

Sistem Kontrol LQR dan PID pada Mesin Pengering Biji Kopi

Shelomitha Valery Lesmana^{1*}, Anggara Trisna Nugraha², Mukhammad Jamaludin³,
dan Rama Arya Sobhita⁴

¹D3 - Teknik Kelistrikan Kapal, Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan
Teknik Kimia,Keputih,Sukolilo,Surabaya,60111, Indonesia

^{2,4}Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jalan Teknik
Kimia,Keputih,Sukolilo,Surabaya,60111, Indonesia

³Bio Industrial Mechatronic Engineering, National Chung Hsing University, 145號, Xingda Rd, South District,
Taichung City,40227, Taiwan

Email: shelomithavalery@studentppns.ac.id^{1*}, anggaranugraha@ppns.ac.id², g112040520@mail.nchu.edu.tw³,
ramasobhita@studentppns.ac.id⁴

Abstrak

Proses pengeringan merupakan salah satu tahapan pasca panen yang sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap kualitas biji kopi. Saat ini, masih sedikit petani yang menggunakan alat bantu dalam proses ini. Beberapa sistem otomatis telah dikembangkan, seperti pengatur level pemanas berdasarkan waktu atau suhu target tertentu. Namun, pendekatan tersebut belum mempertimbangkan suhu aktual biji kopi secara langsung, sehingga tidak memperhitungkan kondisi lingkungan, siklus panas alat, dan ukuran batch. Akibatnya, hasil pengeringan menjadi tidak konsisten. Padahal, penggunaan alat bantu dapat meningkatkan efisiensi waktu dan mengurangi ketergantungan terhadap cuaca, sehingga mutu kopi lebih terjaga. Tujuan praktikum ini adalah merancang alat pengering biji kopi dengan pengendali PID dan sistem LQR untuk mengatasi permasalahan yang umum dihadapi petani kopi di Indonesia. Dalam simulasi, parameter LQR yang digunakan adalah $r = 3$ dan $L = 3$, dengan B , K , dan J masing-masing sebesar $0,1$. Hasil tuning PID diperoleh $K_p = 14,9325$, $K_i = 1,7561$, dan $K_d = 0,17727$. Hasil menunjukkan bahwa sistem pengendali ini mampu memberikan respons suhu yang lebih stabil dan akurat, sehingga mendukung proses pengeringan yang lebih efisien dan konsisten..

Kata kunci: Biji Kopi, pengering, LQR, PID

Abstract

The drying process is a crucial post-harvest stage that directly affects the quality of coffee beans. Currently, only a few farmers use tools to assist with drying. Some automatic systems have been developed, such as those that adjust heater levels based on time or preset target temperatures. However, these methods do not directly consider the actual temperature of the beans, thus ignoring environmental conditions, heating cycles, and batch size. This results in inconsistent drying outcomes. In fact, using drying tools offers benefits like time efficiency and weather independence, which help preserve coffee quality. This practicum aims to design a coffee bean dryer using a PID controller and an LQR system to address common issues faced by coffee farmers in Indonesia. In the simulation, the LQR parameters used are $r = 3$ and $L = 3$, with B , K , and J values set at 0.1 . The PID controller parameters after tuning are $K_p = 14.9325$, $K_i = 1.7561$, and $K_d = 0.17727$. The results show that this control system provides a more stable and accurate temperature response, enabling a more efficient and consistent drying process.

Keywords: Coffee Beans, dryer, LQR, PID

1. Pendahuluan

Kopi merupakan minuman dengan cita rasa dan aroma khas yang sangat digemari di seluruh dunia sebagai hasil produk pertanian. Indonesia termasuk salah satu negara penghasil kopi dengan kontribusi besar, baik sebagai sumber devisa, pendapatan petani, maupun bahan baku industri. Namun, kondisi perkebunan kopi di Indonesia saat ini menunjukkan penurunan kualitas, yang salah satunya disebabkan oleh metode pengeringan yang kurang tepat. Proses pengeringan merupakan tahapan penting dalam menghasilkan kopi berkualitas tinggi.

Saat ini, sebagian besar petani masih menggunakan metode penjemuran dengan bantuan sinar matahari. Meskipun metode ini praktis dan murah, efektivitasnya menurun saat musim hujan. Keterlambatan pengeringan saat cuaca mendung atau hujan dapat mempercepat kerusakan biji kopi akibat aktivitas mikroorganisme, sehingga mutu biji kopi menjadi rendah. Tujuan utama dari proses pengeringan adalah menurunkan kadar air dalam biji hingga batas tertentu agar pertumbuhan mikroorganisme penyebab kerusakan dapat dihentikan, sehingga kualitas produk dapat terjaga.

Metode tradisional seperti pengeringan di atas lantai, tikar, anyaman bambu, atau plastik memang disukai karena biaya rendah dan mudah dilakukan. Namun, metode ini seringkali menghasilkan biji dengan keasaman rendah, sulit mencapai kadar air ideal, rentan terhadap jamur, dan mudah terkontaminasi bahan lain. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan harga jual dan merugikan petani.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang sistem pengering kopi otomatis yang mampu menjaga kestabilan suhu berdasarkan kondisi aktual biji kopi, serta dapat menyesuaikan diri terhadap variasi lingkungan dan karakteristik batch. Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam penerapan sistem kendali PID dan LQR pada alat pengering kopi, yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan konsistensi pengeringan, serta mengurangi ketergantungan terhadap metode tradisional yang tidak stabil.

Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mensimulasikan alat pengering biji kopi berbasis pengendali PID dan LQR sebagai solusi atas permasalahan pengeringan tradisional yang masih banyak digunakan oleh petani di Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi sistem kontrol pada alat pengering biji kopi otomatis yang dilengkapi dengan sistem pelacakan matahari menggunakan motor DC dan sensor LDR. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang dan menguji kinerja pengendali PID dan LQR untuk mengoptimalkan posisi alat terhadap arah sinar matahari serta kestabilan suhu pengering. Penelitian dilakukan secara bertahap dengan metode sebagai berikut:

2.1 PID Kontrol

Proportional Integral Derivative (PID) merupakan suatu sistem yang memiliki umpan balik (feedback). PID banyak digunakan dalam industri manufaktur. Sistem kontrol ini tersedia dalam bentuk sistem kontrol tertutup maupun sistem kontrol terbuka.

Pengembangan kontrol PID (Proportional, Integral, Derivative) bertujuan agar suatu perangkat otomatis dapat menjalankan loop umpan balik secara terus-menerus, dengan cara membandingkan nilai terukur dengan nilai yang diinginkan. Kemudian, sistem menghitung besarnya koreksi yang perlu dilakukan terhadap suatu elemen, seperti sumber panas.

Ketika diterapkan pada mesin sangrai kopi, sistem ini bekerja dengan membaca suhu terkini secara terus-menerus, lalu mengatur pembakar agar mendekati suhu yang diinginkan pada waktu tertentu dalam proses sangrai (sesuai dengan profil sangrai yang ditentukan).

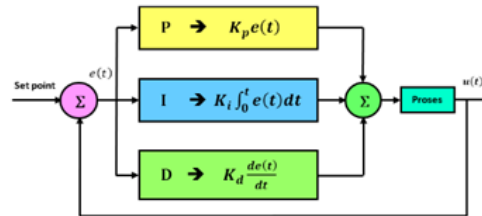
Selama proses sangrai, sistem secara konstan menjalankan siklus berikut:

- Menentukan suhu biji kopi yang seharusnya dicapai pada waktu tertentu dalam proses sangrai, yang disebut sebagai setpoint (SP), dan ditentukan berdasarkan kurva suhu dasar dari profil yang ingin dicapai.
- Membandingkan setpoint dengan suhu biji kopi saat ini, yang disebut sebagai variabel proses (PV).
- Menentukan selisih antara setpoint dan variabel proses. Selisih ini disebut sebagai nilai error, yaitu perbedaan antara suhu yang diinginkan dengan suhu aktual biji kopi.
- Mengubah persentase pemanas untuk mengarahkan sistem agar selisih suhu menjadi nol.

Sistem sangrai kopi dengan profil PID memanfaatkan loop PID otomatis untuk mengendalikan mesin sangrai mengikuti kurva dasar. Sistem ini secara terus-menerus memantau suhu biji kopi, lalu secara otomatis menyesuaikan persentase panas untuk mengikuti kurva tersebut. Proses ini terjadi beberapa kali setiap detik untuk mencapai suhu biji

kopi yang telah ditentukan pada waktu tertentu (determinant). Dengan metode ini, kontrol suhu menjadi lebih akurat dan hasil sangrai lebih konsisten.

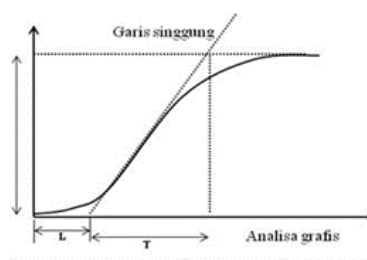
Kontroler PID akan memberikan aksi pada aktuator yang digunakan berdasarkan hasil perhitungan error yang diterima. PID terdiri dari tiga komponen, yaitu proportional, derivative, dan integral. Diagram blok kontroler PID dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 1. Diagram Blok Kontrol PID

Diagram blok PID di atas menunjukkan cara kerja sistem kontrol dengan tiga komponen utama: Proportional (P), Integral (I), dan Derivative (D). Pertama, nilai setpoint dibandingkan dengan output proses untuk menghasilkan error $e(t)$. Komponen P merespons error saat ini, I menghitung akumulasi error dari waktu ke waktu, dan D memprediksi perubahan error di masa depan. Ketiga sinyal ini dijumlahkan untuk membentuk sinyal kontrol $u(t)$ yang diberikan ke proses. Hasil dari proses kemudian diumpan balik sebagai input baru, menciptakan sistem kontrol tertutup yang terus menyesuaikan agar output mendekati setpoint secara stabil dan akurat.

- Kontrol Proporsional
 Kontrol proporsional menghasilkan sinyal kendali yang besarnya sebanding dengan besar error yang terjadi. Jenis kontrol ini dapat memperbaiki waktu naik (rise time) dan waktu stabil (settling time), meningkatkan atau menurunkan kestabilan sistem, serta mengurangi error pada kondisi tunak (steady state error).
- Kontrol Integral
 Penggunaan kontrol integral memungkinkan penghilangan error pada kondisi tunak. Namun, jika nilai konstanta integral (K_i) tidak dipilih dengan tepat, dapat menyebabkan respons transien yang tinggi dan berpotensi membuat sistem menjadi tidak stabil. Nilai K_i yang terlalu besar dapat menyebabkan output sistem berosilasi seiring meningkatnya orde sistem.
- Kontrol Derivatif
 Kontrol derivatif bertujuan untuk memperbaiki respons transien dengan memberikan aksi berdasarkan perubahan error. Hal ini memungkinkan sistem merespons lebih cepat. Kontrol derivatif dinyatakan dalam waktu derivatif (T_d), yang nilainya sebanding dengan besar keluaran pengendali.
- Metode Ziegler-Nichols
 Metode Ziegler-Nichols I dan II digunakan untuk menentukan parameter PID. Metode ini dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols, dan dapat diterapkan pada sistem kontrol tertutup maupun terbuka. Sistem tertutup menggunakan umpan balik, sedangkan sistem terbuka tidak membandingkan output dengan input. Penyetelan manual dilakukan dengan menyesuaikan nilai proporsional, integral, dan derivatif untuk meningkatkan respons sistem.
 - Metode Ziegler-Nichols I
 Metode Ziegler-Nichols I diterapkan pada sistem terbuka untuk pengaturan PID. Metode ini menghasilkan kurva berbentuk huruf S dengan dua parameter utama, yaitu waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T). Nilai L dan T diperoleh dengan menarik garis singgung pada titik belok kurva S, lalu menentukan titik potong garis tersebut dengan sumbu waktu pada kurva $c(t)=K$.



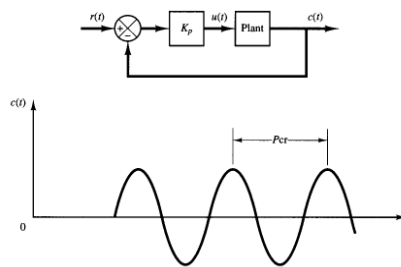
Gambar 2. Grafik Kurva Ziegler I

Parameter yang digunakan untuk menentukan nilai pengaturan PID didasarkan pada definisi empiris dari metode Ziegler-Nichols. Rumus pengendalian parameter menurut Metode Ziegler-Nichols I dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 1. Ziegler I Parameter

Tip e Kontroler	Langkah Respon		
	Kp	Ti	Td
P	1/a		
I	0.9/a	3L	
D	1.2/a	2L	L/2

- Metode Ziegler-Nichols II menggunakan sistem umpan balik (feedback) dengan hanya mengaktifkan pengendali Kp (Gain), sementara nilai Ki dan Kd diatur menjadi nol atau tidak diaktifkan. Dengan konfigurasi ini, nilai output akan berosilasi secara terus-menerus dengan amplitudo yang konstan.



Gambar 3. Grafik Kurva Ziegler II

Pada gambar di atas ditampilkan sinyal osilasi, di mana saat nilai Kp diperbesar, osilasi akan terus meningkat hingga sistem menjadi tidak stabil. Sebaliknya, jika Kp dikurangi, sinyal keluaran akan mengalami redaman dan akhirnya mencapai titik kesetimbangan setelah terjadi gangguan. Nilai Kp saat osilasi tetap berlangsung (osilasi berkelanjutan) disebut sebagai Kcr, sedangkan periode osilasinya disebut Pcr atau periode lintasan. Untuk menentukan nilai parameter Kp, Ti, dan Td, dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

Tabel 2. Ziegler II Parameter

Tipe Kontroler	Langkah Respon		
	Kp	Ti	Td
P	0.5 Kcr	0	0
I	0.45 Kcr	1/1.2 Pcr	0
D	0.6 Kcr	0.5 Pcr	0.125 Pcr

2.2 Sistem LQR

Linear Quadratic Regulator (LQR) merupakan metode kontrol optimal yang bertujuan mengoptimalkan kinerja sistem tertutup serta meminimalkan penggunaan energi. LQR merupakan salah satu pendekatan dalam perancangan sistem kendali yang optimal. Sistem yang dikendalikan (plant) diasumsikan sebagai sistem linear, sedangkan fungsi objektifnya berbentuk kuadrat dari variabel sistem dan sinyal masukan kontrol. Keunggulan utama dari penggunaan rumus LQR adalah kemudahan dalam analisis dan penerapan, sekaligus mampu meminimalkan waktu. Metode LQR memiliki fungsi nilai (value function) yang dirumuskan sebagai berikut [1].

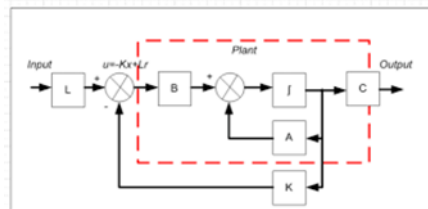
$$J = \int_{\infty}^0 [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)uR(t)]dt \quad (1)$$

Q merupakan matriks positif definit yang merepresentasikan penilaian terhadap keadaan sistem, sedangkan R adalah matriks bobot yang digunakan untuk faktor variabel kendali (kontrol), dan bersifat spesifik terhadap kuantitas tertentu.

Jika sistem linear yang dianalisis dapat dinyatakan dalam bentuk berikut: [2]

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), t > 0, x(0) = 0 \quad (2)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), t > 0 \quad (3)$$



Gambar 4. Flowchart Sistem LQR

Diagram blok di atas menggambarkan sistem kontrol LQR (Linear Quadratic Regulator) yang menggunakan umpan balik keadaan untuk menghasilkan sinyal kontrol optimal. Nilai kontrol $u = -Kx + Lr$ dihitung berdasarkan keadaan sistem x dengan matriks penguat K , serta referensi masukan Lr . Bagian dalam garis merah putus-putus menunjukkan plant, yaitu sistem fisik yang terdiri dari elemen matriks A , B , dan proses dinamis. Tujuan utama sistem ini adalah menjaga kestabilan, mengikuti referensi, dan meminimalkan konsumsi energi.

2.3 Motor DC

Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai arus searah (DC) untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak mekanis. Pada motor DC, kumparan medannya disebut stator (bagian yang tidak berputar), sedangkan kumparan armatur disebut rotor (bagian yang berputar). Sesuai namanya, motor ini menggunakan arus searah dengan satu arah tetap. Motor DC terdiri dari tiga komponen utama yang berputar, yaitu:

- Kutub Medan (Field Pole)
 Motor DC sederhana memiliki dua kutub eksitasi, yaitu kutub utara dan selatan. Garis-garis gaya magnet mengalir dari kutub utara ke kutub selatan melalui ruang udara di antara keduanya. Untuk motor yang lebih besar atau kompleks, biasanya digunakan satu atau lebih elektromagnet. Elektromagnet Berarus atau
- Dinamo
 Dinamo berbentuk silinder dan terhubung ke poros penggerak untuk memutar beban. Pada motor DC kecil, armatur berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub medan, hingga kutub utara dan selatan bertukar posisi.
- Komutator
 Komponen ini khusus terdapat pada motor DC, dan berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dari sumber daya ke armatur secara bergantian sesuai dengan arah putaran.



Gambar 5. Motor DC

Gambar 5 menunjukkan bagian dalam dari motor DC yang digunakan sebagai aktuatur dalam sistem pengereng biji kopi. Motor ini terdiri dari stator (bagian tetap) yang menghasilkan medan magnet dan rotor (bagian berputar) tempat arus listrik mengalir untuk menghasilkan gerakan. Komponen lain seperti komutator dan sikat karbon berfungsi untuk mengalirkan arus secara bergantian sehingga motor dapat berputar terus-menerus. Motor DC ini diatur posisinya menggunakan sistem kontrol PID dan LQR agar dapat mengikuti arah sinar matahari secara optimal selama proses pengerengan.

2.4 LDR

LDR (Light Dependent Resistor) atau yang dikenal di kalangan elektronika sebagai resistor peka cahaya, merupakan jenis resistor yang nilai resistansinya berubah sesuai dengan intensitas cahaya yang diterima. LDR banyak digunakan sebagai fotodetektor atau alat pengukur konversi cahaya. Komponen ini terdiri dari cakram semikonduktor dengan dua elektroda di permukaannya. Dalam kondisi gelap atau pencahayaan redup, material pada cakram hanya menghasilkan sedikit elektron bebas, sehingga jumlah pembawa muatan menjadi sangat terbatas. Akibatnya, LDR bersifat sebagai konduktor yang buruk dalam keadaan gelap, atau dapat dikatakan bahwa resistansi LDR menjadi sangat tinggi saat tidak terkena cahaya.

2.5 Metode alur kerja

1. Studi Literatur

Penulis mengkaji literatur dari jurnal, buku teks, dan sumber ilmiah lainnya yang membahas teori kontrol PID, kontrol optimal LQR, pemodelan motor DC, serta implementasi sensor LDR. Kajian ini digunakan untuk membentuk dasar teoritis dalam merancang sistem pengendali dan model simulasi alat.

2. Perancangan dan Pengenalan Sistem

Pada tahap ini dilakukan perancangan konsep alat pengering biji kopi yang akan disimulasikan. Alat dirancang untuk dapat mengikuti arah matahari melalui aktuator motor DC dan sensor cahaya LDR. Meskipun alat tidak dibuat secara fisik, sistem pengontrolnya disimulasikan seolah diterapkan pada alat nyata, dengan fokus pada pengendalian posisi motor dan stabilitas sistem.

3. Pemodelan Sistem Motor DC

Model matematis dari sistem motor DC disusun berdasarkan hukum Kirchhoff untuk sirkuit kelistrikan dan hukum Newton II untuk dinamika rotasi. Persamaan diferensial yang dihasilkan kemudian dikonversi ke dalam bentuk ruang keadaan (state-space) yang akan digunakan dalam desain kontrol LQR. Model ini juga digunakan untuk implementasi kontrol PID secara numerik.

4. Penentuan Parameter Kontrol

- Untuk kontrol PID, digunakan metode Ziegler-Nichols I dan II untuk menentukan parameter K_p , K_i , dan K_d melalui pendekatan kurva respon sistem.
- Untuk kontrol LQR, ditentukan nilai matriks bobot Q dan R yang memengaruhi performa kontrol optimal. Penyesuaian parameter dilakukan melalui trial and error berbasis simulasi hingga diperoleh respon sistem yang optimal.

5. Simulasi Sistem

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB/Simulink atau tools sejenis. Dalam simulasi ini, sistem menerima input berupa perubahan intensitas cahaya (sebagai sinyal dari LDR), kemudian menghasilkan sinyal kontrol untuk menggerakkan motor DC sehingga posisi alat menyesuaikan arah sinar matahari. Simulasi juga memperlihatkan bagaimana suhu dapat dipertahankan sesuai dengan profil pengeringan.

6. Analisis dan Evaluasi Hasil Simulasi

Hasil simulasi dievaluasi berdasarkan beberapa parameter: respons sistem terhadap setpoint (sudut posisi), stabilitas suhu, overshoot, waktu naik (rise time), serta efisiensi penggunaan kontrol. Dibandingkan juga kinerja antara sistem dengan kontrol PID dan kontrol LQR.

7. Kesimpulan

Kesimpulan diambil berdasarkan performa masing-masing kontrol pada model simulasi alat pengering biji kopi. Simulasi ini memberikan gambaran seberapa efektif kedua metode kontrol dalam menjaga posisi alat dan kestabilan suhu dalam sistem pengeringan berbasis pelacakan matahari.

2.6 Analisis Perhitungan

1. Sistem Kelistrikan dengan Hukum

Kirchhoff

$\sum V = 0$	(4)
$V - Ri + Li + e = 0$	(5)
$Li = V - Ri - e$	(6)

Dimana,

$$e = Ke\dot{\theta} \quad (7)$$

Jadi,

$$Li = V - Ke\dot{\theta} - Ri \quad (8)$$

$i = \frac{V}{L} - \frac{Ke}{L} \dot{\theta} - \frac{R}{L} i$	(9)
---	-----

2. Motor DC berbasis Hukum Newton

$J\ddot{\theta} = T - d$	(10)
--------------------------	------

Dimana,

$T = Kt i$	(11)
------------	------

$d = b\dot{\theta}$	(12)
---------------------	------

Jadi,

$J\ddot{\theta} = Kt i - b\dot{\theta}$	(13)
---	------

$\ddot{\theta} = \frac{Kt}{J} i - \frac{b}{J} \dot{\theta}$	(14)
---	------

3. Ruang Keadaan – Variabel Keadaan

X 1 = θ

X 2 = θ'

X 3 = i

Tegangan (V)

$\dot{x}_1 = \theta' = x_2$	(15)
-----------------------------	------

$\dot{x}_2 = \theta'' = \frac{Kt}{L} i - \frac{b}{L} \theta' = \frac{Kt}{L} x_3 - \frac{b}{L} x_2$	(16)
--	------

$\dot{x}_3 = i' = \frac{V}{L} - \frac{Ke}{L} \theta' - \frac{R}{L} i = \frac{1}{L} V - \frac{Ke}{L} x_2 - \frac{R}{L} x_3$	(17)
--	------

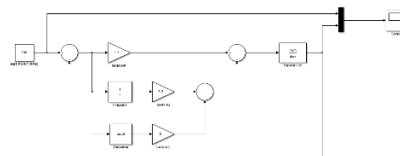
$\begin{vmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_2 & \dot{x}_3 \\ x_1 & x_2 & x_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{b}{L} & \frac{Kt}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} \end{vmatrix} v$	(18)
--	------

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil PID

$(s) = \frac{\omega(s)}{Ea(s)} = \frac{K}{(LaS+Ra)(Js+B)+KbK}$	(19)
--	------

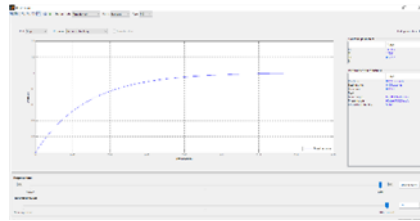
1. PID Control Simulink



Gambar 6. Rangkaian Simulink

Gambar 6 menunjukkan rangkaian simulasi kontrol PID pada lingkungan Simulink. Sinyal input diberikan sebagai referensi dan dibandingkan dengan keluaran sistem untuk menghasilkan error. Error ini kemudian diproses oleh blok PID untuk menghasilkan sinyal kontrol guna mengatur respons sistem. Output sistem dipantau menggunakan scope untuk mengevaluasi kestabilan dan performa kontrol.

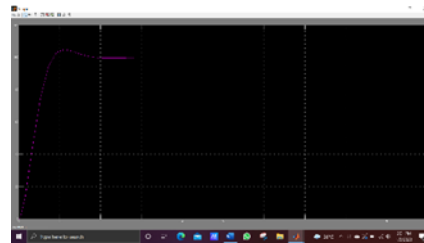
2. Proses Penyetelan PID



Gambar 7. Grafik Proses Penyetelan PID

Gambar 7 menunjukkan grafik proses tuning kontrol PID yang dilakukan menggunakan fitur auto-tuning pada Simulink. Kurva biru menggambarkan respons sistem terhadap masukan, yang menunjukkan kecenderungan sistem untuk mencapai kestabilan. Proses tuning ini bertujuan untuk menyesuaikan nilai K_p , K_i , dan K_d agar sistem memiliki waktu naik cepat, overshoot minimal, dan error steady state rendah. Dari hasil tuning tersebut diperoleh parameter PID yang optimal untuk diterapkan pada sistem motor DC dalam proyek pengering biji kopi.

3. Proses Simulasi



Gambar 8. Grafik Hasil Simulasi PID

Gambar di atas memperlihatkan hasil simulasi sistem kontrol PID dalam bentuk grafik respons terhadap sinyal masukan. Kurva menunjukkan bahwa sistem mengalami kenaikan tajam (rise) di awal, disertai sedikit overshoot sebelum mencapai keadaan stabil. Titik stabil tercapai sekitar waktu 1,8 detik, menandakan bahwa parameter PID telah diatur dengan baik. Grafik ini membuktikan bahwa sistem berhasil dikendalikan dengan respons yang cepat dan stabil menggunakan konfigurasi PID yang telah dituning sebelumnya.

LQR System

Parameter

$$r = 3$$

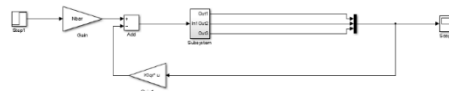
$$L = 3$$

$$B = 0.1$$

$$K = 0.1$$

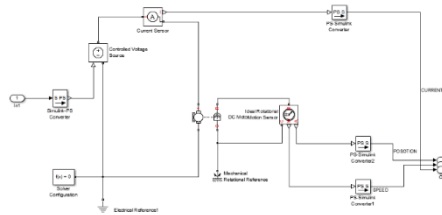
$$J = 0.1$$

4. PID Control Simulink



Gambar 9. Rangkaian Simulink LQR 2

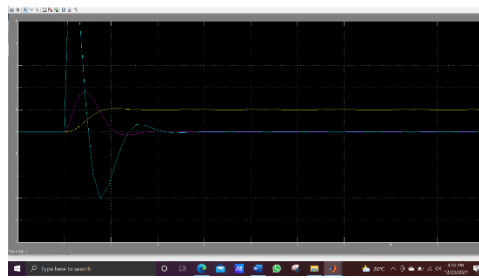
Gambar 9 menunjukkan rangkaian simulasi pertama untuk pengendalian sistem menggunakan metode LQR (Linear Quadratic Regulator). Sinyal input dimasukkan ke dalam sistem, kemudian dikalikan dengan gain hasil perhitungan LQR untuk menghasilkan sinyal kontrol optimal. Subsystem di tengah rangkaian merepresentasikan model matematika dari sistem motor DC yang dikendalikan. Output dari sistem diumpan balik ke pengontrol untuk menjaga kestabilan dan meminimalkan kesalahan terhadap referensi.



Gambar 10. Rangkaian Simulasi Kontrol

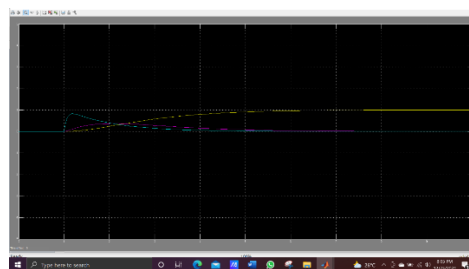
Gambar 10 menampilkan rangkaian simulasi kontrol LQR yang lebih kompleks dengan integrasi DC motor dalam sistem mekanik. Sinyal referensi posisi diolah melalui pengontrol dan diumpungkan ke modulasi DC untuk menggerakkan motor. Sensor arus dan posisi digunakan sebagai umpan balik yang memungkinkan sistem melakukan koreksi berdasarkan nilai aktual. Tujuan dari rangkaian ini adalah memastikan motor beroperasi stabil, presisi, dan sesuai dengan referensi menggunakan pendekatan kontrol optimal LQR.

3.2 Simulasi



Gambar 11. Grafik hasil dari simulasi LQR 1

Gambar 11 memperlihatkan grafik biru hasil simulasi LQR 1, yang menunjukkan respons sistem terhadap input referensi. Terlihat bahwa sistem sempat mengalami overshoot dan osilasi pada awal waktu, namun kemudian segera stabil. Kurva menunjukkan bahwa kontrol LQR mampu menekan kesalahan dalam waktu singkat dengan tingkat kestabilan yang baik. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan matriks Q dan R dalam sistem sudah cukup efektif untuk mencapai performa optimal.



Gambar 12. Grafik hasil dari simulasi LQR 2

Gambar 12 menunjukkan hasil simulasi sistem kontrol LQR 2 dengan respons warna biru yang lebih halus dan cepat dibandingkan simulasi sebelumnya. Kurva pada grafik menunjukkan bahwa sistem mencapai kestabilan dalam waktu kurang dari 2 detik dengan minim osilasi. Hal ini menunjukkan bahwa tuning parameter pada LQR sudah optimal dan mampu menyesuaikan dinamika sistem dengan baik. Dengan respons yang cepat dan minim error, kontrol LQR 2 lebih efektif dalam mengendalikan posisi motor DC sesuai dengan referensi.

3.3 Diskusi

Penelitian ini dilakukan dalam bentuk simulasi untuk menguji kinerja metode kontrol PID dan LQR dalam mengatur posisi motor DC pada alat pelacak matahari sistem pengering biji kopi. Kinerja alat akan membantu petani dalam menyesuaikan arah biji kopi ke arah sinar matahari. Pada metode PID, hasil tuning menghasilkan parameter $K_p = 14,9325$, $K_i = 1,7561$, dan $K_d = 0,17727$. Sistem mampu mencapai setpoint dengan waktu respons sebesar 0,0545 detik dan menunjukkan perilaku transien yang baik dengan overshoot sebesar 0,9. Berdasarkan Gambar 8, kestabilan tercapai dalam waktu sekitar 1,8 detik.

Pada metode LQR, kinerja diuji dengan beberapa konfigurasi matriks Q. Gambar 12 menunjukkan bahwa dengan $Q = [1000 \ 0 \ 0; 0 \ 10 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$, sistem mencapai kestabilan dalam waktu kurang dari 2 detik. Sedangkan pada Gambar 11, dengan $Q = [10 \ 0 \ 0; 0 \ 1000 \ 0; 0 \ 0 \ 10]$, sistem tetap stabil namun waktu penyelesaian meningkat menjadi kurang dari 6 detik.

Hasil ini menunjukkan bahwa metode PID memberikan respons awal yang sangat cepat, sedangkan metode LQR menawarkan kestabilan yang lebih halus tergantung pada konfigurasi bobot yang digunakan.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, sistem kontrol PID menunjukkan performa yang stabil dengan waktu pencapaian setpoint sebesar 1,8 detik menggunakan parameter optimal $K_p = 14,9325$, $K_i = 1,7561$, dan $K_d = 0,17727$. Sementara itu, sistem kontrol LQR menghasilkan respons yang lebih optimal dengan kestabilan lebih cepat, yaitu kurang dari 2 detik, saat menggunakan matriks $Q = [1000 \ 0 \ 0; 0 \ 10 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$.

Penerapan kedua metode ini pada sistem pengering biji kopi berbasis pelacakan cahaya membuktikan efektivitasnya dalam menjaga posisi optimal alat terhadap arah sinar matahari secara otomatis. Hal ini berkontribusi langsung terhadap efisiensi proses pengeringan biji kopi, karena suhu dan arah cahaya dapat dikontrol lebih presisi.

Untuk pengembangan ke depan, sistem ini dapat diintegrasikan dengan sensor tambahan seperti suhu dan kelembapan agar kontrol pengeringan lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan. Selain itu, implementasi nyata dari hasil simulasi ini perlu dilakukan untuk menguji keandalan kontrol di kondisi lapangan yang sesungguhnya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa serta menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan makalah ini. Penulis juga memohon maaf apabila masih terdapat kekurangan dalam penulisan, dan berharap karya ini dapat menjadi pembelajaran untuk penyusunan karya ilmiah selanjutnya.

Daftar Pustaka

- Subiono. 2013. Sistem Linear dan Kontrol Optimal. Surabaya: ITS.
- Darmawan, Aria, "Perancangan Embedded Kontroler LQR Adaptive Menggunakan Mikrokontroler untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC", Tugas Akhir, JTE-ITS, Surabaya, 2011.
- Haj, Muhammad Izzul, et al. "Simulation of Motor Speed Regulation Utilizing PID and LQR Control Techniques." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 2.1 (2025): 41-49.
- Pradana, Muhammad Handy Wahyu. "Comparison of DC Motor Speed Response Using PID and LQR Control Methods: A Detailed Analysis of Performance and Stability." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.1 (2024): 1-7.
- Framuja, M. Alief, Fortunaviaza Habib Ainudin, and Anggara Trisna Nugraha. "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): 1-12.
- Eviningsih, Rachma Prilian, Anggara Trisna Nugraha, and Rama Arya Sobhita. "Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Circuits on DC Motor BN12 Control." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1 (2025): 10-19.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 14-25.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." SAINSTECH NUSANTARA 2.2 (2025): 1-13.
- Rohman, Yulian Fatkur, and Anggara Trisna Nugraha. "DC Motor Analysis 42D29Y401 for System Optimization through LQR and LQT Approaches." Conference of Electrical, Marine and Its Application. Vol. 3. No. 1. 2024.
- Nugraha, Anggara Trisna, Rizki Abdi Pradana, and Muhammad Jafar Shiddiq. "Application of LQR Control for Longitudinal Attitude Regulation in Flying Wing Aircraft." Journal of Electrical, Marine and Its Application 2.2 (2024): 1-6.
- Ainudin, Fortunaviaza Habib, and Anggara Trisna Nugraha. "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): 1-7.
- Juniani, Anda Iviana, et al. "Enhancing Water Quality Prediction using the Decision Tree Approach with the C4.5 Algorithm." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science) 8.1 (2025): 17-30.

- Satrianata, Lugas Jagad, et al. "Implementasi Sistem Filtrasi Air Alami Terintegrasi Sensor TDS dan ESP32 Untuk Pemenuhan Baku Mutu Air Kelas." *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri* 11.3 (2024): 690-699.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "MONITORING AIR QUALITY PARAMETERS (NO, NO2, O3) AT SURABAYA CITY STATIONS." *Jurnal Cakrawala Maritim* 7.1 (2024): 52-59.
- Nugraha, Anggara Trisna, and Chusnia Febrianti. "Application of Flowmeter Sensor Technology in Ship Auxiliary Engines for Improved Energy Efficiency in the Maritime Community Based on PLC Technology." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2 (2024): 1-7.
- Nugraha, Anggara Trisna, et al. "Case Studies of Successful Energy Management Initiatives." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Springer, Singapore, 2025. 211-228.
- Nugraha, Anggara Trisna, and Chusnia Febrianti. "Prototype of Ship Fuel Monitoring System Using NodeMCU." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.1 (2024): 1-9.
- Nugraha, Anggara Trisna, and Moh Ghafirul Pratama Aprilian Sugianto. "Development of a Monitoring System for Daily Fuel Tank Levels on Ships." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.1 (2024): 1-9.
- Nugraha, Anggara Trisna, Oktavinna Dwi Pratiwi, and Annas Singgih Setiyoko. "SIMULASI GANGGUAN SAAT TERJADI GANGGUAN UNDERVOLTAGE DAN UNBALANCE LOAD PADA SUB-SUB DISTRIBUSI PANEL." *MEDIA ELEKTRIKA* 16.2 (2024): 162-173.
- Setiawan, Edy, et al. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using Digital Transformation*. Springer, Singapore, 2025. 185-210.