

IMPLEMENTASI SISTEM KONTROL LINEAR QUADRATIC REGULAR PADA ROBOT BERODA DUA

¹Steve Arthur Sehang, ²Try Kuntoro Priyambodo

¹Politeknik Negeri Nusa Utara, Sangihe, Sulawesi Utara

²Universitas Gadjah Mada - Indonesia
stevesehang@gmail.com

Abstrak: Perkembangan teknologi robot beroda dua saat ini semakin berkembang selain mendukung perkembangan pasar juga untuk memenuhi penelitian-penelitian dalam meningkatkan kegunaan robot yang lebih baik lagi. pada dasarnya robot beroda dua berawal dari penelitian tentang pendulum terbalik, berbagai macam penelitian tentang kontrol optimal yang digunakan pada pendulum terbalik, antara lain kontrol optimal yang digunakan yaitu: Linear Quadratic Gaussian, Linear Quadratic Regulator, dan Tracking problem. Dari ketiga kontrol optimal tersebut memiliki keunggulan masing-masing dalam mendapatkan hasil yang akan di cari, tapi pada dasarnya tujuan utama dari optimal kontrol yaitu mendapatkan nilai kontrol optimal yang sesuai dan di harapkan sesuai penelitian yang akan dilakukan. Penelitian ini menganalisis bobot robot beroda dua dengan menggunakan kontrol optimal linear quadratic regulator dan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan, hasil yang akan di cari dengan menggunakan linear quadratic regulator yaitu mendapatkan nilai feedback K yang nantinya akan diterapkan pada robot beroda dua, dan penelitian ini menggunakan aplikasi matlab, sebagai aplikasi pendukung dalam pencarian hasil feedback K dengan menggunakan linear quadratic regulator.

Kata Kunci: Linear Quadratic Regulator, robot beroda dua, pendulum terbalik

1. PENDAHULUAN

Pendulum terbalik adalah sebuah pendulum (bandul) dimana pusat massanya berada di atas titik tumpunya. Seringkali pendulum ini diimplementasikan pada sebuah robot yang dapat bergerak secara horizontal dan biasanya juga disebut sebagai sebuah robot-galah. Secara umum sebuah pendulum akan stabil ketika digantung menghadap ke bawah, namun untuk pendulum terbalik ini bersifat tidak stabil sehingga harus selalu diseimbangkan secara aktif agar tetap terjaga posisinya. [1]

Permasalahan kestabilan terdapat pada sistem pendulum terbalik dapat diatasi dengan *Linear Quadratic Regulator (LQR)*, *Linear Quadratic Regulator* merupakan sebuah kontrol optimal yang banyak diterapkan diberbagai bidang antara lain

robotika, industri, medis dan sebagainya. Hal ini disebabkan karena *Linear Quadratic Regulator* merupakan sistem kontrol yang dapat menjamin kestabilan dengan respon yang cepat setelah dilakukan penentuan parameter yang digunakan [2]

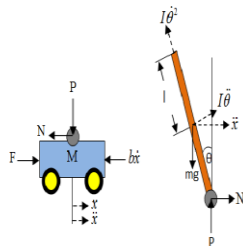
Sejauh ini beberapa peneliti yang menerapkan sistem kendali *Linear Quadratic Regulator* masih terbatas dan pada simulasi tersebut pengujian tidak didukung oleh data yang didapatkan pada keadaan fisik robot sesungguhnya, sehingga hasil yang didapatkan tidak sesuai dengan yang diterapkan. Salah satu contohnya adalah kesalahan pada tenggap waktu (*time respon*) yang terlalu lambat. Untuk itu didalam melakukan simulasi diperlukan pendekatan sesungguhnya sebelum diterapkan pada fisik robot secara nyata. [3]

Penelitian ini difokuskan pada pengendalian sistem pendulum terbalik menggunakan *Linear Quadratic Regulator* untuk sistem robot beroda dua, dengan cara mensimulasikan kendali tersebut dengan menggunakan pendekatan data fisik robot yang sesungguhnya dan kemudian hasilnya diimplemmentasikan kedalam sistem robot beroda dua tersebut. Adapun parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah data bobot robot yaitu berupa alas robot, panjang pendulum dan berat pendulum. Parameter ini kemudian digunakan diolah menggunakan *State Space* sehingga hasil *Feedback K* yang selanjutnya dimasukkan kedalam aplikasi arduino untuk di terapkan pada robot beroda dua.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pendulum Terbalik

Pendulum terbalik adalah input tunggal dan beberapa *output*, nonlinier dan sistem yang tidak stabil ketika menjadi sistem loop. Secara umum sistem pendulum terbalik memiliki beberapa jenis, misalnya bandul tunggal, pendulum ganda, pendulum bergerak dan ayunan pendulum up. Setiap jenis memiliki pendekatan yang berbeda untuk menyeimbangkan pendulum[4] seperti yang dilihat pada gambar 1

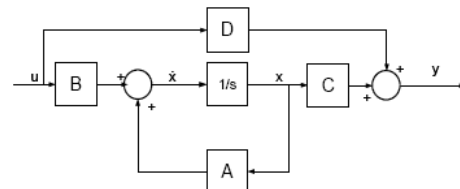


Gambar 1 Pendulum terbalik

Karena pendulum terbalik dalam situasi tegak, secara alami mudah jatuh ke bawah karena gravitasi. Dengan demikian sistem pendulum terbalik secara inheren tidak stabil. Dalam sistem 2-dimensi, untuk menstabilkan sistem itu dapat dilakukan baik osilasi vertikal atau horisontal dengan frekuensi tertentu. Sedangkan untuk 3-Dimensi, sebuah lengan rotasi atau lengan robot bebas digunakan. Tambahan untuk algoritma kontroler menggunakan sistem umpan balik yang digunakan untuk menjaga pendulum tegak

2.2 Persamaan State Space

Persamaan ruang keadaan (*state-space equation*) dari sistem dinamik mengandung tiga hal, yaitu variabel input (*input variable*), variabel output (*output variable*) dan variabel keadaan (*state variable*). Persamaan ruang keadaan dari suatu sistem dapat bervariasi, sesuai dengan definisi awal dari variabel-variabel dari suatu sistem. Untuk blok diagram persamaan state space dapat dilihat pada gambar 2



Gambar 2 Blok diagram State Space

2.2.1 Kontrol Optimal

Dalam beberapa proses, variabel yang dikontrol akan mengalami deviasi karena adanya gangguan. Regulator kontrol dirancang untuk melakukan kompensasi terhadap gangguan.

Linear Quadratic Control merupakan salah satu metode dalam perancangan sistem kontrol optimal. *Plant* diasumsikan bersifat sistem linear, dalam bentuk persamaan keadaan, dan fungsi obyektif adalah fungsi kuadrat dari keadaan *plant* dan sinyal input kendali. Kelebihan penggunaan formulasi *Linear Quadratic* adalah pada kemudahan analisa dan pengimplementasiannya. Beberapa masalah yang biasa diselesaikan dengan metode ini adalah masalah minimasi waktu, dan lain-lain [7].

2.2.2 Linear Quadratic Regulator

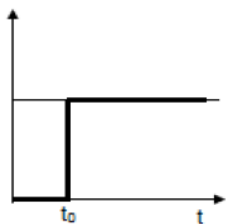
[8]Metode optimasi dengan *linear quadratic regulator* adalah dengan menentukan sinyal masukan yang akan memindahkan suatu *state* sistem linear dari kondisi $x(t_0)$ menuju ke suatu kondisi akhir $x(t)$ yang akan meminimumkan suatu indeks untuk kerja performansi kuadrat. *Cost function* yang dimaksud adalah waktu integral dari bentuk kuadrat pada vektor keadaan (*state*) x dan u seperti pada persamaan berikut :

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

Dimana Q adalah faktor pembobotan *state* (matriks semi definit positif) dan R adalah bobot faktor *variable kontrol* (matriks definit positif). Dengan persamaan seperti diatas, variasi parameter dari masalah perancangan LQR dapat ditentukan, juga untuk kondisi akhir yang mungkin dapat berpengaruh pada *cost function*.

2.4 Karakteristik Respon

Karakteristik respon adalah ciri-ciri khusus perilaku respon dinamik (spesifikasi performansi) output sistem yang muncul akibat diberikannya suatu sinyal masukan tertentu yang khas bentuknya (disebut sebagai sinyal uji). Sinyal uji merupakan sinyal masukan uji (*test input sinyal*) yang biasa digunakan adalah fungsi tangga, fungsi "ramp", fungsi percepatan, fungsi impuls, fungsi sinusoida dan sebagainya. Dengan sinyal uji ini dapat dilakukan analisis matematika dan eksperimental sistem kontrol secara mudah karena sinyal-sinyal ini merupakan fungsi waktu yang sangat sederhana. Jenis sinyal masukan yang akan digunakan untuk menganalisis karakteristik sistem di antara sinyal-sinyal masukan khas ini, dapat ditentukan dari bentuk masukan yang paling sering akan diberikan ke sistem pada operasi normal.



Gambar 3 Grafik Fungsi step

Penggunaan sinyal uji memungkinkan kita untuk membandingkan kinerja semua sistem dengan basis yang sama. Gambar 3 memberikan Gambaran contoh sinyal uji fungsi *step*

2.5 Rancangan Sistem

[10]Rancangan penelitian dibutuhkan untuk menjabarkan apa saja yang akan dilakukan selama penelitian. Dalam melakukan pengujian, rancangan penelitian

yang telah dipersiapkan akan menjadi pedoman dalam proses penelitian nantinya. Setelah sistem dipersiapkan maka langkah selanjutnya adalah menentukan parameter pengujian Linear Quadratic Regulator apa saja yang akan digunakan, kemudian membuat skenario atau rencana pengujian untuk kemudian dilanjutkan dengan pengujian.

Pernyataan matematis hubungan antara masukan terhadap keluaran atau dikatakan sebagai fungsi alih $G(s) = C(s)/R(s)$, dengan $R(s)$ adalah masukan dan $C(s)$ adalah keluaran. Dalam memperoleh keluaran dari sistem tergantung pada sinyal masukan $R(s)$. Untuk beberapa tipe sinyal masukan bentuk dari $R(s)$ seperti pada Tabel 1

Tabel 1 sinyal uji

No	Sinyal Uji	R(s)
1	Impluse	1
2	Step	$\frac{1}{s}$
3	Ramp	$\frac{1}{s^2}$
4	Sinusoidal	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$

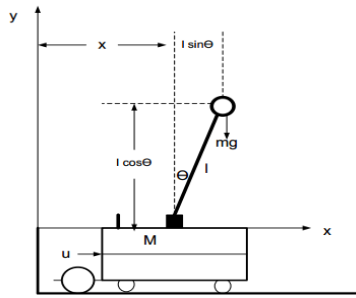
2.5.1 Analisa sistem

Dalam penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan *Feedback K* agar dicapai kestabilan pada sistem pendulum terbalik pada robot beroda dua. Untuk mendapatkan *feedback K* maka diperlukan sistem kendali yang bertujuan mendapatkan gain kontrol untuk pengontrolan optimal. Untuk membuat sistem dapat teranalisa, maka di buat beberapa tahap. Pertama sistem dibuat dalam bentuk persamaan keadaan dilakukan pemeriksaan apakah sistem memenuhi syarat keteramatan dan kekontrolan. Jika tidak, maka berarti sistem tidak dapat dikontrol. Jika ya, maka proses dapat dilanjutkan. Kedua, tentukan matriks bobot Q dan R . Penentuan matriks bobot Q dan R ini dilakukan dengan memperhatikan pengaruh masing-masing komponen Q dan R terhadap sistem.

2.5.2 Rancangan pemodelan sistem

Pendulum terbalik dengan robot beroda dua merupakan robot memiliki roda disisi kanan dan kirinya yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya pengendali. Pendulum terbalik dengan robot beroda dua ini merupakan pengembangan dari model

pendulum terbalik yang diletakkan diatas robot beroda. Gambar 4.adalah sebuah



contoh dari *balancing* robot. Dalam kasus ini, robot yang dilengkapi motor hanya dapat bergerak garis lurus (horizontal), dan pendulum yang diletakkan di atas robot bergerak (berotasi) dalam bidang yang sama.

Gambar 4 pendulum terbalik pada robot beroda dua

Gambar 4 menunjukkan desain dari sebuah pendulum terbalik pada robot beroda dua, dimana;

θ : sudut antara pendulum dengan garis vertikal.

M : berat kereta (kg).

m : berat pendulum (kg).

$\dot{\theta}$: kecepatan sudut

$\ddot{\theta}$: percepatan sudut

x : kecepatan benda

\dot{x} : percepatan benda

I : momen inersia.

b : koefisien dari gaya gesek (viscount friction) antara kereta dengan lantai.

V : gaya reaksi vertikal pada pendulum.

H : gaya reaksi horisontal pada pendulum.

u : gaya input yang diberikan pada kereta (N).

Berikut adalah asumsi-asumsi dalam memodelkan balancing robot yaitu pendulum homogen (rapat massa di setiap titik pada pendulum sama), sehingga I (momen inersia) = $\frac{1}{3}ml^2$ dan θ kecil ($\cos \theta \approx 1$ dan $\sin \theta \approx \theta$). Dan akan diturunkan model matematik untuk sistem balancing robot. Setelah mendapatkan model matematik sistem, akan dilakukan pengendalian terhadap sistem balancing robot. Penjumlahan gaya dari cart secara horisontal dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$(2)$$

$$\sum F_H = Ma$$

$$u - H - b\dot{x} = M\ddot{x} \quad (3)$$

$$u = M\ddot{x} + b\dot{x} + H \quad (4)$$

$$u = M\ddot{x} + b\dot{x} + H$$

Karena cart bergerak arah horisontal, maka penjumlahan gaya pada arah vertikal diabaikan. pada gambar 8 free body diagram dapat dibagi menjadi 2 yaitu free body diagram untuk cart dan free body diagram untuk pendulum. Dengan menjumlahkan gaya pada arah horisontal maka didapatkan persamaan gaya H.

$$H = m \frac{d^2}{dt^2} (x + l \sin \theta) \quad (5)$$

Dengan memperhatikan bahwa:

$$\frac{d}{dt} \sin \theta = -(\sin \theta) \dot{\theta}^2 + (\cos \theta) \ddot{\theta} \quad (6)$$

Maka persamaan menjadi:

$$H = m\ddot{x} - ml\dot{\theta} \sin \theta + ml\ddot{\theta} \cos \theta \quad (7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (4.6) ke persamaan (4.3) maka didapatkan persamaan gerak yaitu :

$$u = (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\dot{\theta} \sin \theta + ml\ddot{\theta} \cos \theta \quad (8)$$

Untuk mendapatkan persamaan gerak selanjutnya, maka gaya gaya yang tegak lurus dengan tiang pendulum dijumlahkan.

$$V \sin \theta + H \cos \theta - mg \sin \theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos \theta \quad (9)$$

Untuk mengeliminasi V dan H dari persamaan (4.8) maka momen yang ada disekitar pendulum di jumlahkan.

$$\sum \tau_{pend} = I\ddot{\theta} \quad (12)$$

$$-Vl \sin \theta - Hl \cos \theta = I\ddot{\theta} \quad (11)$$

Substitusikan persamaan (4.10) ke persamaan (4.8) maka akan didapatkan persamaan.

$$-I\ddot{\theta} - mg \sin \theta = ml^2 \ddot{\theta} + ml \ddot{x} \cos \theta$$

$$(I + ml^2) \ddot{\theta} = -mgl \sin \theta - ml \ddot{x} \quad (13)$$

maka dapat dilihat dari persamaan (8) dan persamaan (9) adalah persamaan difrensial nonlinear. untuk menjaga agar pendulum terbalik pada robot beroda dua tetap vertikal atau dalam posisi tegak, maka dapat di asumsikan bahwa θ yang dihasilkan kecil sehingga $\cos \theta \approx 1$, $\sin \theta \approx 0$, dan $\theta\dot{\theta} \approx 0$. Kemudian persamaan (12) dan (13) dapat dilinearisasi sebagai berikut :

$$u = (M + m)\dot{x} + b\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \quad (14)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} = -mgl\theta - ml\ddot{x} \quad (15)$$

2.6 Respresentasi State Space

Robot pendulum beroda dua merupakan robot dengan sistem pendulum terbalik sehingga dibutuhkan sistem kendali optimal yang merempresentasikan modelnya kedalam bentuk *state space*. *Linear Quadratic Regulator* merupakan kendali yang mencari nilai gain matriks K pada sistem *state space* secara sistematik.

Misalkan vector

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \text{ dan } y = \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} \text{ sebagai output} \quad (16)$$

dari sistem.

Agar diperoleh persamaan *state space* linear untuk \ddot{x} persamaan (16) harus merupakan fungsi dari turunan yang lebih rendah saja. Untuk itu, $\ddot{\theta}$ harus di eliminasi dari persamaan (17), dan diperoleh : $(M + m)\ddot{x} = u - bx - ml \left(\frac{-mgl\theta - ml\ddot{x}}{(I + ml^2)} \right)$ (17)

Atau

$$\begin{aligned} (M + m)\ddot{x} &= u - bx + \frac{m^2 l^2 g}{(I + ml^2)} \theta + \frac{m^2 l^2}{I + ml^2} \ddot{x} \\ \ddot{x} &= \frac{(I + ml^2)u - b(I + ml^2)\dot{x} + m^2 l^2 g \theta}{I(M + m) + Mml^2} \\ \ddot{x} &= \frac{-b(I + ml^2)}{I(M + m) + Mml^2} \dot{x} \\ &\quad + \frac{m^2 l^2 g}{I(M + m) + Mml^2} \theta \\ &\quad + \frac{(I + ml^2)}{I(M + m) + Mml^2} u \end{aligned} \quad (18)$$

Persamaan berikut diperoleh dengan mengeliminasi \ddot{x} dari persamaan (18) untuk memperoleh persamaan *state space* linear untuk $\ddot{\theta}$.

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} = -mgl\theta - ml \left(\frac{u - b\dot{x}}{(M + m)} \right) \quad (14)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} = -mgl\theta - \frac{ml}{(M + m)} u + \frac{mlb}{(M + m)} \dot{x} + \frac{m^2 l^2}{(15)} \ddot{a}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-(M + m)mgl\theta - mlu + mlb \dot{x}}{I(M + m) + Mml^2}$$

$$\dot{x}_1 = x_2 = \dot{x} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = \ddot{x} &= \frac{-b(I + ml^2)}{I(M + m) + ml^2} \dot{x} \\ &\quad + \frac{m^2 l^2 g}{I(M + m) + Mml^2} \theta \\ &\quad + \frac{(I + ml^2)}{I(M + m) + Mml^2} u \end{aligned} \quad (16)$$

Berdasarkan pemisalan vektor x dan dari persamaan (18) dan (19), diperoleh :

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 = \dot{\theta} \\ \dot{x}_4 = \ddot{\theta} &= \frac{mlb}{I(M + m)Mml^2} \dot{x} - \frac{(M + m)mgl}{I(M + m)Mml^2} \theta - \frac{ml}{I(M + m) + Mml^2} u \end{aligned} \quad (20)$$

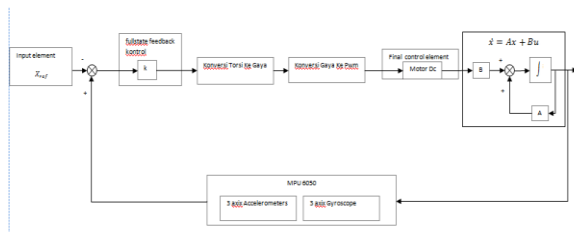
$$\dot{x} = Ax + B \quad y = Cx + Du$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= \frac{mlb}{I(M + m) + Mml^2} \dot{x} \\ &\quad - \frac{(M + m)mgl}{I(M + m) + Mml^2} \theta \\ &\quad - \frac{ml}{I(M + m) + ml^2} u \end{aligned}$$

Dalam bentuk *state space*, persamaan matematika dari sistem dibuat kedalam persamaan matriks.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (21)$$

$$y = Cx + Du \quad (22)$$



Gambar 5 Diagram blok kendali sistem pendulum terbalik pada robot beroda dua

Gambar 5 merupakan langkah awal untuk sistem kendali pendulum terbalik pada robot beroda dua yang menggunakan linear sistem untuk mendapatkan nilai u yang kemudian akan berpengaruh masukan untuk mendapatkan tujuan dari $state (x)$. Dengan keadaan matriks A sebagai matriks $state$ awal dan matriks B sebagai matriks u sebagai masukan. Namun untuk mendapatkan nilai u , maka dengan menggunakan persamaan

$$u = -Kx$$

Dengan menggunakan persamaan (21) dan (23) maka diperoleh persamaan

$$\dot{x} = (A - BK)x$$

Pada persamaan (4.24) menjelaskan bagaimana cara untuk mendapatkan nilai $feedback K$. Namun untuk mendapatkan respon sistem kendali pendulum yang lebih cepat, maka diperlukan persamaan $cost function$.

$$J = \int_0^{\infty} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \end{bmatrix} d \quad (25)$$

Dimana matriks Q berfungsi sebagai pengatur $state x$, dan R berfungsi pengatur nilai masukan u . Semakin besar nilai yang di masukan kedalam matriks Q sangat berpengaruh pada kecepatan respon pendulum untuk mencapai posisi tegak.

Untuk mendapatkan uji kekontrolan maka dibutuhkan persamaan sebagai berikut

$$[BAB \dots A^{n-1}B] \quad (26)$$

Dan untuk mendapatkan uji observability maka dibutuhkan persamaan sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^n \end{bmatrix} \quad (27)$$

2.7 Perangkat Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini digunakan beberapa peralatan yang mendukung berupa hardware dan software. Perangkat hardware dan software yang digunakan.

2.7.1 Hardware

Komputer dan mikrokontroler yang digunakan dalam penelitian ini dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Laptop :Compaq CQ (24)
- Processor :Pentium core cpu 2.20 GHz
- Memori : 4096 MB
- Operating sistem : windows 8.1 64 bit
- Mikrokontroler : Arduino Uno R3 smd
- Sensor accelerometer dan gyro MPU 6050
- Motor dc: PG45 motor series 60 W 700 Rpm 25 Kg

2.7.2 Software

- Arduino
- Matlab

2.8 Implementasi nilai Feedback K Ke Arduino

Implementasi dalam penelitian ini menjelaskan kerja pengukuran dan pengujian dari hasil $Feedback K$ yang didapatkan dari linear quadratic regulator untuk diterapkan pada robot beroda dua.

Untuk memasukan nilai $Feedback K$ yang telah didapat kedalam robot beroda dua, dibutuhkan aplikasi yang mendukung mikrokontroler yang akan digunakan, dalam penelitian ini. Aplikasi yang

digunakan sesuai dengan mikrokontroler yaitu menggunakan Arduino. Kode programnya diperlihatkan pada Gambar 5.

```

1 void setup() {
2   pinMode(encoder0PinA, INPUT);
3   digitalWrite(encoder0PinA, HIGH);
4   pinMode(encoder0PinB, INPUT);
5   digitalWrite(encoder0PinB, HIGH);
6   Serial.begin(9600);
7   Serial.println("Wheelee");
8   I2C_Init();
9   delay(1500);
10  Accel_Init();
11  Gyro_Init();
12  md.init();
13  attachInterrupt(1,doEncoder,CHANGE); // encoder pin on interrupt 1 -
    pin 3
14  timer=millis();
15  }
16  FloatK1=-16.5831,K2=-
    22.7034,K3=162.3658,K4=81.5417
    ;
17  long getLQRSpeed(float phi,float
    dphi,float angle,float dangle){
18  returnconstrain((phi*K1+dphi*K2+
    K3*angle+dangle*K4)*285,-
    400,400);
19  }
20  float lastPhi=0,dPhi=0;
21  float G_Dt=0.02;
    
```

Gambar 6 Kode program pengimplementasian *feedback K* ke robot

Gambar 6 adalah kode program implementasi *feedback K* pada arduino. Baris ke 16 merupakan kode program untuk memasukkan nilai *feedback K* yang didapat dari Linear Quadratic Regulator. Untuk keterangan nilai *feedback K* diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Keterangan Nilai *feedback K*

K1		K2 (Angle)		K3 (Velocity)		K4 (Angle Velocity)	
-8	-3	-30	-120	-1	-50	-3	-1
0	0			1			4
				2			

Sl	F	On	Resp	L	Sta	Tu	H
o	a	the	on	o	rt	rne	igh
w	st	verg	well	w	to	d	h
		e of	to	F	viol	off	Fr
		inst	distu	re	entl	by	e
		abili	rban	q	y	saf	q
		ty	ce			ety	

Pada Tabel 2, nilai *K* dimasukan dalam program robot beroda dengan tujuan berfungsi sebagai pengontrol *Feedback K* yang ada pada robot beroda dua. Setelah nilai optimal *K* dimasukan ke dalam program arduino yang ada dalam robot beroda dua dan mulai dijalankan untuk melihat reaksi robot beroda dua.

Nilai *Feedback K* yang didapat dari data-data robot beroda dua, yaitu berupa berat robot beroda dua, panjang pendulum dan berat pendulum, sangat berpengaruh dalam penentuan nilai *Feedback K*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan hasil pengujian *Feedback K* yang didapatkan dengan menggunakan matlab, dalam pengujian dalam penelitian dilakukan dengan cara melakukan tiga kali pengujian data bobot robot dengan maksud dapat membandingkan jenis bobot berdasarkan data-data robot, yang sesuai dengan hasil nilai *Feedback K* yang akan digunakan pada robot beroda dua.

3.1 Pengujian Linear Quadratic Regulator

Pada tahap ini semua bobot robot beroda dua yang ada dimasukan kedalam persamaan *State Space* dan nantinya akan dilanjutkan ke dalam persamaan *linear quadratic regulator*. Bobot robot yang ditampilkan pada jurnal ini merupakan bobot robot yang sudah di uji dan hasilnya dimasukan kedalam mikrokontroler.

$M = 1$ masa kereta(kg)

$m = 0.02$ masa pendulum(Kg)

$b = 0$ (n/m)

$I = 0.02$ berat tiang pendulum (kg)

$g = 9.804$ massa gravitasi(m/s²)

l = 0.50 panjang tiang pendulum(m)

Dengan menggunakan data tersebut persamaan (20) dapat di tuliskan sebagai berikut (24) dan (25):

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0386 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.9370 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x & 0 \\ \dot{x} & 0.9843 \\ \theta & 0 \\ \dot{\theta} & 0.3937 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + 0 \quad (25)$$

3.1.1 Uji Keterkontrolan (Controllability)

Persamaan (26) merupakan uji keterkontrolan dari sistem ini dapat dilihat dari rank dan singularity dan matriks controllability dan Berdasarkan matriks controllability dari sistem robot beroda dua ini berdasarkan persamaan diatas adalah:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.9843 & 0 & 0.0152 \\ 0.9843 & 0 & 0.0152 & 0 \\ 0 & 0.3937 & 0 & 1.5500 \\ 0.3937 & 0 & 1.5500 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

3.1.2 Uji Keteramatan (observability)

Uji keteramatan dari sistem ini juga dapat dilihat dari rank dan singularity dan matriks observability dilihat pada persamaan (27).

$$\begin{matrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^n \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0386 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0386 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Pengujian yang dilakukan diatas sampai pada tahap Kekontrolan dan keterobservasian, selanjutnya menggunakan Aplikasi Matlab untuk mendapatkan settling time nilai feedback K.

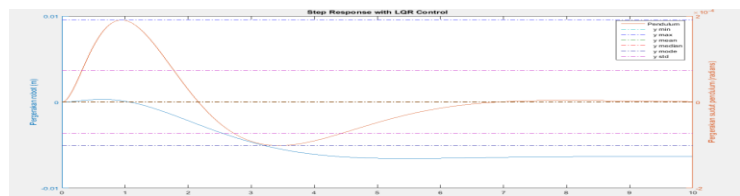
3.2 Penentuan Matriks bobot Q dan R

Matriks bobot adalah matriks Q dan R, pemilihan matriks Q dan R dapat dilakukan dengan cara coba-coba (*trial and error*). Dengan syarat, matriks Q adalah matriks simetri semidefinit positif dan real ($Q \geq 0$). Matriks Q merupakan matriks yang beroda 4x4.. untuk Q (1.1) dan Q (3.3) nilainya adalah 75 dan untuk R nilainya 10. Hasil penentuan matriks untuk bobot Q dan R diperlihatkan pada tabel

Pada hasil simulasi yang dilakukan pada bobot robot yang keempat menunjukkan posisi plot pendulum seperti yang ada pada Tabel 3 dengan penunjukan nilai maksimum yang di dapat 0.0019 dan nilai minimum -0.0001012 yang dapat dilihat pada Gambar 6.5. respon yang di dapat pada simulasi yang keempat merupakan respon yang stabil dengan respon awal menunjukkan hasil yang baik sedangkan respon minimumnya mendekati angka 0 yang terdekat.

Tabel 3 Nilai respon orde 1 bobot 4

No	Nilai masukan	Nilai x	Hasil	t_s5
1	0.0019	0.0001463	0.0013	0.020
2	0.0019	-0.001232	0.0001	0.020
3	0.0019	-7.234	-0.000263754	0.020
4	0.0019	-8.212	-0.000232343	0.020
5	0.0019	4.018	0.000474863	0.020
6	0.0019	1.482	0.001287449	0.020
7	0.0019	-2.996	-0.000636849	0.020
8	0.0019	-1.289	-0.001480217	0.020
9	0.0019	-2.39	-0.000798326	0.020
10	0.0019	-5.769	-0.000330733	0.020



Gambar 7 Step respon bobot robot 4

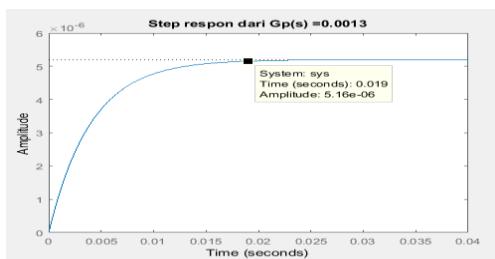
Gambar 7 merupakan simulasi yang keempat dan menghasilkan respon yang stabil dengan respon awal menunjukkan hasil yang baik sedangkan respon minimumnya mendekati angka 0 yang terdekat.

Tabel 4 Keterangan plot statistic bobot 4

No	Plot Y	Point
1	Max	0.0001908
2	Min	-0.0001012
3	Mean	-1.592
4	Median	1.129
5	Std	7.316

Pada hasil simulasi yang dilakukan pada bobot robot yang keempat menunjukkan posisi plot pendulum seperti yang ada pada Tabel 6.6 dengan penunjukan nilai maksimum yang di dapat 0.0019 dan nilai minimum -0.0001012

Pada Gambar 6.6 nilai gain K diambil dari hasil maksimal yang ada pada respon orde 1 pada bobot keempat yaitu 0.0019 dan dibagi dengan nilai 0.0013 (pers 3.23) dan dari hasil step respon didapat settling time t_s 5 mendekati 0.020 detik

**Gambar 8 Step respon plot**

Dari hasil plot yang didapatkan memiliki hasil yang stabil dikarenakan hasil yang didapat konstan dengan masukan yang ada, walaupun ada sedikit gangguan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang tentang sistem kendali keseimbangan sistem pendulum terbalik pada robot beroda dua pada bidang datar yang telah dilakukan menggunakan kendali LQR, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Pendulum mampu berada dalam posisi tegak atau vertical saat robot beroda dua diberikan gaya dorong kedepan atau ke belakang pada permukaan datar atau horisontal menggunakan konsep kendali LQR

2. Dengan menggunakan nilai Q dan R yang lebih tinggi sangat mempengaruhi sistem pendulum terbalik pada robot beroda dua.
3. Penentuan bobot robot yang sesuai sangat berpengaruh pada kestabilan robot beroda dua

5. SARAN

Adapun saran yang dapat disampaikan untuk penelitian selanjutnya

1. Penelitian selanjutnya sebaiknya dilakukan secara mengukur sampai pada *settling time* roda yang ada pada robot beroda dua sehingga setiap pergerakan yang ada pada robot bisa diketahui secara sempurna.
2. Perlu penelitian lebih lanjut ketika posisi robot beroda dua berada dalam kondisi jalan yang miring atau menanjak.

DAFTAR PUSTAKA

- J. Li, X. Gao, Q. Huang, Q. Du, and X. Duan, "Mechanical Design and Dynamic Modeling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot," *2007 IEEE Int. Conf. Autom. Logist.*, pp. 1614–1619, 2007.
- H. Gul, J. Ahmad, F. Gul, and M. Ilyas, "Modeling and Formal Verification of Inverted Pendulum Based Two-Wheeled Transportation Vehicle Research Centre for Modeling and Simulation (RCMS), National University of Sciences and Technology School of Electrical and Electronics Engineering (SEECS)," pp. 113–118, 2012.
- F. Ugm, "Balancing Robot Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral Derivatif," vol. 5, no. 1, pp. 89–98, 2015.
- E. Vinodh Kumar and J. Jerome, "Robust LQR controller design for stabilizing and trajectory tracking of inverted pendulum," *Procedia Eng.*, vol. 64, pp. 169–178, 2013.

- N. Singh and S. Yadav, "Comparison of LQR and PD controller for stabilizing Double Inverted Pendulum System," *Int. J. Eng.*, vol. 1, no. 12, pp. 69–74, 2012
- K. Peng, X. Ruan, and G. Zuo, "Dynamic model and balancing control for two-wheeled self-balancing mobile robot on the slopes," *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, no. 1, pp. 3681–3685, 2012.
- A. Poorhossein and A. Vahidian-Kamyad, "Design and implementation of Sugeno controller for inverted pendulum on a cart system," *SIISY 2010 - 8th IEEE Int. Symp. Intell. Syst. Informatics*, pp. 641–646, 2010.
- N. M. Abdul Ghani, D. Ju, H. Z. Othman, and M. A. Ahmad, "Two wheels mobile robot using optimal regulator control," *Proc. 2010 10th Int. Conf. Intell. Syst. Des. Appl. ISDA'10*, pp. 1066–1070, 2010.
- S. V. Radhamohan, A. Mona Subramaniam, and M. J. Nigam, "Fuzzy swing-up and stabilization of real inverted pendulum using single rulebase," *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 43–50, 2010.
- Q. Liu and K. He, "Optimal LQG Control and Stability of Networked Robot System with Data Dropout," pp. 2041–2046, 2006.