M66CE-12 dengan noise. Dapat dilihat bahwa output step response dari LQR motor DC M66CE-12 hanya memiliki grafik yang fluktuatif diakibatkan noise yang diberikan. Sistem mencapai amplitudo sebesar **1.846e-00** sehingga sistem belum mencapai

setpoint. Memiliki rise time yang cukup maksimal di angka 90.971ms dan memiliki overshoot sebesar 12.405% serta undershoot diangka 102.946%

H. Kesimpulan

Untuk mendapatkan model matematis dari motor DC orde 1 dan variabel-variabel yang dibutuhkan pada LQR diperlukan datasheet motor DC yang dilengkapi dengan nilai momen inersia, konstanta motor, rasio redaman, resistansi, serta induktansi. Dengan perhitungan pemodelan matematis orde 1 maka ditemukan *transfer function* $G(s) = 0,04/(0,08 + 1)$ dan dengan hasil *run script* matlab LQR dan LQT didapat nilai variabel A, B, C, K_lqr, dll yang muncul pada *workspace*. Dapat dibandingkan dan disimpulkan dari hasil step response kedua sistem bahwa sistem motor DC M66CE-12 dengan menggunakan LQR memiliki hasil yang lebih maksimal dari motor M66CE-12 orde 1 karena dengan menggunakan LQR, step response dari motor DC M66CE-12 dapat mencapai set point, memiliki grafik yang stabil, memiliki rise time yang cepat, serta memiliki overshoot dan undershoot dengan nilai yang kecil. Namun step response yang dihasilkan sistem LQT memiliki hasil yang lebih maksimal dari kedua sistem tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] Wibowo, MF and Nugraha, AT. "perencanaan sistem propulsi elektrik pada fast patrol boat 28 meter." Proceedings Conference on Marine Engineering and its Application 6.1, 2023
- [2] Hati, IJP, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Pemodelan dan Simulasi Dinamik Motor DC Brushless BN23HS-28HS-02 dan Motor AC Satu Fasa SIMTACH AC040M-08J30A Berbasis MATLAB/Simulink." Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1, 2025
- [3] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1, 2025, pp. 10-19.
- [4] Nugraha, AT, Sa'diyah, A, Purwanti, EP, Syafiuddin, S, Ashlah, MB and "Application of the Coulomb Counting Method for Maintenance of VRLA Type Batteries in PLTS Systems." E3S Web of Conferences 473, 2024, p. 2003.
- [5] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Water Purification Technology Implementation Design." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [6] Ihsanudin, Y, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Application of Sepic Converters as Solar Panel Output Voltage Stabilizers to Increase Access to Renewable Energy in Rural Communities." Maritime in Community Service and Empowerment 2.1, 2024, pp. 40-45.
- [7] Nugraha, AT. "Desain Kontrol Path Following Quadcopter Dengan Algoritma Line of Sight." Prosiding SENIATI, B9., 2017, pp. 1-8.
- [8] Juniani, AI, Nugraha, AT, Setiawan, E, Amelia, P, Handandi, ZZ and Hidayana, E. "Enhancing water quality prediction using the decision tree approach with the C4. 5 Algorithm." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2025
- [9] Nugraha, AT. "Motor DC Dengan Penyearah Tak Terkontrol Tiga Fasa Gelombang Penuh Berbasis PSIM." KOMPUTEK 7.2, 2023, pp. 59-66.

- [10] Nugraha, AT, Pratama, FA, Widodo, HA, Sobhita, RA and Hidayat, WN. "Design of 3-Phase Load Dividing Automatic System with Naive Bayes Method." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 4.2, 2023
- [11] Utomo, AP, Angga, ATN, Pambudi, DSA and Priyambodo, D. "Battery Charger Design with PI Control Based on Arduino Uno R3." *Applied Technology and Computing Science Journal* 4.2, 2021, pp. 78-90.
- [12] Ashlah, MB, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Image processing with the thresholding method using MATLAB R2014A." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 39-47.
- [13] Safitri, LN. "PROTOTIPE PTO (POWER TAKE-OFF) GENERATOR DENGAN MENGATUR KECEPATAN MOTOR 3 PHASE UNTUK MEMENUHI KEBUTUHAN LISTRIK DI KAPAL." Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 2021
- [14] Handandi, ZZ, Putra, RAPA, Raihan, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 11-16.
- [15] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Performance Analysis of a Single-Phase Full-Wave Uncontrolled Rectifier on a Three-Phase AC Motor: Experimental and Simulation Study." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [16] Ruddianto, R, Nugraha, AT and Pambudi, DSA. "The experiment practical design of marine auxiliary engine monitoring and control system." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2021
- [17] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype hybrid power plant of solar panel and vertical wind turbine as a provider of alternative electrical energy at Kenjeran beach Surabaya." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [18] Nugraha, AT. "Buku Rancang Bangun Teknologi Pemurni Air.", 2022
- [19] NUGRAHA, AT. "DESAIN KONTROL PATH FOLLOWING QUADCOPTER MENGGUNAKAN OUTPUT FEEDBACK DENGAN COMMAND GENERATOR TRACKER MODEL FOLLOWING."
- [20] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L, Utomo, AP, Fatoni, A, Alwi, MH and "Eco Friendly Artificial Coral Reefs Melalui Recovery Limbah Cangkang Kerang Di Pantai Mutiara Desa Wisata." ID Patent EC00,202,300,116, 2023

BAB X

Optimalisasi Sistem Sirkuit LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 834-7641 dengan dan Tanpa Noise

Oleh: **Muhammad Rafi Solakhudin1**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *RS PRO 834-7641, LQR, Overshoot, Rise Time*

DC motors are the most widely used type of motor compared to other electric motors, because this type of motor has several advantages such as simple, sturdy construction, relatively inexpensive price and does not require complicated maintenance. But the main thing, the problem of this discussion is to keep the speed of the motor constant. If on a DC motor there is a change in the given load with a certain nominal load value, then the response will change even though the controller has been given. To overcome this problem, the optimal control technique used is the Linear Quadratic Regulator (LQR). In this study, the authors used a closed loop control system to find out how the response of a DC motor type RS PRO 834-7641 with order 1 and order 2 mathematical modeling when it becomes a plant in a system and then simulated using matlab simulink software to find out and analyze the risetime response. overshoot, undershoot under normal conditions and under conditions where there is noise in the system. In this study, a DC motor is needed that has a phase to phase inductance terminal value and a phase to phase terminal resistance value which will later be used to find a mathematical model of speed and current sensors as a feedback transfer function in systems with multiple outputs. The LQR controller has two parameters, namely the Q and R weight matrices, which must be determined so as to produce the optimal control action as expected. Examples of the implementation of the LQR method include controlling the speed of induction motors, controlling the frequency of power generators, and quadcopter drones. The LQR method is very important to be combined with the discipline of system optimization to reach the optimum point and reduce errors in a tool so that we can adjust the work of a tool according to our wishes.

Abstrak

Motor DC merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan motor listrik lainnya, karena motor jenis ini memiliki beberapa keunggulan seperti konstruksi sederhana, kokoh, relatif murah harga dan tidak memerlukan perawatan yang rumit. Tapi yang utama, masalah dari pembahasan ini adalah menjaga agar kecepatan motor

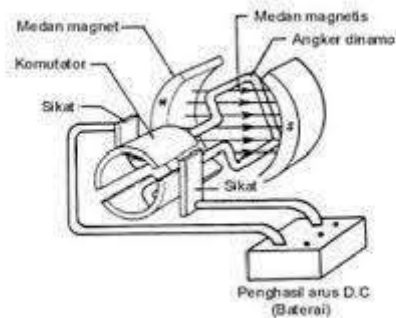
tetap konstan. Jika pada motor DC terjadi perubahan beban yang diberikan dengan nilai tertentu beban nominal, maka respon akan berubah meskipun pengontrol telah diberikan. Untuk mengatasi masalah tersebut, pengendalian optimal teknik yang digunakan yaitu *Linear Quadratic Regulator (LQR)* dan *Linear Quadratic Tracking (LQT)*. Pada penelitian ini, penulis menggunakan sistem kendali loop tertutup untuk mengetahui bagaimana respon motor DC tipe RS PRO 834-7641 dengan pemodelan matematis orde 1 dan orde 2 bila menjadi plant pada suatu sistem dan selanjutnya disimulasikan menggunakan software matlab simulink untuk mengetahui dan menganalisis respon *risetime*, *overshoot*, *undershoot* dengan kondisi normal dan dalam kondisi terdapat *noise* pada sistem. Pada penelitian ini dibutuhkan motor DC yang memiliki nilai terminal *inductance phase to phase* dan terminal *resistance phase to phase* yang nantinya digunakan untuk mencari pemodelan matematis sensor kecepatan dan arus sebagai fungsi alih *feedback* pada sistem dengan *multiple output*. Pengontrol LQR memiliki dua buah parameter yaitu matriks bobot Q dan R, yang harus ditentukan sehingga dapat menghasilkan aksi kontrol yang optimal sesuai harapan. Contoh implementasi dari metode LQR dan LQT seperti pengaturan kecepatan motor induksi, pengendalian frekuensi pada pembangkit listrik generator, hingga *drone quadcopter*. Metode LQR dan LQT ini menjadi sangat penting untuk dipadukan dengan disiplin ilmu optimasi sistem untuk meraih titik optimum dan mengurangi *error* pada suatu alat sehingga kerja suatu alat dapat kita atur sesuai dengan keinginan kita.

PENDAHULUAN

Sistem produksi dalam proses industri merupakan sistem yang kompleks, dan dinamis, sehingga dengan kondisi tersebut proses sering mengalami kondisi yang kurang diharapkan dalam hasil produksinya. Hal ini terjadi akibat kurangnya kemampuan sistem pengendalian untuk menjaga proses agar bekerja sesuai dengan yang diharapkan.[1] Maka dari itu diperlukan suatu teknik optimasi untuk memberikan hasil terbaik yang diinginkan. Menurut, Anthony (2014) mengatakan bahwa “Teknik optimasi merupakan suatu cara yang dilakukan untuk memberikan hasil yang terbaik yang diinginkan.” Sugioko (2013) mengatakan bahwa “Optimasi adalah suatu disiplin ilmu dalam matematika yang fokus untuk mendapatkan nilai minimum atau maksimum secara sistematis dari suatu fungsi, peluang maupun pencarian nilai lainnya dalam berbagai kasus.”[2]

Motor DC adalah alat yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik/gerak [3]. Motor DC membutuhkan tegangan dan arus searah untuk bekerja [4]. Dengan kebutuhan industri yang sangat tinggi terhadap motor DC maka diperlukan penerapan optimasi sistem

kendali yang merupakan suatu proses analisis & perhitungan untuk mendapatkan solusi yang optimum. Sistem kendali merupakan suatu proses pengaturan/pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga berada pada suatu harga atau dalam rangkuman harga. Dalam istilah lain disebut juga teknik pengaturan, sistem pengendalian atau sistem pengontrolan. Ditinjau dari segi peralatan dan Instrument yang digunakan, sistem kendali terdiri dari berbagai susunan komponen fisik yang digunakan untuk mengarahkan aliran energi ke suatu mesin atau proses agar mendapatkan hasil yang diinginkan.

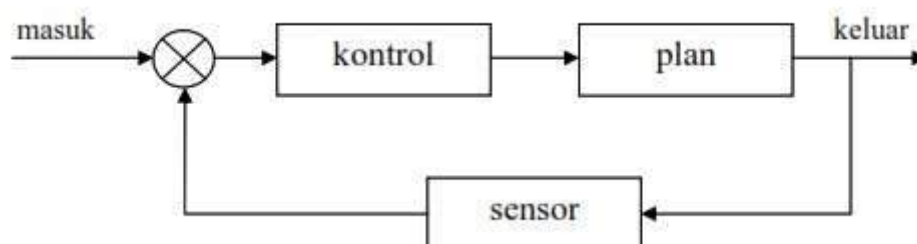


Gambar 10.1 Bagian Motor DC

Sumber: (eprints.polsri.ac.id)

Namun, saat motor diberi arus searah (DC) tidaklah optimal. Hal ini dikarenakan keluaran motor memiliki *noise* yang signifikan. *Noise* merupakan suatu sinyal yang mempengaruhi nilai keluaran suatu sistem (dalam hal ini motor) [5]. Sinyal pada *noise* yang mempengaruhi motor diakibatkan oleh beberapa faktor seperti kondisi medan magnet di lingkungan sekitar, instalasi antara kontroler dan komputer, atau bisa disebabkan oleh komponen (motor) itu sendiri [6]. Dalam penelitian kali ini, *noise* akan direpresentasikan menjadi angka acak.

Sistem kendali *loop* tertutup atau *closed-loop control system* merupakan suatu sistem kendali dimana sinyal keluaran mempunyai pengaruh langsung terhadap aksi kontrol pada suatu sistem. Hal tersebut dikarenakan pada sistem ini terdapat jaringan umpan balik [7]. Model sistem kendali *loop* tertutup atau *close-loop control system* dapat dilihat pada gambar 1.2.



Gambar 10.2 Sistem Kendali Loop Tertutup [8].

Optimasi sistem memiliki berbagai macam rangkaian diantaranya: SISO (*single input single output*), SIMO (*single input multi output*), MISO (*multi input single output*), MIMO (*multi input multi output*), *noise*, LQR, LQT, dll. Pada penelitian ini, penulis menggunakan sistem kendali *loop* tertutup untuk mengetahui bagaimana respon motor DC tipe RS PRO 834-7641 dengan pemodelan matematis orde 1 bila menjadi plant pada suatu sistem. Penulis melakukan simulasi menggunakan metode LQR dan LQT pada motor DC tipe RS PRO 834-7641. LQR (*Linear-Quadratic Regulator*) merupakan salah satu metode kendali state space yang memerlukan informasi dari keseluruhan sistem. Untuk mencapai nilai gain optimal maka perlu melakukan pembobotan untuk nilai Q dan R pada LQR [9]. LQT (*Linear-Quadratic Tracker*) merupakan metode utama untuk kelas masalah *tracking* dalam sistem linier. LQT di desain untuk merancang kontrol optimal sedemikian rupa sehingga sistem kontrol linier dapat melacak lintasan referensi yang ditentukan. Kontrol optimal dapat dicapai dengan meminimalkan fungsi nilai kuadrat yang ditentukan. LQT terdiri dari bagian *feedback* dan *feed-forward* yang dihitung dengan *Algebraic Riccati Equation* (ARE) [10].

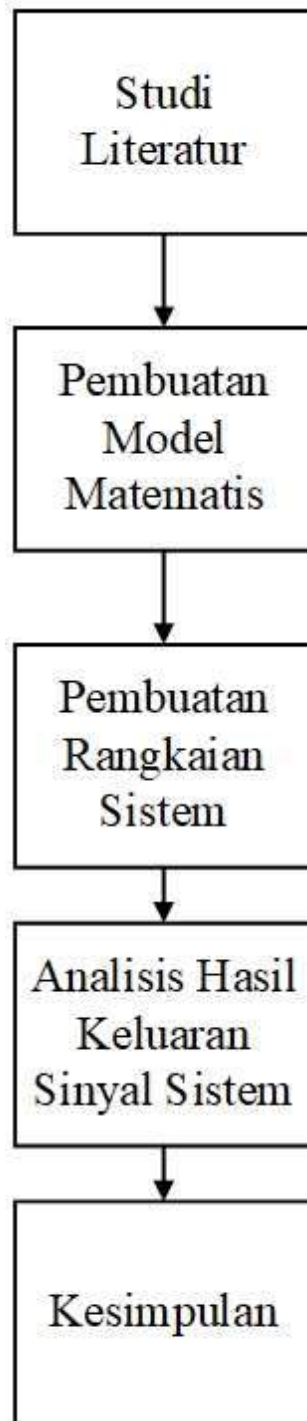
Pada penelitian ini penulis menggunakan *Simulink* untuk mensimulasikan sistem yang dibuat menggunakan metode LQR dan LQT. *Simulink* adalah *graphical Extension Matlab* untuk memodelkan dan mensimulasikan sebuah sistem. Dalam *simulink*, sistem digambarkan sebagai sebuah block diagram, diantaranya *transfer function*, *summing junction*, di dalamnya terdapat pula *virtual input* dan *output device* seperti *function generator* dan *oscilloscope* [11].

Pemodelan matematis merupakan teknik untuk mempresentasikan suatu sistem yang kompleks ke dalam model matematika. Dengan demikian, model matematika yang diformulasi diharapkan mampu menjelaskan situasi kompleks yang sedang diamati [12]. Penulis melakukan perhitungan mengacu pada *datasheet* motor DC RS PRO 834-7641 untuk mendapatkan pemodelan matematis orde 1 yang digunakan sebagai fungsi transfer (*transfer function*) *plant* yang merupakan suatu hubungan matematis antara *input* dan *output* dari komponen sistem kontrol [13].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa *step response* atau perubahan perilaku *output* terhadap perubahan sinyal *input* dari motor DC RS PRO 834-7641 dengan perlakuan tanpa diberi *noise* dan diberi *noise* pada *output* sistem [14].

2. METODOLOGI PENELITIAN

Berdasarkan pendahuluan disusunlah suatu tahapan penelitian:



Gambar 10.3 Flowchart Penelitian

Sumber: Penulis

2.1 Tahapan Penelitian

Studi literatur

Pada tahapan ini dilakukan pencarian referensi terkait dengan optimasi sistem. Referensi digunakan sebagai acuan untuk menyelesaikan masalah. Referensi diambil dari dua sumber yaitu jurnal/ artikel ilmiah, dan *datasheet*.

Pembuatan model matematis

Pada tahapan ini dilakukan perhitungan teoritis untuk mendapatkan model matematis orde 1 dan orde 2 berdasarkan *datasheet* yang didapatkan. Model matematis digunakan sebagai *transfer function* dari rangkaian yang akan disimulasikan.

Pembuatan rangkaian

Pembuatan rangkaian ini dengan menggunakan bantuan software matlab. Beberapa jenis rangkaian yang dibuat meliputi, SISO, SIMO, MISO, MIMO, noise SISO, noise SIMO, noise MISO, dan noise MIMO.

Analisis Hasil dan Pembahasan

Tahap hasil dan pembahasan dilakukan analisis hasil dari rangkaian yang telah dibuat menggunakan matlab dengan membandingkan antara rangkaian noise dan tanpa noise melalui scope.

Kesimpulan

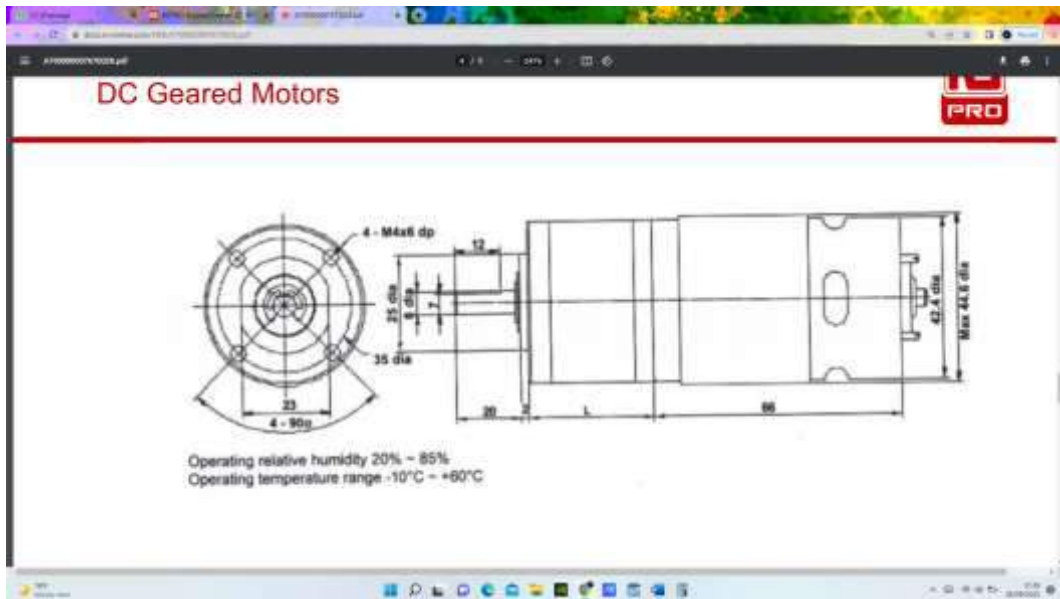
Dalam tahapan ini penulis melakukan penarikan kesimpulan yang diambil dari hasil dan pembahasan. Terdapat beberapa poin penting yang dituliskan penulis dalam kesimpulan yang menjadi patokan atau hasil dari penelitian.

2.2 Pemodelan Matematis Motor DC

2.2.1 Datasheet Motor DC RS PRO 834-7641



Gambar 10.4



Gambar 10.5 Motor DC RS PRO 834-7641

MOTOR DATA										
MODEL	VOLTAGE	NO LOAD	MAX EFFICIENCY		STALL TORQUE					
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	TORQUE	OUTPUT	SPR	%	g	
			R.P.M.	A	N.M	CM/HP				
RS875	8.2 - 12.0	12v CONSTANT	7000	6.6	8700	6.6	700	41.3	65	4200

REDUCTION TABLE R.P.M. (NO LOAD)			
RATIO	8.2v	9.6v	12.0v
4:1	300	1275	1750
49:1	73	110	147
104:1	35	81	87
212:1	19	47.5	37
854:1	8.2	18	14

WEIGHT	
MODEL	g
RS834T	64g
RS848T	82g
RS8104T	82g
RS82121	88g
RS85041	83g

GEARED MOTOR TORQUE RATINGS AT MAX. EFFICIENCY	
RATIO	g.cm
4:1	2240
49:1	10000
104:1	20000
212:1	20000
854:1	20000

NOTE: To establish Torque Rating in Nm, divide g.cm by 10,197.0

Gambar 10.6 Spesifikasi Motor DC RS PRO 834-7641

Nama Motor = Motor DC RS PRO 834-7641

$$\tau = 1,8 \text{ N/m}$$

No load current= 900 mA= 0,9 A

Rated Current= 5500 mA= 5,5 A

Voltage= 12V

Speed= 143 rpm atau 14,97 m/s

Reduction Ratio= 1:49

2.2.2 Perhitungan Orde 1 dan Orde 2

Pemodelan Orde 1

Bentuk umum fungsi alih orde 1 [15]

$$G(s) = K\tau s + 1 \quad (1)$$

Orde 1 motor DC

Berdasarkan datasheet motor DC maka diperoleh persamaan orde 1 :

$$\tau = K.i \quad (2)$$

Dimana sehingga

$$TI = 1,85,5 = 0,32 \quad (3)$$

K =

Persamaan orde 1 motor DC :

$$K\tau s + 1 = 0,321,8 + 1 \quad (4)$$

G(s) =

Kendali Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (5)$$

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal control u yang meminimumkan indeks performansi J .

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (6)$$

LQR menemukan hukum input kontrol optimal u^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimalkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^* = -Kx \quad (7)$$

Di mana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimalkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A , B , Q dan R . Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

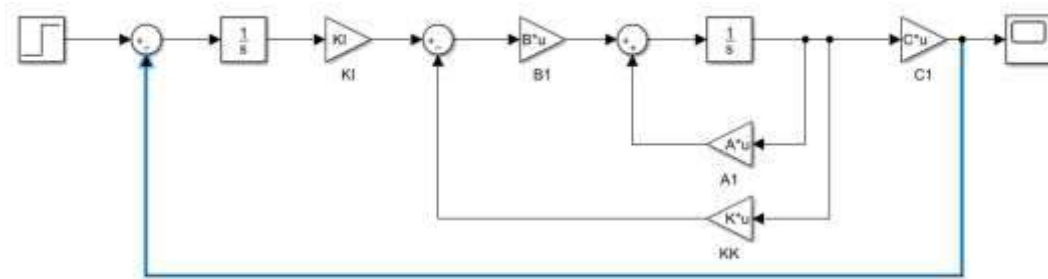
$$ATP+PA-PBR-1BTP+Q=0 \quad (8)$$

$$K=AX-BKx=A-BKx \quad (9)$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi

$$x=AX-BKx=A-BKx \quad (10)$$

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR di tunjukan oleh Gambar



Gambar 10.7 Diagram Blok LQR

Sumber Gambar: Penulis

Program Matlab LQR pada Motor DC RS PRO 834-764

% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC

clear; clc;

% Model Motor DC

J=0.00000242 ; b=0.1 ; K=0.0167 ; R=0.343 ; L =0.00018 ;

% J = Momen inertia , b = Rasio redam, K= konstanta, R= resistansi, L=

% Induktansi

A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];

B = [0; 1/L];

C = [1 0];

AA = [A zeros(2,1); -C 0];

BB = [B;0];

% Pole Placement

J = [-3 -4 -5];

K = acker(AA,BB,J)

KI = -K(3);

KK = [K(1) K(2)];

% Matrix LQR

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix};$$

$$R = [1];$$

$$K_{lqr} = \text{lqr}(AA, BB, Q, R)$$

$$KI2 = -K_{lqr}(3);$$

$$KK2 = [K_{lqr}(1) \ K_{lqr}(2)];$$

Kendali Optimal Linear Quadratic Tracker (LQT)

LQT terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linier bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan-maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam :

$$r(t) = [V_{ref} \ 0]^T \quad (11)$$

$$V_{ref} \quad (12)$$

Dimana, adalah sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimalkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut [16].

$$J = \int_0^T [(x^T - r^T)TQ(x^T - r^T) + dt]TRdt \quad (13)$$

Dimana, Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi *cost*, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika *state-variations* besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol affine yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada [16],

$$\dot{x} = -Kx + K_{ff}v_{ref}(t) \quad (14)$$

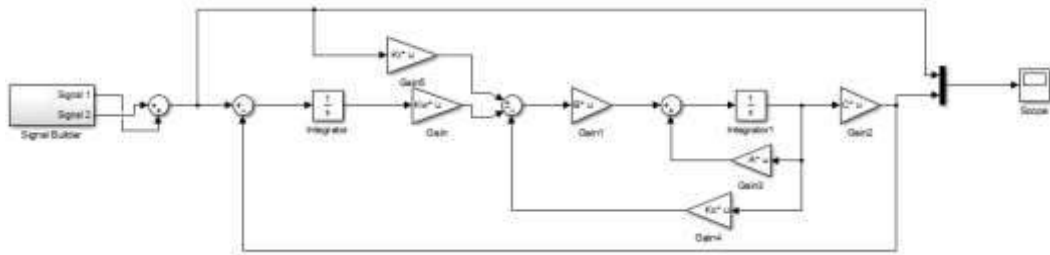
Dimana,

$$K = R^{-1}BTP \quad (15)$$

$$K_{ff} = R^{-1}B(A - BK)^{-1}HTQ \quad (16)$$

Vektor penguatan, K , membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P , ditunjukkan pada (14). Matriks, P , untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$ATP + PA - PBR - 1BTP + HTQH = 0 \quad (17)$$



Gambar 10.8 Diagram Blok LQT

Sumber: Penulis

Program MATLAB LQT pada motor DC RS PRO 834-7641

```

Editor - D:\AKHMAO AZHAR FIRDAUS\pnlteknik_perkapalan_negeri_surabaya\TUGAS\SEMESTER 5\Optimasi Sistem\PI...
des_lqtm.m
1 %Parameter Sistem MSD
2 m=2; %massa
3 k=9; %Spring
4 b=6; %Damp
5 %Matrix pada state
6 A=[0 1; -k/m -b/m];
7 B=[0; 1/m];
8 C=[1 0];
9 %Bobot
10 Q=[1 0; 0 1];
11 R=10;
12 [S,eig,G] = care(A,B,Q) %Ricati 0=A*s+SA-SB(inv R)B*s+Q
13 Kx=inv(R)*B'*S %Bobot Gain Kx
14 Kx=(Kx*(inv(A)*B-eye(1)))*(inv(C*(inv(A)*B)))
15 Ahat=[0 1 0; -k/m -b/m 0; 1 0 0]
16 Bhat=[0; 1/m; 0]
17 %Bobot hat
18 Ghat=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
19 Rhat=6;
20 [Ohat,eighat,Ghat] = care(Ahat,Bhat,Ohat) %Ricati 0=A*s+SA-SB(inv R)B*s+Q
21 Khat=inv(Rhat)*Bhat'*Ohat
22 Kx=Khat(:,3)

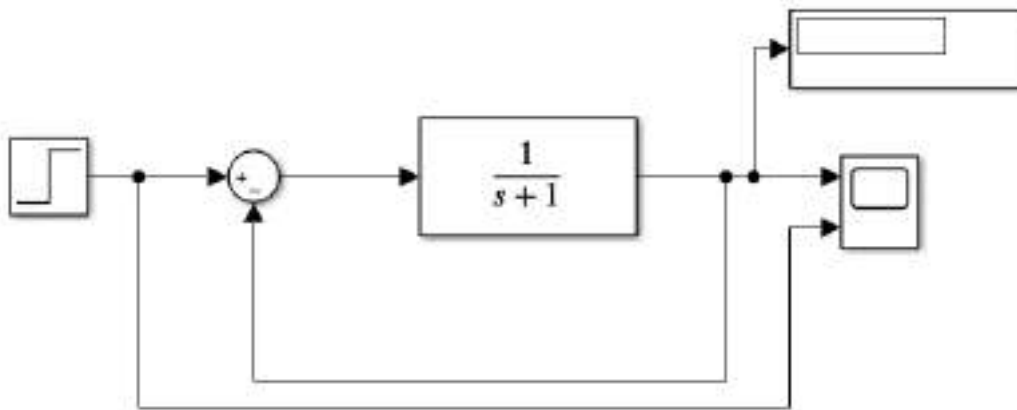
```

Gambar 10.9

Blok Diagram Sistem

2.7.1 Blok Diagram Orde Satu Motor DC RS PRO 834-7641

Pada blok diagram orde satu motor bertujuan untuk mengetahui hasil respon asli dari motor DC jika motor DC RS PRO 834-7641 tanpa ditambahkan metode yang dilakukan pada *software simulink*.



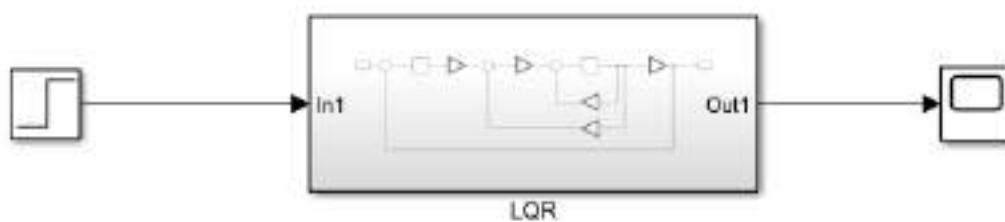
Gambar 10.10 Diagram Blok Orde Satu Motor DC

Sumber gambar: Penulis

Pada gambar 2.6 merupakan diagram blok orde satu suatu motor DC yang terdiri dari sebuah input dan sebuah *output*. *Input* yang digunakan berjenis *step response*. *Transfer function* pada diagram tersebut dapat berisikan permodelan motor DC orde pertama. Hasil respon akan ditampilkan pada *scope* dan *display* untuk mengetahui berapa nilai maksimal respon yang dihasilkan.

A. 2.7.2 Blok Diagram LQR Motor DC RS PRO 834-7641

Pada blok diagram LQR Motor DC RS PRO 834-7641 bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada *software simulink*.

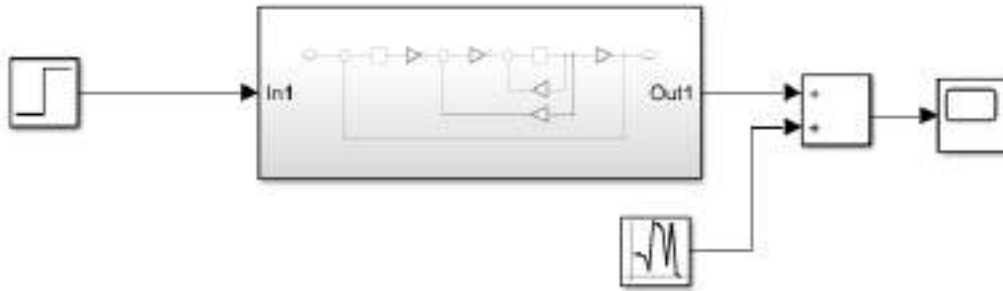


Gambar 10.11 Diagram Blok LQR Motor DC RS PRO 834-7641

Sumber gambar: Penulis

B. 2.7.3 Blok Diagram LQR Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Noise

Pada blok diagram LQR Motor DC RS PRO 834-7641 dengan *noise* bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada *software simulink*.

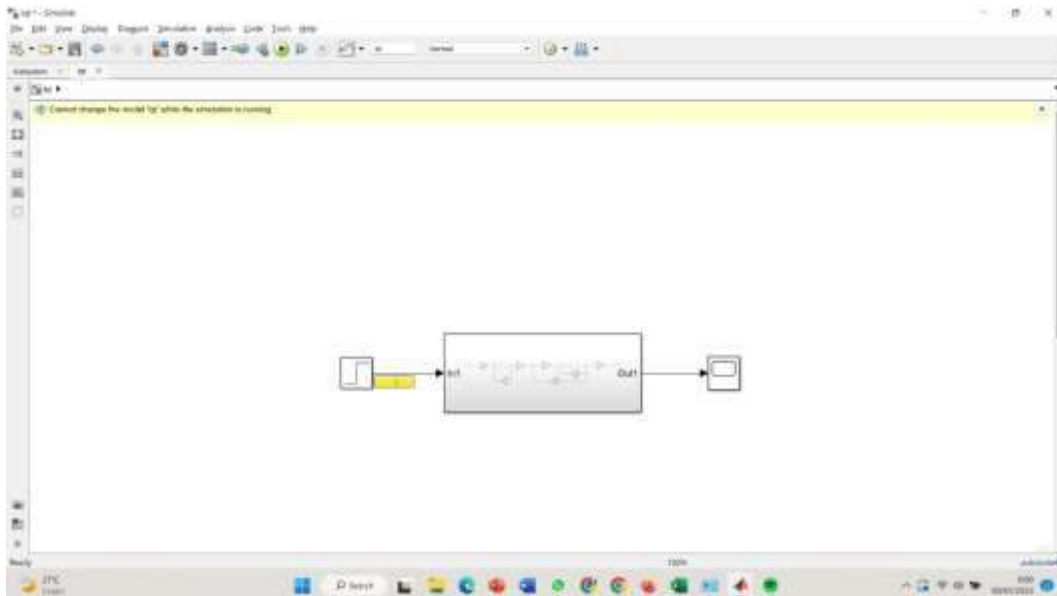


Gambar 10.12 Diagram Blok LQR Motor DC RS PRO 834-7641 dengan noise

Sumber gambar: Penulis

C. 2.7.4 Blok Diagram LQT Motor DC RS PRO 834-7641

Pada blok diagram LQT Motor DC RS PRO 834-7641 bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQT yang dilakukan pada *software simulink*.

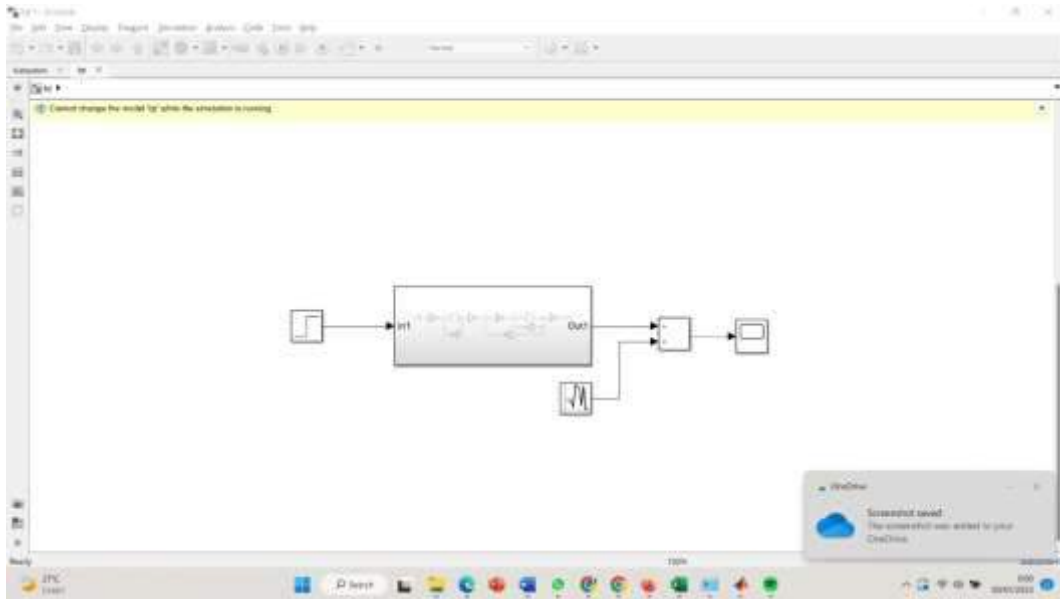


Gambar 10.13 Diagram Blok LQT Motor DC RS PRO 834-7641

Sumber: Penulis

D. 2.7.5 Blok Diagram LQT Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Noise

Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 834-7641 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQT dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 10.14 Rangkaian LQT Motor RS PRO 834-7641 dengan Noise

Sumber: Penulis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Respon Orde Satu Motor DC RS PRO 834-7641



Gambar 10.15 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 pada Permodelan Matematis Orde Satu

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodelan orde satu yang terlihat pada gambar 3.1, terlihat grafik respon motor pada orde satu memiliki keluaran yang sangat jauh dari set poin yang diinginkan. Gelombang berwarna oranye merupakan hasil respon motor sedangkan yang berwarna biru merupakan set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5

sedangkan respon motor hanya berada pada nilai 0.07. Motor DC RS PRO 834-7641 yang diamati memiliki karakteristik linier yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak terdapat riak. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke ± 2 , setelah motor dihidupkan. Respon tersebut terbilang cukup lambat.

3.2. Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 Menggunakan Metode LQR



Gambar 10.16 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon permodalan gambar 3.2, terlihat grafik respon motor DC RS PRO 834-7641 Watt dengan menggunakan LQR memiliki keluaran yang sama dengan nilai set poin yang diinginkan. Set poin yang diinginkan yaitu 0,5, respon motor berhasil mencapai nilai set poin pada detik ke $\pm 1,2$ tanpa adanya nilai *overshoot* dan *undershoot*. Respon motor DC RS PRO 834-7641 menggunakan metode LQR menjadi lebih baik dibanding tanpa menggunakan metode LQR.

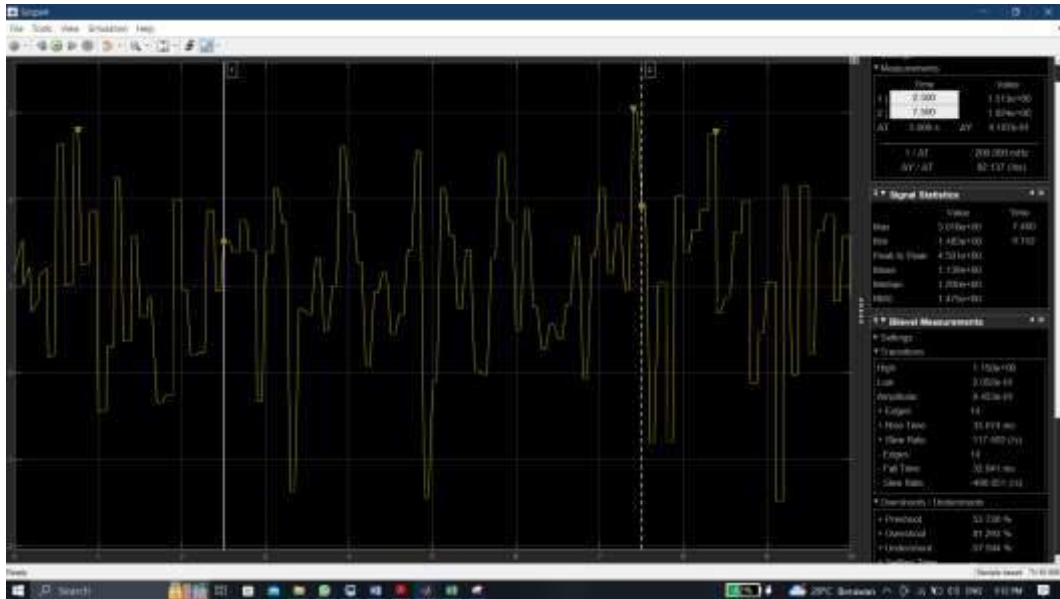
3.3. Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 Menggunakan Metode LQR dan Tanpa Metode



Gambar 10.17 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR dan Tidak

Sumber gambar: Penulis

Pada *output* respon perbandingan permodalan gambar 3.3, terlihat grafik respon motor DC RS PRO 834-7641 dengan menggunakan LQR dan tidak menggunakan metode memiliki keluaran respon yang berbeda. Gelombang berwarna oren merupakan set poin yang diinginkan, berwarna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQR, dan gelombang berwarna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQR. Pada gambar 3.3 tersebut terlihat dengan jelas respon motor DC RS PRO 834-7641 dengan metode LQR memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa metode LQR. Disamping respon yang memiliki nilai sesuai dengan set poin yang diinginkan tanpa adanya *overshoot* dan *undershoot*, respon motor juga menjadi semakin lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.



Gambar 10.18 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQR Saat Diberikan Noise

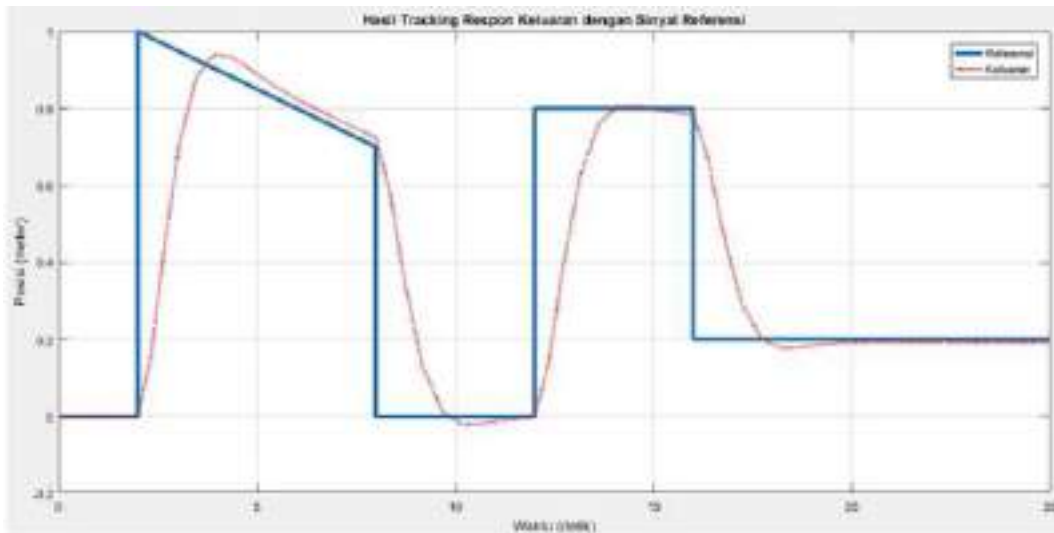
3.4. Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 Menggunakan Metode LQR dengan Noise

Sumber gambar: Penulis

Dari hasil gambar 3.4 terlihat sinyal kuning yang merupakan hasil respon motor DC RS PRO 834-7641 dengan metode LQR mengalami perubahan bentuk dari sebelum diberikan noise. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali ripple serta meniru bentuk dari sinyal noise yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linier dan jauh dari kondisi stabil atau steady state pada set poin yang telah diberikan.

3.5. Hasil Respon Motor DC Maxon RS PRO 834-7641 Menggunakan Metode LQT

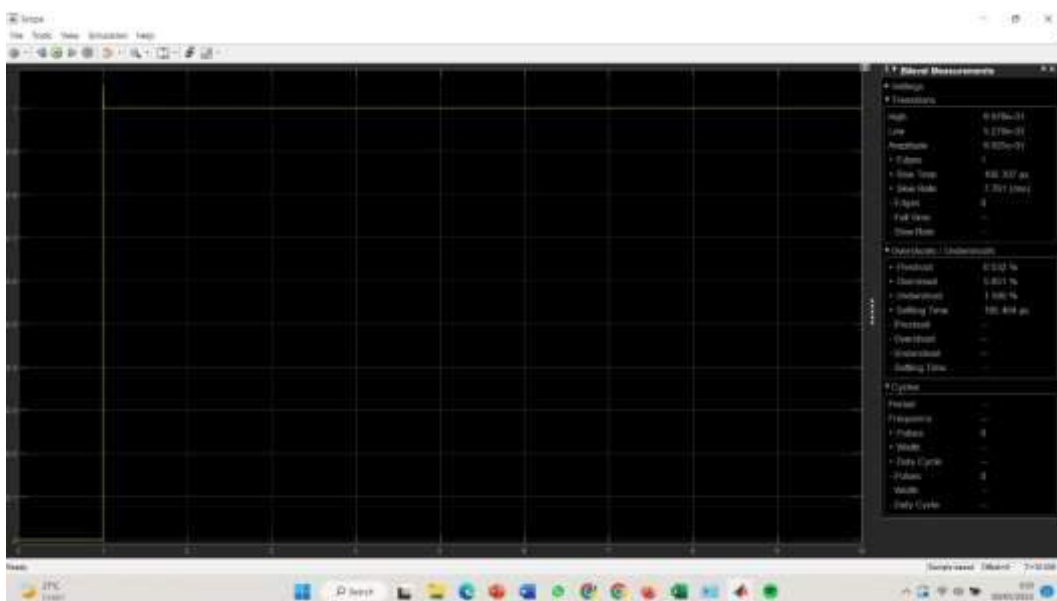
Keluaran respon rangkaian LQT (Gambar 3.5), terlihat grafik respon motor RS PRO 834-7641 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun *undershoot*. Respon motor DC RS PRO 834-7641 dengan metode *Linear Quadratic Tracker* (LQT) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.



Gambar 10.19 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT

3.6. Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 Menggunakan Metode LQT dan Tanpa Metode

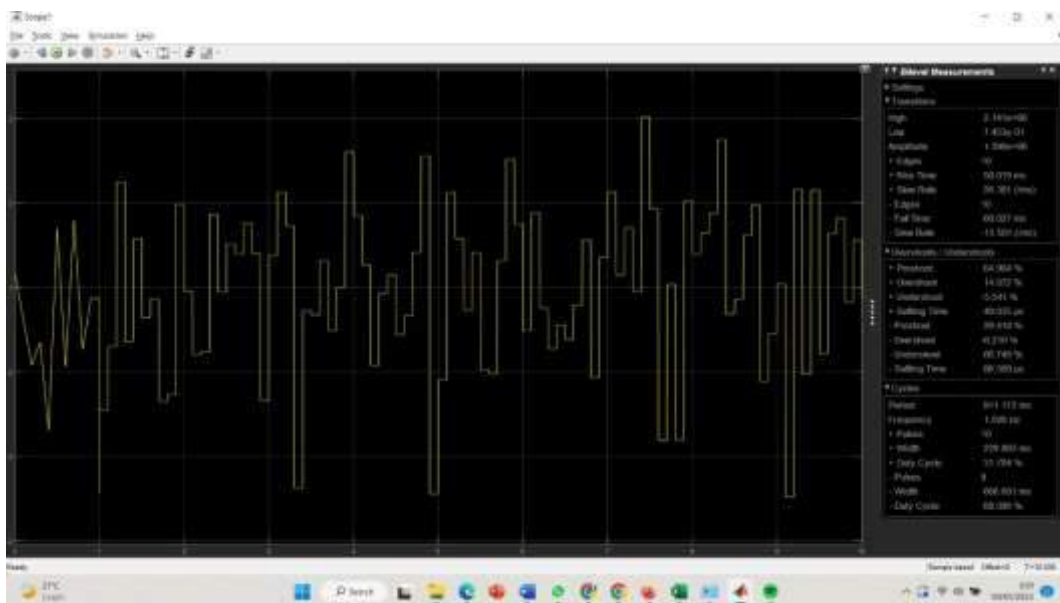
Keluaran respon perbandingan (Gambar 3.6) antara menggunakan metode LQT dan tanpa menggunakan metode. Keluaran respon memiliki grafik yang berbeda. Gelombang warna oren merupakan *set point* yang diinginkan, warna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQT, dan gelombang warna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQT. Pada gambar 3.6 terlihat respon motor dengan metode LQT mempunyai respon yang paling baik jika dibandingkan dengan tanpa metode apapun. Selain memiliki respon yang sesuai dengan *set point*, respon motor juga menjadi lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.



Gambar 10.20 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT dan Tidak Menggunakan Metode

3.7. Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 Menggunakan Metode LQT dengan Noise

Keluaran respon rangkaian LQT dengan *noise* (Gambar 3.7), terlihat sinyal berwarna kuning mengalami perubahan bentuk sebelum diberikan *noise*. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* dan mengduplikat bentuk dari sinyal *noise* yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linear dan jauh dari kondisi *steady state* pada *set point* yang telah diberikan.



Gambar 10.21 Hasil Respon Motor DC RS PRO 834-7641 dengan Metode LQT saat Diberikan Noise

E. Kesimpulan

Dari hasil percobaan terhadap motor DC PRO 834-7641 didapatkan hasil bahwa penggunaan metode LQR membuat hasil respon motor DC menjadi lebih baik. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil respon motor DC PRO 834-7641 dapat mencapai set poin yang diinginkan dengan waktu untuk mencapai nilai set poin yang cepat. Berbeda dengan tanpa menggunakan metode LQR, respon motor jauh dari nilai set poin yang diinginkan dan untuk mencapai nilai *steady state* membutuhkan waktu yang cukup lama. Keadaan tersebut membuktikan kebenaran teori bahwa metode optimasi LQR dapat mengoptimalkan hasil respon dari suatu motor DC menjadi lebih baik dari sebelumnya. Namun saat sistem diberikan noise metode LQR tidak dapat mempertahankan hasil responnya. Hasil respon motor DC PRO 834-7641 menggunakan LQR saat diberikan noise menghasilkan respon

yang mengikuti sinyal noise yang diberikan pada sistem sehingga respon yang dihasilkan tidak lagi linier. Pengujian kontroler yang diterapkan pada sistem dilakukan pada kondisi yang berbeda, dengan asumsi gangguan/guncangan pada sistem suspensi berubah-ubah. Pada Hasil simulasi garis biru menyatakan nilai referensi yang ditentukan, sedangkan garis warna merah menunjukkan respon sistem dengan kontroler LQT. Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa sistem dengan kontroler LQIT mampu tracking posisi sesuai dengan referensi yang ditentukan. Pada respon transien sistem diketahui bahwa nilai error steady state adalah 3%, nilai ini menunjukkan kondisi yang baik dengan rata-rata error steady state 3% mengindikasikan bahwa saat terjadi guncangan pada kendaraan yang menyebabkan perubahan posisi pada sistem suspensi, kontroler yang diterapkan mampu membawa sistem suspensi untuk tracking posisi secara tepat sehingga gangguan/guncangan yang terjadi mampu diredam dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Marjuki, R, Agna, DIY and Ivannuri, F. "Sistem kontrol tegangan pada generator induksi 3 fasa dengan PLC voltage." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 21-33.
- [2] Satrianata, LJ, Widyaningrum, LA, Ferdiansyah, R, Raihan, MH and "EXAMINING OPTIMAL CONTROL THROUGH THE APPLICATION OF (LQR) AND (LQT) APPROACHES IN THE CONTEXT OF DC MOTORS." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 17-22.
- [3] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Planning Of A 70 kW Solar Power Plant In Magersari Village." *JEEMECs (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...)*, 2024
- [4] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "TUNING PID UNTUK KONTROL KECEPATAN MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 88-97.
- [5] Shiddiq, MJ, Ramadhan, MF and Nugraha, AT. "Perencanaan Pembangkit Listrik Energi Bayu Kincir Savonius Guna Mewujudkan Pemanfaatan Renewable Energy Pada Jembatan Suramadu." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [6] Rahman, FWN, Setiawan, E, Juniani, AI and Nugraha, AT. "Application of ant colony optimization algorithm in determining PID parameters in AC motor control." *Brilliance: Research of Artificial Intelligence* 4.2, 2024, pp. 538-549.
- [7] Paluga, AP, Nugraha, AT, Sobhita, RA and Jamaludin, M. "Renewable Energy System Optimization: Mppt Inverter Integration, Energy Storage Systems, And Its Impact on Sustainability and Efficiency Use Of Energy." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.2, 2024, pp. 12-17.
- [8] Framuja, MA, Ainudin, FH and Nugraha, AT. "Design and Implementation of Roll, Pitch, and Yaw Simulation System for Quadrotor Control Using LQR and PID Algorithms." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2, 2024, pp. 1-12.
- [9] Kurniawan, RF, Mudhoffar, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 23-32.
- [10] Nugraha, AT, Sari, DP, Anindita, G, Setiawan, E, diyah, AS, Asri, P and "Buku Harmoni Laut: Pelestarian Penyus Mutiara dan Kolaborasi.", 2024

- [11] Tiwana, MZA, Adianto, A and Nugraha, AT. "Perancangan Sistem Monitoring Dan Alarm Berbasis Logic Panel Dan Komunikasi Modbus." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [12] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Design of hybrid portable underwater turbine hydro and solar energy power plants: Innovation to use underwater and solar current as alternative electricity in Dusun Dongol Sidoarjo." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and "IDENTIFIKASI SISTEM MOTOR DC DAN KENDALI LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) BERBASIS ARDUINO-SIMULINK MATLAB." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 98-102.
- [14] Apriani, M, Cahyono, L, Utomo, AP, Nugraha, AT and Alfira, DCN. "Preliminary investigation of bioplastics from durian seed starch recovery using PEG 400 for reducing marine debris." Journal of Ecological Engineering 23.2, 2022
- [15] Rahim, R, Kurniasih, N, Hasibuan, A, Andriany, L, Najmurokhman, A and "Congklak, a traditional game solution approach with breadth first search." MATEC web of Conferences 197, 2018, p. 3007.
- [16] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [17] Nugraha, AT, Ruddianto, Ahmad, MM, Pambudi, DSA, Utomo, AP and "Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine." ID Patent EC00,202,204,473, 2022
- [18] Nugraha, AT, Santosa, AF and Sobhita, RA. "A Comparative Study on DC Motor Speed Regulation Using Full-Wave Uncontrolled Rectifiers." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1, 2025, pp. 43-52.
- [19] Nugraha, AT, Rochmawati, NW and Sheila, SY. "Buku Topologi Bidirectional Buck-Boost Converter Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.", 2024
- [20] Fauzi, AR, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Santosa, AF. "Performance of Permanent Magnet Synchronous Generator (pmsg) 3 Phase Radial Flux Results Modification of Induction Motor." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical &Industrial Technology 1.2, 2024, pp. 5-11.

BAB XI

Optimalisasi Sistem Sirkuit Keluaran dengan Pendekatan LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 454-0883

Oleh: **Muhammad Rahmadani**

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Kata Kunci: *LQR, LQT, Motor DC, Noise*

DC motors are one of the components that are very often found in everyday life, DC motors require voltage and direct current to work. The electric motor itself becomes an electromagnetic device that can convert electrical energy into mechanical energy. This paper discusses two methods, namely LQR and LQT and added noise, research was conducted to determine the magnitude of the effect of noise on the system. This study used a DC motor RS PRO 454-0883 to see the effect of noise on a motor system. The most common forms of plant modeling are SISO, SIMO, MISO, and MIMO. In modeling, it requires a mathematical form of the plant so that the response form of the plant can be described in graphical form with the help of software. To conduct research using the help of MATLAB, the first is to do a mathematical modeling of the motor to get the Transfer Function values of order 1 and order 2. Second, a simulation is carried out on each circuit to be analyzed. And finally, a comparison of the results of the circuit signal output is carried out. The results show that noise has a significant effect on the RS PRO 454-0883 DC motor, so there is a need for an optimization method to reduce noise in the motor. However, the 2nd order motor has a better output than the 1st order as seen from the condition after the raise time.

Abstrak

Motor DC menjadi salah satu komponen yang sangat sering dijumpai di kehidupan sehari-hari, Motor DC membutuhkan tegangan dan arus searah untuk bekerja Motor listrik sendiri menjadi perangkat elektromagnetik yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam paper ini membahas dua metode yaitu LQR Serta LQT serta ditambahkan noise, dilakukan penelitian untuk menentukan besaran pengaruh *noise* pada sistem. Penelitian ini menggunakan motor DC RS PRO 454-0883 untuk melihat pengaruh *noise* pada suatu sistem motor Bentuk permodelan suatu plant yang banyak ditemui yaitu berupa SISO, SIMO, MISO, dan MIMO. Dalam permodelan membutuhkan bentuk matematis dari *plant* agar bentuk respon dari *plant* dapat digambarkan melalui bentuk grafik dengan bantuan *software*. Untuk melakukan penelitian menggunakan bantuan MATLAB,

pertama dilakukan pemodelan matematis pada motor untuk mendapatkan nilai *Transfer Function* orde 1 dan orde 2. Kedua dilakukan simulasi pada setiap rangkaian yang akan dianalisis. Dan terakhir dilakukan komparasi hasil keluaran sinyal rangkaian. Didapatkan hasil bahwa *noise* memiliki pengaruh yang signifikan pada motor DC 37GB500 sehingga perlu adanya metode pengoptimalan untuk mengurangi *noise* pada motor. Namun, motor orde 2 memiliki keluaran yang lebih baik daripada orde 1 terlihat dari kondisi setelah *raise time*.

PENDAHULUAN

Pada paper kali ini penulis membahas suatu metode system yang akan digunakan untuk mengoptimalkan keluaran dari motor LQR (Linear Quadratic Regulator) serta LQT (Linear Quadratic Tracking) yang menjadi salah satu topic pada mata kuliah Teknik Otomasi PPNS yaitu. "Optimasi Sistem". Sebelumnya Motor DC menjadi salah satu komponen yang sangat sering ditemui di kehidupan sehari-hari, Motor DC membutuhkan tegangan dan arus searah untuk bekerja Motor listrik sendiri menjadi perangkat elektromagnetik yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik,

Untuk LQR (Linear Quadratic Regulator) sendiri merupakan metode kontrol optimal yang sudah sering digunakan dalam berbagai bidang, contohnya dalam industri, robotik, maupun bidang keteknikan lain. Metode yang digunakan yaitu LQR (*Linear Quadratic Regulator*) berfungsi mengoptimalkan respon motor untuk lebih mendekati *set point* (mengurangi *undershoot* dan *overshoot*). LQR sendiri mempunyai sifat ketahanan, keandalan, dan penguatan statis. Dengan menggunakan metode *Linear Quadratic Regulator* dalam sebuah sistem yang besar dengan banyak input, kontrol efisien beberapa keluaran dicapai secara ekonomis. Metode ini dibuat untuk merancang pengontrol optimal yang meminimalisir fungsi biaya yang diberikan ,

Metode yang selanjutnya *Linear Quadratic Tracker (LQT)*. LQT adalah sebuah sistem pengaturan linear dimana keluaran sistem mengikuti referensi (*trajectory*) yang diinginkan (Nugroho, 2019) Mekanis kerja pada *Linear Quadratic Tracker* adalah mengatur suatu pelacakan berbasis model yang menggunakan *affine state-feedback* untuk memberikan upaya pengendalian yang optimal (Sari et al., 2019). LQT terdiri dari *feedback* keadaan biasa dari sistem dinamis linear Bersama dengan kontrol umpan maju tambahan (Styawati et al., 2021). Metode *Linear Quadratic Tracker* umumnya digunakan untuk masalah optimasi pada sistem yang berkaitan dengan pelacakan (*tracking*) (Sukarman & Abdulah, 2020).

Dengan dua metode optimasi tersebut, pada Mata Kuliah Optimasi Sistem Teknik Otomasi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dilakukan percobaan bagaimana pengaruh metode LQR dan LQT terhadap respon output yang dihasilkan oleh suatu motor DC. Percobaan juga dilakukan dengan menambahkan noise pada sistem untuk dilakukan pengamatan apakah penambahan metode LQR dan LQT respon motor tidak akan terpengaruh oleh noise yang diberikan atau respon motor tetap terpengaruh oleh noise yang diberikan. Serta bagaimana perbedaan antara metode optimasi LQR dengan LQT pada suatu jenis motor DC yang sama.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Berdasarkan pendahuluan didapatkan tahapan penelitian sebagai berikut:

Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahapan awal dalam penelitian ini. Pada tahapan ini dilakukan pencarian referensi terkait dengan metode optimasi sistem *Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*. Referensi digunakan sebagai acuan untuk menyelesaikan masalah. Referensi diambil dari dua sumber yaitu jurnal/ artikel ilmiah, dan *datasheet*.

Pembuatan Model Matematis

Pembuatan model matematis dilakukan tahapan perhitungan teoritis untuk mendapatkan model matematis orde 1 dan orde 2 berdasarkan *datasheet* yang didapatkan. Model matematis digunakan sebagai *transfer function* dari rangkaian yang akan disimulasikan.

Pembuatan Rangkaian Sistem

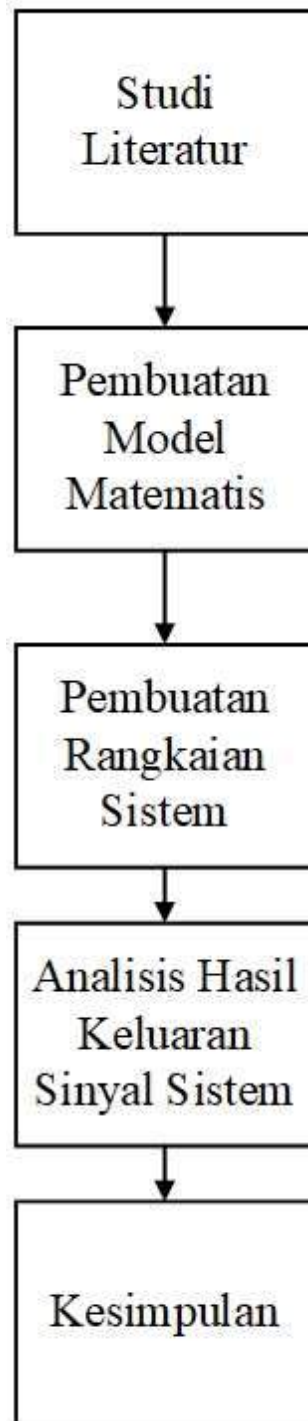
Pada tahapan ini dilakukan pembuatan setiap rangkaian sistem yang akan disimulasikan. Tahapan ini dilakukan pada *software* MATLAB. Terdapat 4 rangkaian yang dibuat yaitu, rangkaian LQT, rangkaian LQT dengan *noise*, rangkaian LQR, rangkaian LQR dengan *noise*.

Analisa Respon Keluaran Sistem

Pada tahapan ini dilakukan analisa dari respon keluaran sinyal simulasi rangkaian sistem. Analisis pada penelitian ini ditekankan pada komparasi atau perbandingan dua metode optimasi sistem.

Kesimpulan

Tahapan terakhir dari penelitian ini adalah penarikan kesimpulan berdasarkan Analisa yang telah dilakukan.

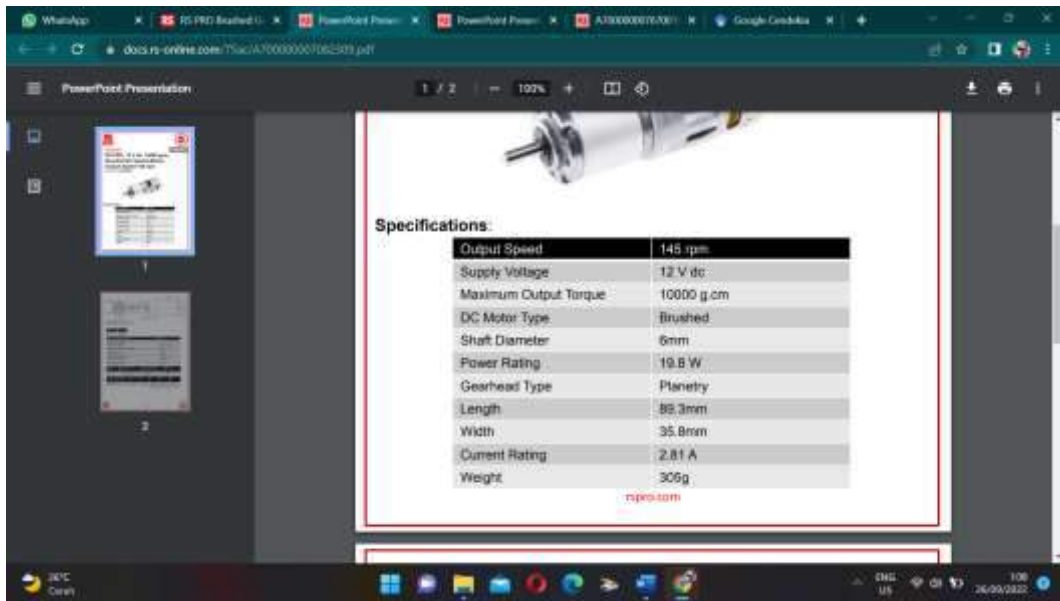


Gambar 11.1 Diagram Blok Sistem

2.2 Model Matematis Motor DC RS PRO 454-0883

Model matematis terdiri dari beberapa tahapan sebagai berikut:

Datasheet Motor DC RS PRO 454-0883



Gambar 11.2 Datasheet Motor DC RS PRO 454-0883

Pemodelan Matematis Orde 1

Pemodelan matematis motor DC RS PRO 454-0883 orde 1 sebagai berikut:

Diketahui:

$$\tau=0,98i=2,81K=ti=0,982,81=0,35 \text{ Persamaan Umum Orde 1 :} \quad (1)$$

$$Gs=K\tau s+1Gs=0,3140,98s+1 \quad (1)$$

Pemodelan Matematis Orde 2

Pemodelan matematis motor DC RS PRO 454-0883 orde 1 sebagai berikut:

Diketahui:

$$G(s) = \omega n 2 s^2 + 2 \zeta \omega n s + \omega n^2 \quad (3)$$

$$G(s) = 2 \pi f^2 s^2 + 2 \zeta (2 \pi f) s + 2 \pi f^2 \quad (4)$$

$$G(s) = 2 \pi 50^2 s^2 + 2 \cdot 100 \cdot (2 \pi 50) s + 2 \pi 50^2 \quad (5)$$

$$G(s) = 98.596 s^2 + 13.816 s + 98.596 \quad (6)$$

2.3 Kendali Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)

Linear Quadratic Regulator (LQR) adalah metode yang digunakan dalam teori kontrol modern. Analisis sistem semacam itu dilakukan dengan menggunakan pendekatan ruang-keadaan (*state space*). Karena pendekatan sederhana dari metode ruang keadaan, sistem multi-input multi-output menggunakan metode ini. Persamaan ruang keadaan untuk sistem secara umum ditulis sebagai berikut:

$$\dot{X} = AX + Bu \quad (3)$$

Pada prinsipnya, metode LQR mencari suatu sinyal kontrol yang meminimalisir indeks performansi J.

$$J=XTQx+uTRadt \quad (4)$$

LQR menemukan hukum *input* kontrol optimal i^* . Kendala yang disebabkan oleh matriks Q dan R meminimalkan indeks kinerja. Hukum kontrol optimal loop tertutup didefinisikan sebagai:

$$u^*=-Kx \quad (5)$$

Dimana K mewakili matriks gain umpan balik yang optimal. Matriks gain bekerja untuk meminimalkan indeks kinerja. Ini menentukan penempatan kutub loop tertutup yang tepat untuk meminimalkannya. Matriks penguatan umpan balik K bergantung pada matriks A, B, Q dan R. Umpan balik gainmatrix k diperoleh dengan menyelesaikan Algebraic Riccati Equation (ARE), P mendefinisikan matriks simetris dan matriks definit positif yang diperoleh solusi dari ARE didefinisikan sebagai:

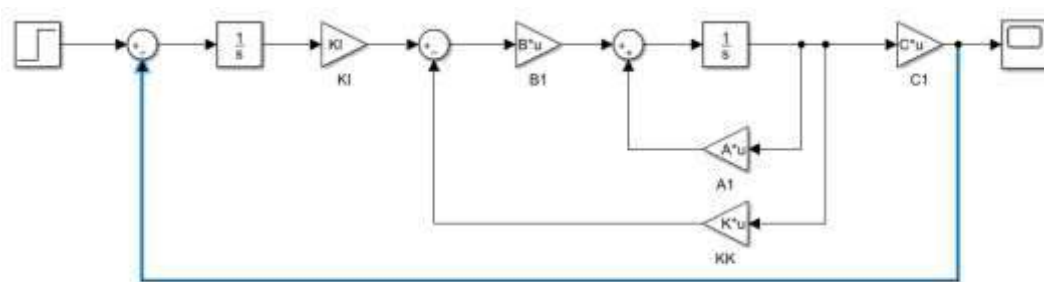
$$ATP+PA-PBR-1BTP+Q=0 \quad (6)$$

$$K=AX-BKx=A-BKx \quad (7)$$

Substitusi persamaan (8) dan (9) menjadi :

$$x=AX-BKx=A-BKx \quad (8)$$

Blok diagram yang menunjukkan konfigurasi LQR ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 11.3 Diagram Blok Linear Quadratic Regulation (LQR)

2.4 Program Matlab Linear Quadratic Regulation (LQR) pada Motor DC RS PRO454-0883

```
% OPTIMASI SISTEM LQR PADA MOTOR DC RS PRO 454-0883
clear; clc;
% Model Motor DC
J=0.00000838 ; b=0.1 ; K=0.0143 ; R=0.848 ; L =0.00018 ;
% J = Momennesia , b = Rasioedam, K= konstanta, R= resistansi, L=
% Induktansi
A = [-b/J K/J; -K/L -R/L];
```

```

B = [0; 1/L];
C = [1 0];
AA = [ A zeros(2,1); -C 0];
BB = [B;0];
% Pole Placement
J = [-3 -4 -5];
K = acker(AA,BB,J)
KI = -K(3);
KK = [K(1) K(2)];
% Matrix LQR
Q = [1 0 0;
     0 1 0;
     0 0 1000];
R = [1] ;
K_lqr = lqr(AA,BB,Q,R)
KI2=-K_lqr(3);
KK2=[K_lqr(1) K_lqr(2)];

```

2.5 Kendali Optimal *Linear Quadratic Tracker* (LQT)

Linear Quadratic Tracker (LQT) terdiri dari umpan balik keadaan biasa dari sistem dinamis linear bersama dengan istilah kontrol umpan maju tambahan. Istilah kontrol umpan maju tergantung pada vektor sinyal referensi, $r(t)$. Vektor $r(t)$ dinyatakan dalam:

$$r(t) = [V_{ref} \ 0]^T \quad (9)$$

V_{ref} merupakan sinyal tegangan referensi yang bervariasi terhadap waktu. Skema LQT meminimalkan indeks kinerja kuadrat untuk menghasilkan keputusan kontrol yang optimal yang dapat dirumuskan pada persamaan sebagai berikut:

$$J = \int_0^T (x^T - r^T) Q (x - r) + dt + R dt \quad (10)$$

Q dan R adalah keadaan antara dan control matriks pembobotan, masing-masing. Mereka dipilih sedemikian rupa; $Q = Q^T \geq 0$ dan $R = R^T > 0$. Karena sifat kuadrat dari fungsi cost, sinyal kontrol sebanding dengan variasi kuadrat persamaan. Jadi, jika state-variations besar; minimalisasi dan, karenanya, tingkat konvergensi lebih cepat.

Keputusan kontrol *affine* yang optimal dievaluasi melalui ekspresi matematika yang ditunjukkan pada,

$$dt = -Kx + K_{ff}v_{ref}t \quad (11)$$

Dimana

$$K = R^{-1}BTP \quad (12)$$

$$K_{ff} = R^{-1}B((A-BK)T)^{-1}HTQ \quad (13)$$

Vektor penguatan, K, membantu merelokasi kutub sistem untuk mensintesis kontroler yang optimal. Perolehan optimal vektor bergantung pada matriks definit positif simetris, P, ditunjukkan pada (12). Matriks, P, untuk sistem yang diberikan dapat diperoleh dengan memecahkan Persamaan Aljabar Riccati, ditunjukkan pada.

$$ATP + PA - PBR - 1BTP + HTQH = 0 \quad (14)$$

2.6 Program Matlab *Linear Quadratic Tracker (LQT)* pada Motor DC RS PRO 454-0883

```
clear
clc
%parameter sistem MSD
m=2;
k=8;
b=6;
%Matriks pada state
A=[0 1;k/m -b/m];
B=[0;1/m];
C=[1 0];
%bobot
Q=[1 0;0 1];
R=10;
[S,eig,G] = care(A,B,G) %riccati 0=A'S+SA-SB(inv R)B'S+Q
Kx=inv(R)*B'*S %feedback Gain Kx
Kr=(Kx*(inv(A))B-eye(1))(inv(C*(inv(A))*B))
Ahat=[0 1 0;-k/m -b/m 0;1 0 0]
Bhat=[0;1/m;0]
```

```

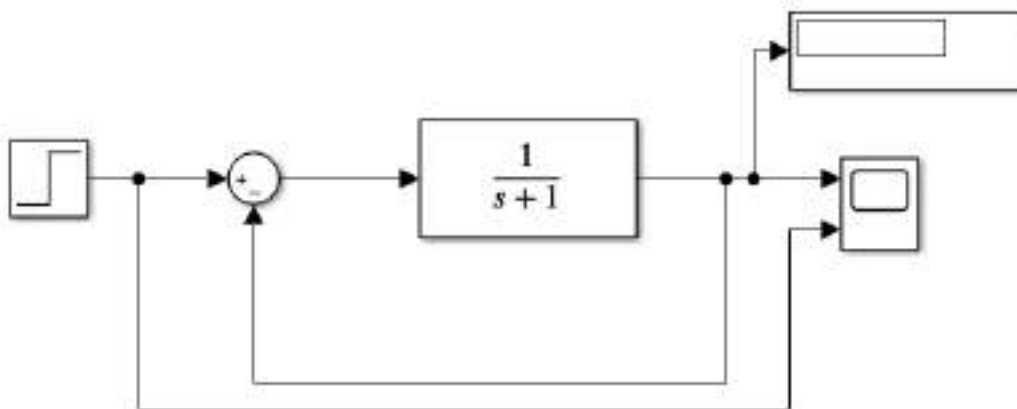
% bobot hat
Qhat=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
Rhat=6;
[Shat,eighat,Ghat] = care(Ahat,Bhat,Qhat) % Riccati 0=A'S+SA-SB(inv R)B'S+Q
Khat=inv(Rhat)*Bhat'*Shat
Kw=Khat(:,3)

```

2.7 Simulasi Rangkaian Sistem pada Matlab

Rangkaian Orde Satu Motor DC

Rangkaian orde satu digunakan untuk mengetahui keluaran respon asli pada motor DC RS PRO 454-0883 tanpa dipengaruhi metode optimasi dan *noise*.



Gambar 11.4 Rangkaian Orde Satu Motor DC

Gambar 2.4 adalah rangkaian orde satu motor DC yang terdiri dari satu *input* dan satu *output*. *Input* menggunakan jenis *step*. *Transfer function* pada rangkaian tersebut berupa permodelan motor DC RS PRO 454-0883 orde satu. Keluaran respon ditampilkan pada *scope* untuk melihat hasil respon.

Rangkaian *Linear Quadratic Regulation (LQR)* Motor DC RS PRO 454-0883

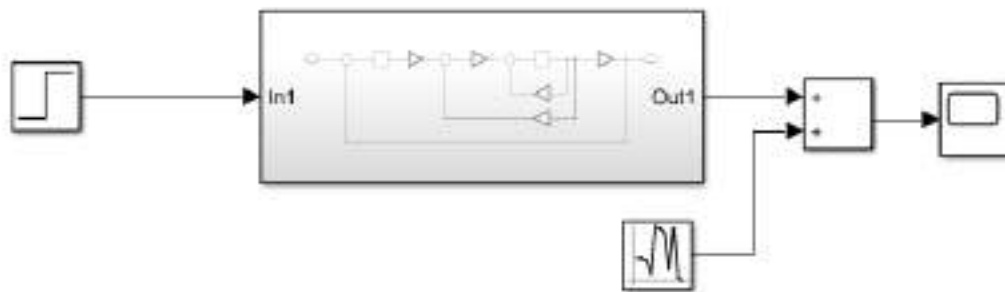
Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 454-0883 digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 11.5 Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 454-0883

Rangkaian Linear Quadratic Regulation (LQR) Motor DC 37-GB500 dengan Noise

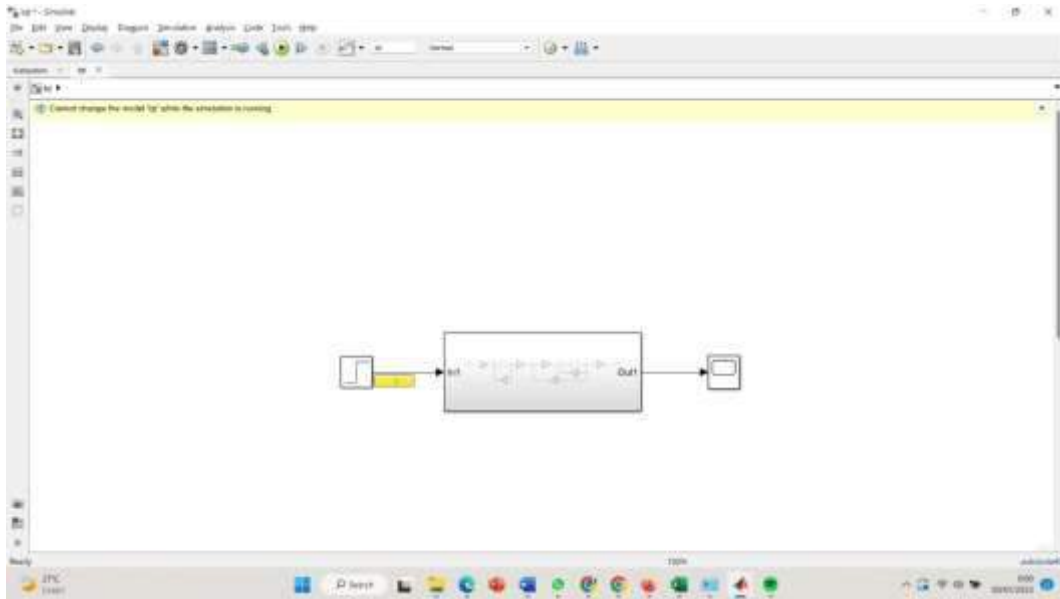
Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 454-0883 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 11.6 Rangkaian LQR Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Noise

Rangkaian Linear Quadratic Tracker (LQT) Motor DC 37-GB500

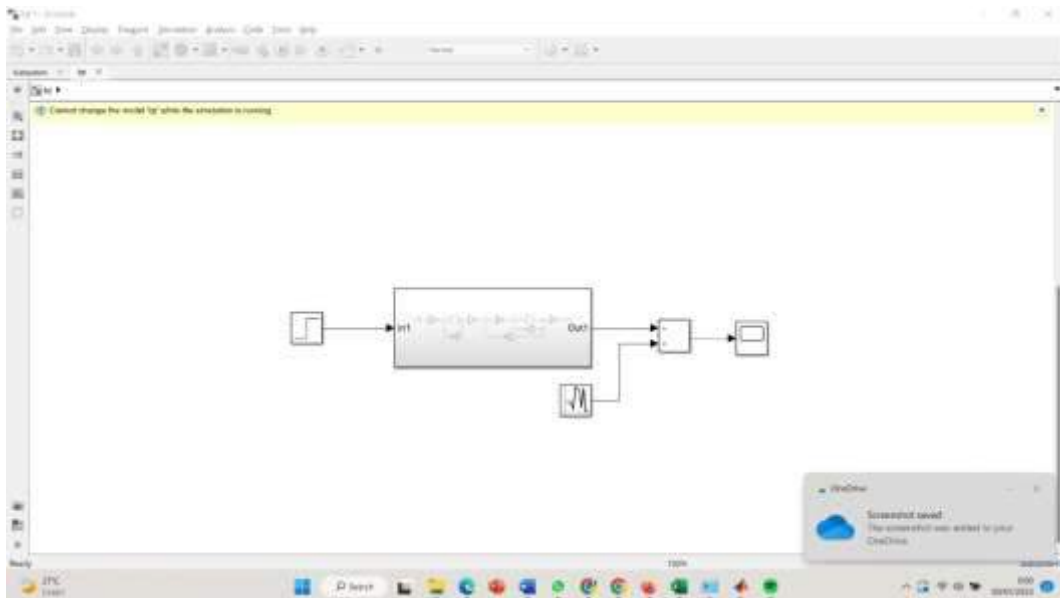
Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 454-0883 digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQR yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 11.7 Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 454-0883

Rangkaian *Linear Quadratic Tracker* (LQT) Motor DC RS PRO 454-0883 dengan *Noise*

Rangkaian LQT Motor DC RS PRO 454-0883 dengan *noise* digunakan untuk mengetahui hasil keluaran respon dari motor DC jika motor DC diberikan penambahan metode optimasi LQT dan penambahan *noise* pada sistem yang dilakukan pada Matlab Simulink.



Gambar 11.8 Rangkaian LQT Motor RS PRO 454-0883 dengan Noise

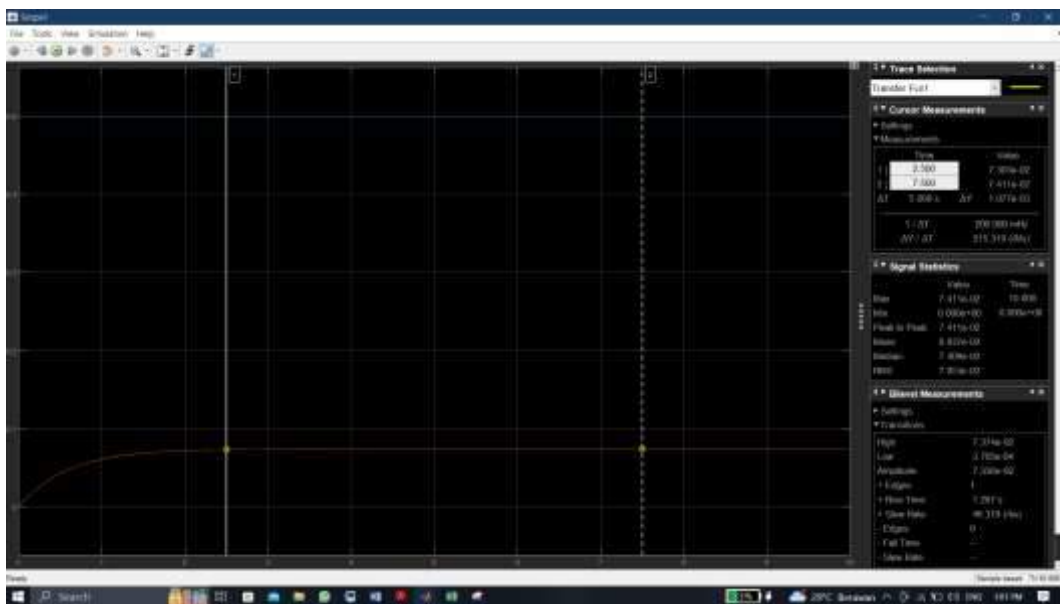
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil percobaan berupa grafik keluaran respon motor DC RS PRO 454-0883 dengan model matematis orde satu, ditambahkan metode *Linier Quadratic Regulation* (LQR),

metode *Linier Quadratic Tracker* (LQT), serta ditambahkan *noise* . Dari hasil percobaan akan dilakukan komparasi untuk keluaran respon motor.

Hasil Respon Orde Satu Motor DC RS PRO 454-0883

Keluaran respon orde satu (Gambar 3.1), terlihat grafik respon memiliki *output* yang jauh dari *set point*. Gelombang warna oranye merupakan hasil respon motor sedangkan yang warna biru adalah *set point*. *Set point* bernilai 0,5 sedangkan respon motor hanya di angka 0,07, terpaut jauh dari *set point*. Motor DC RS PRO 454-0883 memiliki karakteristik linear yang ditunjukkan dengan bentuk sinyal yang tidak ada *ripple*. Respon motor berada pada kondisi *steady state* pada detik ke 2. Respon tersebut pada optimasi terbilang lambat.



Gambar 11.9 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 Orde Satu

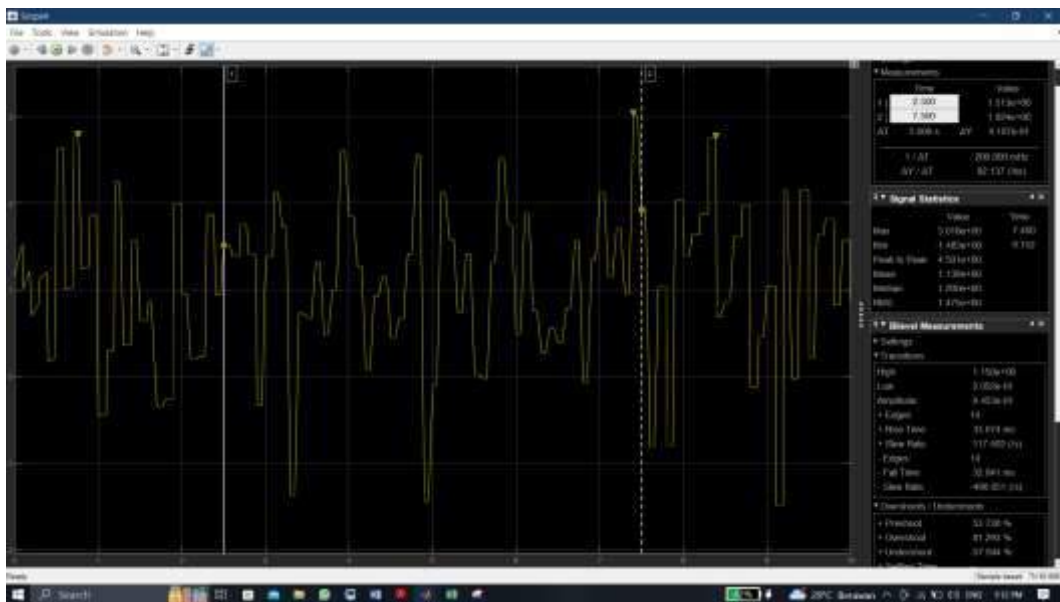
Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQR

Keluaran respon rangkaian LQR (Gambar 3.2), terlihat grafik respon motor RS PRO 454-0883 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun *undershoot*. Respon motor DC RS PRO 454-0883 dengan metode *Linear Quadratic Regulation* (LQR) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.

Gambar 11.11 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQR dan Tidak Menggunakan Metode

Hasil Respon Motor DC 37-GB500 Metode LQR dengan Noise

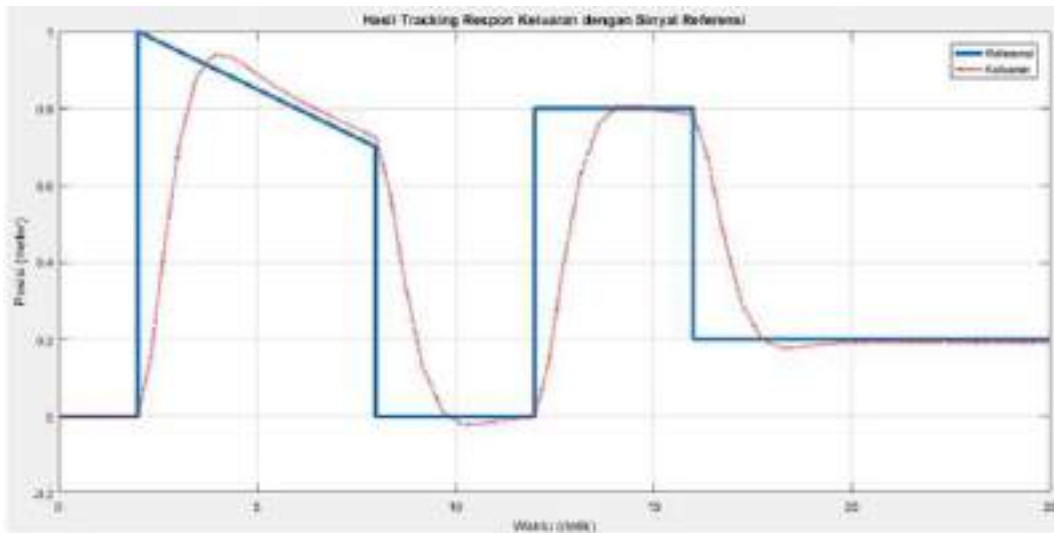
Keluaran respon rangkaian LQR dengan *noise* (Gambar 3.4), terlihat sinyal berwarna kuning mengalami perubahan bentuk sebelum diberikan *noise*. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* dan mengduplikat bentuk dari sinyal *noise* yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linear dan jauh dari kondisi *steady state* pada *set point* yang telah diberikan.



Gambar 11.12 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQR saat Diberikan Noise

Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT

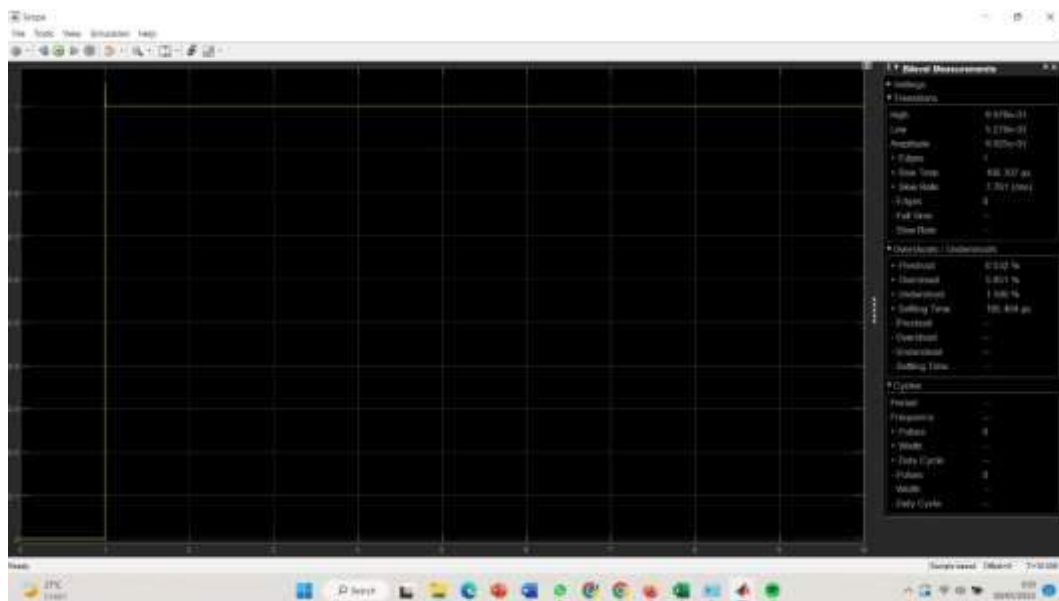
Keluaran respon rangkaian LQT (Gambar 3.5), terlihat grafik respon motor 37-GB500 memiliki keluaran yang sama dengan nilai *set point* yang diinginkan. *Set point* bernilai 0,5. Respon motor berhasil mencapai *set point* pada detik ke 1,2 tanpa adanya *overshoot* maupun *undershoot*. Respon motor DC RS PRO 454-0883 dengan metode *Linear Quadratic Tracker* (LQT) lebih baik dibandingkan dengan respon motor orde satu.



Gambar 11.13 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT

Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT dan Tanpa Metode

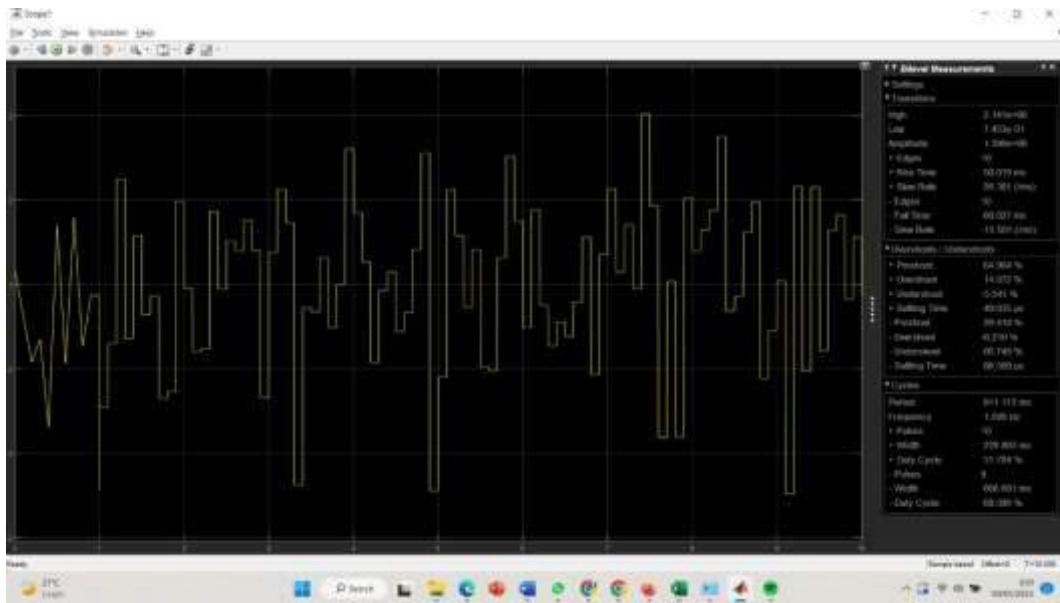
Keluaran respon perbandingan (Gambar 3.6) antara menggunakan metode LQT dan tanpa menggunakan metode. Keluaran respon memiliki grafik yang berbeda. Gelombang warna oren merupakan *set point* yang diinginkan, warna biru merupakan respon motor tanpa menggunakan metode LQT, dan gelombang warna kuning merupakan respon motor menggunakan metode LQT. Pada gambar 3.3 terlihat respon motor dengan metode LQR mempunyai respon yang paling baik jika dibandingkan dengan tanpa metode apapun. Selain memiliki respon yang sesuai dengan *set point*, respon motor juga menjadi lebih cepat untuk mencapai nilai *steady state*.



Gambar 11.14 Hasil Perbandingan Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT dan Tidak Menggunakan Metode

Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 Metode LQT dengan Noise

Keluaran respon rangkaian LQT dengan *noise* (Gambar 3.7), terlihat sinyal berwarna kuning mengalami perubahan bentuk sebelum diberikan *noise*. Bentuk sinyal mengalami banyak sekali *ripple* dan mengduplikat bentuk dari sinyal *noise* yang diberikan. Sinyal yang dihasilkan tidak lagi berbentuk linear dan jauh dari kondisi *steady state* pada *set point* yang telah diberikan.



Gambar 11.15 Hasil Respon Motor DC RS PRO 454-0883 dengan Metode LQT saat Diberikan Noise

A. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dengan menggunakan bantuan MATLAB yang dilakukan pada motor DC RS PRO 454-0883 pada beberapa rangkaian, didapatkan kesimpulan bahwa kedua metode yang digunakan (*Linear Quadratic Regulation* dan *Linear Quadratic Tracker*) memiliki pengaruh yang signifikan pada respon motor. Bentuk keluaran sinyal dari rangkaian menggunakan metode LQR, LQT, dan orde satu memiliki diferensi yang mencolok. Meski begitu, rangkaian saat ditambahkan *noise* mengalami banyak sekali *ripple*.

Daftar Pustaka

- [1] Angga, ATN, Shiddiq, MJ and Ramadhan, MF. "Use ordinary expressions to learn how to extract code feedback from the software program upkeep process." *International Journal of Advances in Data and Information Systems* 2.2, 2021, pp. 105-113.
- [2] Fauzi, AR, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Santosa, AF. "Performance of Permanent Magnet Synchronous Generator (pmsg) 3 Phase Radial Flux Results Modification of Induction Motor." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.2, 2024, pp. 5-11.

- [3] Febrianti, C and Nugraha, AT. "Implementasi Sensor Flowmeter pada Auxiliary Engine Kapal Berbasis Outseal PLC." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.2, 2022
- [4] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Itislam, TA, Fathurrohman, MF and "SIMULASI SISTEM PENGISIAN BATERAI BERDASARKAN LERENG DAYA DAN TEGANGAN PADA PANEL SURYA MENGGUNAKAN KONVERTER DC-DC BUCK-BOOST UNTUK PENERANGAN JALAN UMUM BERBASIS ENERGI" *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 43-52.
- [5] Priyambodo, D and Nugraha, AT. "Design and build a photovoltaic and vertical Savonius turbine power plant as an alternative power supply to help save energy in skyscrapers." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2021
- [6] Nugraha, AT. "Rancang Bangun Teknologi Pemurni Air." Skripsi, 2015, Universitas Jember, Jember.[Diakses tanggal 27 Maret 2016-16: 18 WIB]
- [7] Nugraha, AT, Pratiwi, OD and Setiyoko, AS. "Simulasi gangguan saat terjadi gangguan undervoltage dan unbalance load pada sub-sub distribusi panel." *MEDIA ELEKTRIKA Учредители: LPPM Universitas Muhammadiyah Semarang* 16.2, 2024, p. 162.
- [8] Nugraha, AT, Ravi, AM and Priyambodo, D. "Optimization of Targeting Rocket Launchers with Wheeled Robots." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2021
- [9] Nugraha, AT, Pratiwi, OD, As'ad, RF and Athavale, VA. "Brake current control system modeling using linear quadratic regulator (lqr) and proportional integral derivative (pid)." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2022
- [10] Nugraha, AT, Azam, AI, Sobhita, RA and Sunarno, E. "IOT-Based Smart Home Control Design Using Blink Application and Esp8266 Wi-Fi Module." *Mein: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.1, 2024, pp. 7-11.
- [11] Evendi, M, Muttaqin, H, Aziz, N, Faza, M, Putra, M, Tadika, R, Nugraha, A and "Fungsi Ilmu dan Filsafat Ilmu dalam Kehidupan."
- [12] Ihsanudin, Y, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Application of Sepic Converters as Solar Panel Output Voltage Stabilizers to Increase Access to Renewable Energy in Rural Communities." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.1, 2024, pp. 40-45.
- [13] Primaningtyas, WE, Utomo, AP, Wulandari, KD, Alfanda, BD, Cahyono, L and "DISEMINASI PEMBUATAN PAPLAS (PAVING PLASTIK) SEBAGAI SARANA DEMARKASI AREA POTENSI BAHAYA DI LINGKUNGAN SEKOLAH." *Jurnal Cakrawala Maritim* 4.2, 2021
- [14] Sheila, SY, As'ad, RF, Rochmawati, NW, Riyadi, F and Nugraha, AT. "RANCANG BANGUN PENSTABIL SUHU DAN KELEMBAPAN KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH UNTUK MENCEGAH TERJADINYA CORONA DENGAN METODE FUZZ." *ID Patent* EC00,202,294,930, 2022
- [15] Amrullah, MU, Agna, DIY, Asri, P, Darmajanti, P and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Monitoring Kualitas Air Tambak Udang Vaname Dengan Kontrol Paddle Wheel Berbasis Mikrokontroler." *Jurnal 7 Samudra* 8.2, 2023, pp. 117-122.
- [16] Nugraha, AT, Mudjiono, U, Subiyanto, L, Widodo, HA, Hidayat, EP and "TRAINER KIT KOORDINASI PROTEKSI PADA SISTEM DISTRIBUSI PT. X MENGGUNAKAN TEORI GRAPH." *Seminar MASTER PPNS* 8.1, 2023, pp. 1-8.
- [17] Cahyono, L, Apriani, M, Nugraha, AT and Utomo, AP. "Potensi Risiko Waktu Pelaksanaan Proyek Swakelola di Kabupaten Pasuruan melalui Program Kotaku Kementerian PUPR." *Jurnal Spektran* 10.2, 2022, p. 118.
- [18] Sugianto, MGPA and Nugraha, AT. "Implementasi sensor cahaya sebagai level bahan bakar pada tangki harian kapal." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022

- [19] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Gas Pressure Measurement On Rocket Chamber Based On Strain Gauge Sensor." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2020
- [20] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP and Priyambodo, D. "Design of Charger Controller on Wind Energy Power Plant With Arduino Uno Based on Pi Controller." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2021

GLOSARIUM

Arus Searah (DC) : Arus listrik yang mengalir dalam satu arah dengan polaritas tetap.

Arus Bolak-balik (AC) : Arus listrik yang arah dan besarnya berubah secara periodik terhadap waktu.

Penyearah (Rectifier) : Rangkaian yang mengubah tegangan/arus bolak-balik (AC) menjadi searah (DC).

LQR (Linear Quadratic Regulator) : Metode kendali optimal yang meminimalkan fungsi biaya kuadratik untuk mengatur keadaan sistem.

LQT (Linear Quadratic Tracking) : Pengembangan LQR yang bertujuan mengikuti (tracking) sinyal referensi tertentu.

PID (Proportional Integral Derivative) : Pengendali umpan balik yang menggabungkan aksi proporsional, integral, dan turunan.

PWM (Pulse Width Modulation) : Teknik pengaturan daya dengan memodulasi lebar pulsa sinyal.

THD (Total Harmonic Distortion) : Ukuran tingkat distorsi harmonik pada suatu gelombang listrik.

SCR (Silicon Controlled Rectifier) : Komponen semikonduktor daya yang berfungsi sebagai sakelar terkendali.

TRIAC : Komponen semikonduktor yang dapat menghantarkan arus pada kedua arah gelombang AC.

Overshoot : Lonjakan respons sistem yang melampaui nilai akhir (steady state) sebelum stabil.

Settling Time : Waktu yang dibutuhkan respons sistem untuk menetap dalam rentang toleransi tertentu.

Steady State : Kondisi tunak ketika keluaran sistem tidak lagi berubah secara signifikan terhadap waktu.

Plant : Objek atau sistem fisik yang dikendalikan dalam suatu sistem kontrol.

Duty Cycle : Rasio durasi sinyal aktif terhadap satu periode penuh, biasa dinyatakan dalam persen.

INDEKS

A

Arus Bolak-balik
Arus Searah

C

Cold Storage

D

DC RS PRO 834-7641
Dinamometer

E

Eddy Current

G

Gelombang Penuh

K

Kontrol
Kontrol Optimal

L

Linear Quadratic Regulator
Linear Quadratic Regulator (LQR)
Linear Quadratic Tracking
Linear Quadratic Tracking (LQT)
Linier Quadratic Tracking
Linier Qudratic Regulator
LQR
LQT

M

Matlab
Matlab Dan Model Matematis
MIMO
MISO
Motor
Motor AC
Motor DC
Motor Induksi

N

Noise

O

Optimal
Optimasi Sistem

Overshoot

P

Pengendalian

Penyearah

PID

PSIM

PWM

R

Rectifier

Regulator Tegangan

Rise Time

RS PRO 834-7641

S

SCR

Setengah Gelombang

Settling Time

SIMO

Simulink

SISO

Sistem

Sistem Kendali

Sistem Kontrol

Steady State

T

THD

TRIAC

BIOGRAFI PENULIS

Anggara Trisna Nugraha — *Pengarah*

Anggara Trisna Nugraha merupakan pengarah penyusunan buku bunga rampai ini. Beliau aktif membimbing kegiatan ilmiah mahasiswa di bidang elektronika daya, sistem kendali, dan kelistrikan kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, serta menaruh perhatian besar pada penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID.

Fara Kumala Sari1 — *Penulis BAB I*

Penulis adalah kontributor pada BAB I buku ini dengan judul “Optimalisasi Motor DC JGA25-370 Memanfaatkan Pendekatan LQR (linear Quadratic Regulator) dan LQT (linear Quadratic Tracking) pada MATLAB SIMULINK”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Farhan Wahyu Nur Rahman1 — *Penulis BAB II*

Penulis adalah kontributor pada BAB II buku ini dengan judul “Kajian Simulasi LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) dengan Plant Motor DC FAPG36-BL3650”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhamad Khoirun Nasikhin — *Penulis BAB III*

Penulis adalah kontributor pada BAB III buku ini dengan judul “Implementasi Pendekatan LQR dan LQT pada Optimalisasi Motor DC BSG - 23”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Adimassyah — *Penulis BAB IV*

Penulis adalah kontributor pada BAB IV buku ini dengan judul “Kajian Simulasi LQR & LQT (Linear Quadratic Regulator & Linear Quadratic Tracking) dengan Plant Motor DC M644E”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Dhifa Alfitra, Email : — *Penulis BAB V*

Penulis adalah kontributor pada BAB V buku ini dengan judul “Optimalisasi Motor DC dengan Metode LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking)”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Dzi Washfil Hasin — *Penulis BAB VI*

Penulis adalah kontributor pada BAB VI buku ini dengan judul “Identifikasi Motor DC 37GB500-72-2463 dengan Metode Linear Quadratic Regulator dan Linear Quadratic Tracking”. Tulisan

tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Indrastata Ifititana Arvi — *Penulis BAB VII*

Penulis adalah kontributor pada BAB VII buku ini dengan judul “Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) pada Motor DC M66 Series”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Iqbal Al Haidar — *Penulis BAB VIII*

Penulis adalah kontributor pada BAB VIII buku ini dengan judul “Respons Output dengan Pendekatan Optimalisasi Sistem LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 834-7641”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Nial Alanus — *Penulis BAB IX*

Penulis adalah kontributor pada BAB IX buku ini dengan judul “Sirkuit LQR (Linear Quadratic Regulator) dan LQT (Linear Quadratic Tracking) pada Motor DC M66CE-12”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Rafi Solakhudin1 — *Penulis BAB X*

Penulis adalah kontributor pada BAB X buku ini dengan judul “Optimalisasi Sistem Sirkuit LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 834-7641 dengan dan Tanpa Noise”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Muhammad Rahmadani — *Penulis BAB XI*

Penulis adalah kontributor pada BAB XI buku ini dengan judul “Optimalisasi Sistem Sirkuit Keluaran dengan Pendekatan LQR dan LQT pada Motor DC RS PRO 454-0883”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

BUNGA RAMPAI

TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM KENDALI

TENTANG BUKU INI

Bunga rampai ini menghimpun karya tulis ilmiah mahasiswa dalam bidang elektronika daya dan sistem kendali yang dikembangkan melalui kegiatan ilmiah INERGYC. Edisi II Jilid B tahun 2023 memuat 11 bab yang membahas perancangan dan analisis pengatur tegangan AC, rangkaian penyearah (rectifier), serta penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID pada pengendalian motor listrik.

Setiap bab disusun oleh penulis yang berbeda dengan pendekatan dan studi kasus masing-masing, sehingga buku ini menjadi sumber rujukan yang kaya bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi di bidang teknik kelistrikan.

Topik Utama

- Pengaturan tegangan AC satu fasa dan tiga fasa
- Rangkaian penyearah (rectifier) terkontrol
- Kendali motor DC dengan metode LQR dan LQT
- Pengendali PID dan perbandingan antarmetode
- Simulasi menggunakan PSIM dan MATLAB/Simulink

Edisi II • Jilid B • Tahun 2023

Diterbitkan oleh :

DEPARTMENT OF MARINE ELECTRICAL ENGINEERING
SHIPBUILDING INSTITUTE OF POLYTECHNIC SURABAYA