

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI METODE LQR (LINIEAR QUADRATIC REGULATOR) UNTUK SISTEM SUSPENSI AKTIF PADA MODEL $\frac{1}{2}$ SEPEDA MOTOR

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LQR (LINIEAR QUADRATIC REGULATOR) METHODS FOR ACTIVE SUSPENSION SYSTEM ON $\frac{1}{2}$ MOTORCYCLE MODEL

Ginjar Anugerah Wijaya¹, Sony Sumaryo², Porman Pangaribuan³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹ginjaraw@student.telkomuniversity.ac.id, ²sonysumaryo@telkomuniversity.ac.id,

³porpangrib@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Dalam hal mengendarai sepeda motor bukan hanya performa dan keamanan saja yang menjadi faktor penting, aspek kenyamanan dalam berkendara juga menjadi penting dikarenakan jalanan yang dilewati tidak selalu rata maka dari itu komponen suspensi dapat menunjang aspek kenyamanan serta mengurangi cedera pada pergelangan tangan, tulang ekor, serta pundak saat mengendarai sepeda motor.

Tujuan utama dari riset ini adalah membuat prototipe sistem suspensi kendaraan sepeda motor yang dapat menjaga *platform* kendaraan tetap stabil dengan bantuan metode kontrol LQR. Hasil yang diharapkan dari riset ini adalah untuk membandingkan performa sistem suspensi aktif dan pasif dalam menjaga kestabilan *platform* kendaraan dari *road disturbance*.

Pembobotan matriks Q dan R sangat berpengaruh untuk kestabilan, matriks Q berpengaruh pada parameter mana yang akan diberikan penalti jika tidak stabil, matriks R berpengaruh untuk cepat lambatnya respon aktuator. Hasil yang didapatkan dari pengujian simulasi *Rise Time* bertambah $\pm 13\%$, *Overshoot* berkurang $\pm 5\%$, *Settling Time* berkurang $\pm 78\%$, dan waktu mencapai kondisi *Steady State* berkurang $\pm 77\%$.

Hasil uji prototipe sistem *closed loop* juga menunjukkan hasil yang lebih baik, dibandingkan dengan sistem *Open loop*. Parameter uji seperti *Body Displacement* berkurang $\pm 68\%$, *Body Velocity* berkurang $\pm 25\%$, *Wheel Displacement* berkurang $\pm 70\%$, dan *Wheel Velocity* bertambah $\pm 16\%$.

Kata kunci: *suspensi aktif, LQR, model $\frac{1}{2}$ sepeda motor*

Abstract

In the case of motorcycle riding not only performance and safety are important factors, the comfort aspect of driving is also important because the roads are not always flat, therefore the suspension components must support the comfort aspects and reduce injuries to the wrists, spine, and shoulder while riding a motorcycle.

The main purpose of this research is to create a prototype motorcycle suspension system that can keep the vehicle platform stable with the help of LQR control method. The expected result of this research is to compare the performance of active and passive suspension systems in maintaining the stability of the vehicle platform from road disturbance.

The weight of the matrix Q and R is very influential for stability, the matrix Q has an effect on which parameters will be given a penalty if it is not stable, the matrix R influences response of the actuator. The results obtained from simulation showed that Rise Time increased by $\pm 13\%$, Overshoot decreased by $\pm 5\%$, Settling Time reduced by $\pm 78\%$, and the time to reach Steady State conditions decreased by $\pm 77\%$.

The results of the closed loop system prototype test, also showed better results compared to the Open loop system. Test parameters such as Body Displacement reduced by $\pm 68\%$, Body Velocity reduced by $\pm 25\%$, Wheel Displacement reduced by $\pm 70\%$, and Wheel Velocity increased by $\pm 16\%$.

Keywords : Active Suspension, LQR, $\frac{1}{2}$ Motorcycle Model

1. Pendahuluan

Salah satu fungsi utama suspensi dalam kendaraan sepeda motor adalah untuk menjaga ban tetap menyentuh permukaan jalan supaya traksi ban terjaga dan menjaga kestabilan kendaraan ketika berjalan di permukaan yang tidak rata dengan meredam getaran permukaan jalan saat kecepatan tinggi maupun rendah.

Suspensi yang biasa ditemukan di kendaraan sepeda motor biasanya tersusun dari per berbentuk kumparan (*coil over*) dan peredam (*shock absorber*), yang berfungsi untuk meredam getaran dengan menggunakan oli ataupun udara di dalam tabung.

Pada kendaraan bermotor beban yang berada di atas sistem suspensi disebut *sprung weight* dan yang berada di bawah sistem suspensi disebut *unsprung weight*. Ada baiknya rasio beban *sprung weight* lebih besar daripada *unsprung weight*, karena kendaraan akan lebih stabil jika melewati permukaan jalan yang tidak rata atau berlubang hal ini disebabkan beban kendaraan, pengendara serta penumpang dapat menekan ban agar tetap menyentuh permukaan jalan.

Jika beban *unsprung weight* lebih besar daripada *sprung weight* maka ada kemungkinan ban tidak menyentuh permukaan jalan saat melewati permukaan yang tidak rata atau berlubang hal ini dapat mempengaruhi pengendara untuk menstabilkan kendaraan.

Pada umumnya suspensi standar pabrikan kurang fleksibel alias tidak bisa di atur seberapa keras atau seberapa lembut pengaturan suspensi yang kita inginkan, untuk mengatasi masalah ini biasanya orang-orang membeli suspensi *after market* yang bisa di atur, namun proses ini memerlukan waktu juga untuk menemukan pengaturan yang pas karena berat pengendara serta kondisi jalan juga harus dipertimbangkan.

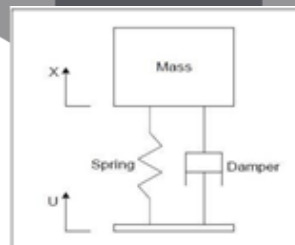
Dalam TA ini akan di sintesis ulang implementasi metode LQR ke suspensi aktif untuk membandingkan kinerja sistem suspensi dan akan diukur kinerjanya apakah nilai-nilai parameternya dapat dikategorikan berkualitas baik.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Tipe Sistem Suspensi

- **Suspensi Pasif**

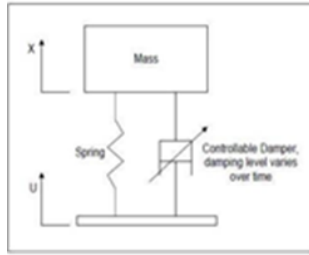
Pada dasarnya suspensi pasif terdiri dari per dan peredam (*damper*), sistem ini tidak dapat memberikan energi untuk mengontrol dinamika kendaraan. Sistem suspensi mempunyai batasan fisik dalam menentukan karakteristik dinamika kendaraan dengan menentukan kompromi yang sesuai dengan aplikasi kendaraan[3].



Gambar 2.1 Suspensi Pasif [3]

- **Suspensi Semi-Aktif**

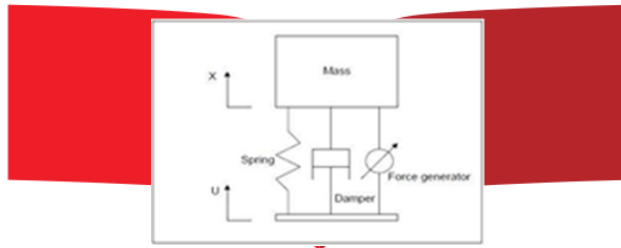
Sistem suspensi semi-aktif juga tidak dapat menambah energi pada sistem suspensi namun *damper* diganti dengan damper yang dapat dikendalikan dengan menyesuaikan koefisien redaman, kontroler menentukan tingkat redaman yang diinginkan sesuai dengan strategi kontrol yang digunakan [3].



Gambar 2.2 Suspensi Semi-Aktif [3]

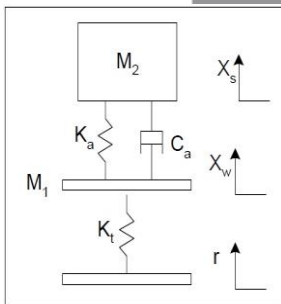
• **Suspensi Aktif**

Sistem suspensi aktif memiliki kemampuan untuk menambah atau mengurangi energi pada sistem suspensi untuk merespon perubahan vertikal pada permukaan jalan dengan mengintegrasikan damper dan per dengan gaya dari aktuator [3].

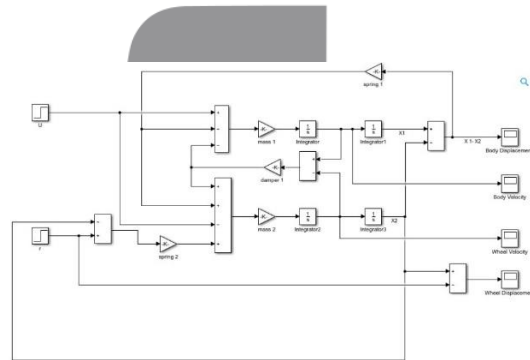


Gambar 2.3 Suspensi Aktif [3]

2.2. Pemodelan Sistem Suspensi Open Loop



Gambar II-4 Model Suspensi Pasif [3]



Gambar III-3 Model Simulasi Suspensi Pasif [2]

Gaya yang bekerja pada M1

$$F = M a \dots\dots\dots(2.1)$$

$$K_a (X_s - X_w) + C_a(\dot{X}_w - \dot{X}_s) - K_t(X_w - r) = M_1 \ddot{X}_w \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\ddot{X}_w = \frac{K_a (X_s - X_w) + C_a(\dot{X}_w - \dot{X}_s) - K_t(X_w - r)}{M_1} \dots\dots\dots(2.3)$$

Gaya yang bekerja pada M2

$$F = M a \dots\dots\dots(2.4)$$

$$-K_a (X_s - X_w) - C_a(\dot{X}_s - \dot{X}_w) = M_2 \ddot{X}_s \dots\dots\dots(2.5)$$

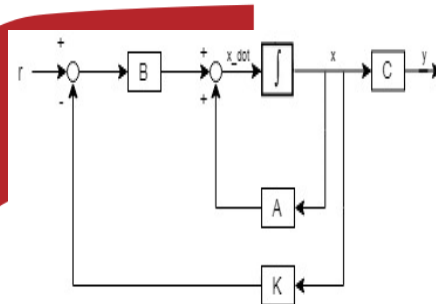
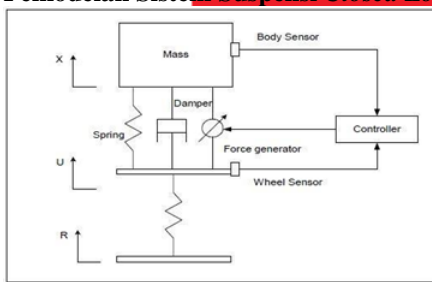
$$\ddot{X}_s = \frac{-K_a(X_s - X_w) - C_a(\dot{X}_s - \dot{X}_w)}{M_2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Inisialisasi variabel ruang keadaan

$$\begin{aligned}
 X_1 &= X_s - X_w \\
 \dot{X}_1 &= \dot{X}_s - \dot{X}_w \\
 X_2 &= X_w - r \\
 \dot{X}_2 &= \dot{X}_w - \dot{r} \\
 X_3 &= \dot{X}_s \\
 \dot{X}_3 &= \ddot{X}_s \\
 X_4 &= \dot{X}_w \\
 \dot{X}_4 &= \ddot{X}_w \dots\dots\dots(2.8)
 \end{aligned}$$

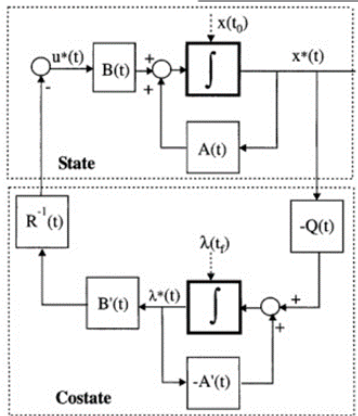
$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_a}{M_2} & 0 & -\frac{C_a}{M_2} & \frac{C_a}{M_2} \\ \frac{K_a}{M_1} & -\frac{K_t}{M_1} & \frac{C_a}{M_1} & -\frac{C_a}{M_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{r} \dots\dots\dots(2.9)$$

2.3. Pemodelan Sistem Suspensi Closed Loop



Gambar III-1 Desain Sistem Suspensi Aktif [3]

Gambar II-6 Diagram Blok Closed Loop



$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{K_a}{M_2} & 0 & -\frac{C_a}{M_2} & \frac{C_a}{M_2} \\ \frac{K_a}{M_1} & -\frac{K_t}{M_1} & \frac{C_a}{M_1} & -\frac{C_a}{M_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{r} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M_2} \\ -\frac{1}{M_1} \end{bmatrix} u_a$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + [0]u_a \dots\dots\dots(3.1)$$

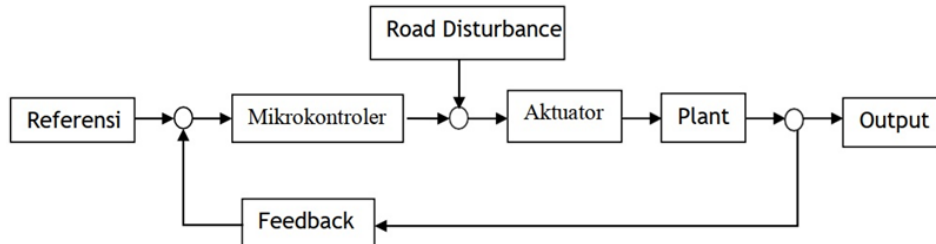
$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -411,6 & 0 & -7,198 & 7,198 \\ 1338 & -1879 & 23,39 & -23,39 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{r} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,1099 \\ -0,3571 \end{bmatrix} u_a$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + [0]u_a \dots\dots\dots(3.2)$$

Gambar II-7 Diagram Blok Proses Kontrol [4]

3. Perancangan Sistem

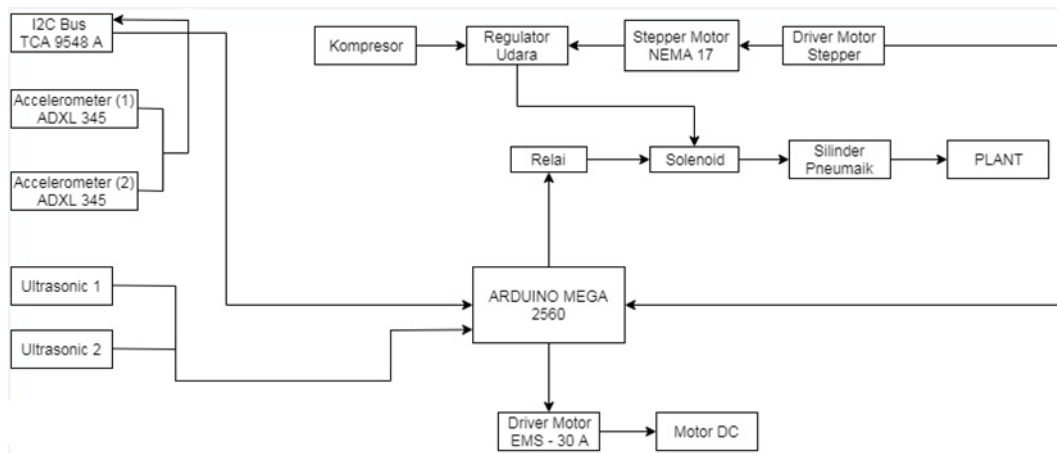
Pada sebuah sistem kendali biasanya terdapat gambaran umum sistem, gambaran umum ini biasa disebut sebagai diagram blok sistem. Tujuan dari adanya diagram blok ini supaya gambaran umum sistem mudah dipahami, berikut adalah diagram blok yang akan digunakan:



Gambar 3-1. Perancangan Umum Sistem

3.1. Diagram Blok Sistem

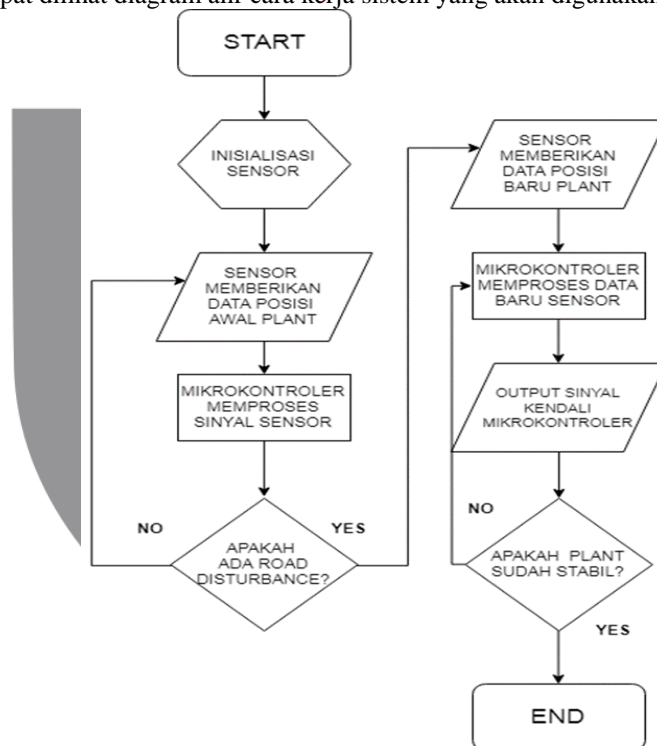
Perancangan perangkat keras merupakan suatu hal yang penting dalam perancangan kakaban otomatis agar berjalan lancar. Pada gambar 3-2 merupakan diagram perangkat keras sistem suspensi.



Gambar 3- 2. Diagram Perangkat Keras Sistem Suspensi

3.2. Diagram Alir Cara Kerja Sistem

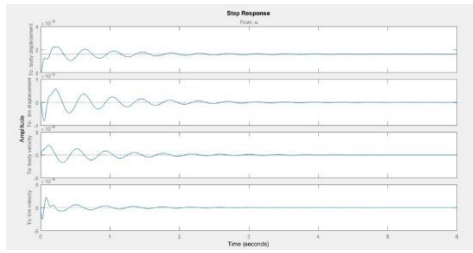
Pada gambar 3-3. Dapat dilihat diagram alir cara kerja sistem yang akan digunakan pada sistem suspensi.



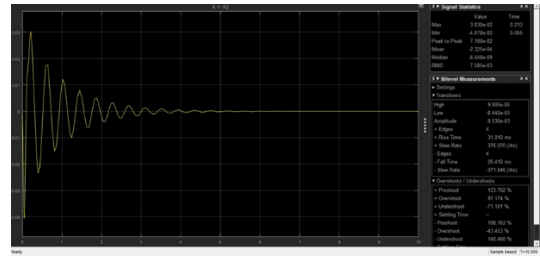
Gambar 3- 3. Diagram Alir Cara Kerja Sistem

4. Hasil Pengujian Sistem *Open Loop* dan *Closed Loop* Simulasi Matlab

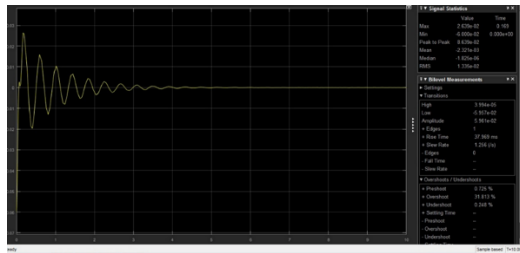
Pada Gambar 4.1 – 4.5 dan Tabel 4.1 – 4.2 merupakan data hasil pengujian simulasi dengan matlab dan fitur simulink dari matlab dengan road disturbance setinggi 6 cm



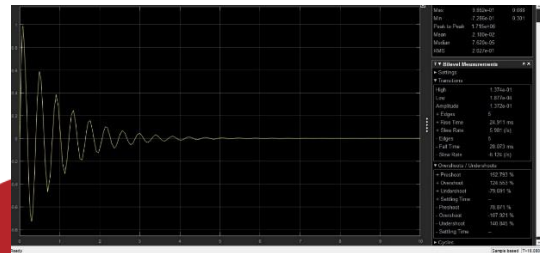
Gambar IV-1 Parameter Uji Open Loop (matlab)



Gambar IV-2 Open Loop Body Displacement (simulink)

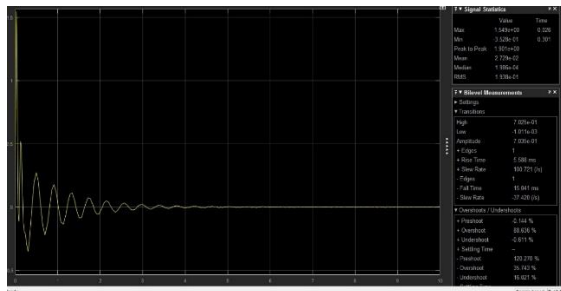


Gambar IV-3 Open Loop Wheel Displacement



Gambar IV-4 Open Loop Body Velocity

Tabel IV-1 Parameter Uji Open Loop (matlab)

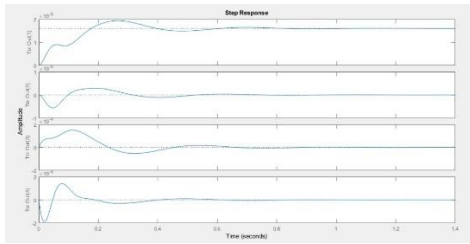


Gambar IV-5 Open Loop Wheel Velocity

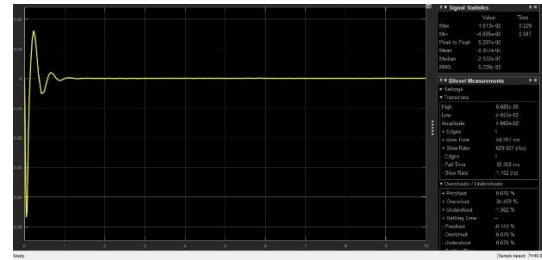
Parameter	Nilai Puncak	Settling Time (sec)	Rise Time (sec)	Steady State (sec)
Body Displacement	0,0000223	3,14	0,112	6
Body Velocity	0,0000213	3,84	0	6
Wheel Displacement	0,00000791	3,55	0	6
Wheel Velocity	-0,000246	2,83	0	6

Tabel IV-2 Data Simulasi Fisik Open Loop (Simulink)

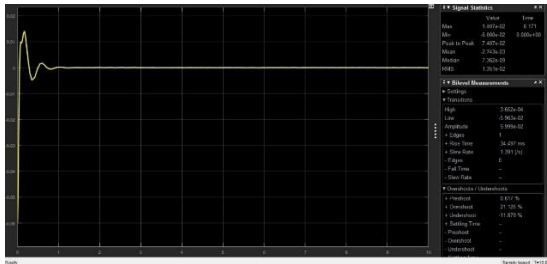
Parameter Uji	Body Displacement(m)	Body Velocity(m/s)	Wheel Displacement(m)	Wheel Velocity(m/s)
Puncak Atas	0,03	0,98	0,027	1,549
Puncak Bawah	-0,04	-0,728	-0,06	0,3528
Peak to Peak	0,071	1,715	0,08639	1,9
Waktu Puncak Atas(sec)	0,213	0,088	0,169	0,026
Waktu Puncak Bawah(sec)	0,055	0,3	0	0,3
Overshoot Max(%)	97,174	-79,691	31,813	88,636
Overshoot Min(%)	-43,453	-107,96	0	35,743
Rise Time(ms)	31	24,911	38	5,588
Settling Time(sec)	5,5	5	4,5	4
Steady State(sec)	6	6	5	5



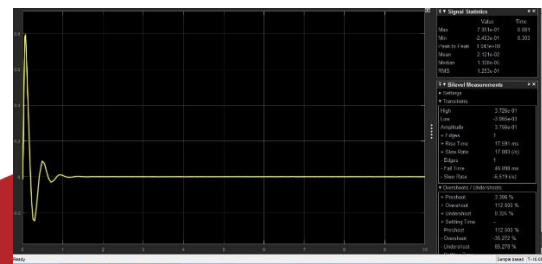
Gambar IV-6 Parameter Uji Closed Loop



Gambar IV-7 Closed Loop Body Displacement



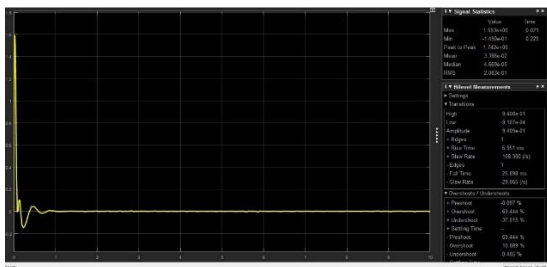
Gambar IV-8 Closed Loop Wheel Displacement



Gambar IV-9 Closed Loop Body Velocity

Tabel IV-3 Parameter Uji Closed Loop

Parameter	Nilai Puncak	Settling Time (sec)	Rise Time (sec)	Steady State (sec)
Body Displacement	0,0000216	1,73	0,118	3,5
Body Velocity	0,000199	2,22	0	3,5
Wheel Displacement	-	2,1	0	3,5
Wheel Velocity	-0,000236	1,59	0	3,5



Gambar IV-10 Closed Loop Wheel Velocity

Tabel IV-4 Data Simulasi Fisik Closed Loop

Parameter Uji	Body Displacement(m)	Body Velocity(m/s)	Wheel Displacement(m)	Wheel Velocity(m/s)
Puncak Atas	0,01613	0,8	0,0147	1,593
Puncak Bawah	-0,04685	-0,25	-0,06	-0,149
Peak to Peak	0,063	1,04	0,074	1,74
Waktu Puncak Atas(sec)	0,23	0,08	0,17	0,021
Waktu Puncak Bawah(sec)	0,047	0,303	0	0,23
Overshoot Max(%)	34,459	112,5	21,125	69,21
Overshoot Min(%)	-0,676	-35,27	0	10
Rise Time(msec)	59,3	17,59	34,497	6,95
Settling Time(sec)	1	1,2	1	0,9
Steady State(sec)	1,4	1,4	1,4	1

4.1. Perbandingan Sistem Closed Loop Terhadap Open Loop

Hasil pengujian simulasi matlab sistem *closed loop* terhadap *open loop* akan diambil rata-rata nya dengan parameter uji seperti *overshoot*, *rise time*, *settling time*, dan *steady state*. Sedangkan untuk prototipe parameter uji meliputi *body displacement*, *wheel displacement*, *body velocity*, dan *wheel velocity*

Tabel IV-11 Nilai Perbandingan Closed Loop Terhadap Open Loop (Matlab)

Parameter	Nilai Puncak	Settling Time (sec)	Rise Time (sec)	Steady State (sec)
<i>Body Displacement</i>	-13%	-76%	30%	-77%
<i>Body Velocity</i>	609%	-78%	0	-77%
<i>Wheel Displacement</i>	-29%	-75%	0	-77%
<i>Wheel Velocity</i>	-23%	-80%	0	-77%

Tabel IV-12 Nilai Perbandingan Closed Loop Terhadap Open Loop (Simulink)

Parameter Uji	<i>Body Displacement(m)</i>	<i>Body Velocity(m/s)</i>	<i>Wheel Displacement(m)</i>	<i>Wheel Velocity(m/s)</i>
Puncak Atas(m)	-46%	-18%	-46%	3%
Puncak Bawah(m)	17%	-66%	0%	-142%
Peak to Peak(m)	-11%	-39%	-14%	-8%
Waktu Puncak Atas(sec)	8%	-9%	1%	-19%
Waktu Puncak Bawah(sec)	-15%	1%	0%	-23%
<i>Overshoot Max(%)</i>	-65%	-241%	-34%	-22%
<i>Overshoot Min(%)</i>	-98%	-67%	0%	-72%
<i>Rise Time(msec)</i>	91%	-29%	-9%	24%
<i>Settling Time(sec)</i>	-82%	-76%	-78%	-78%
<i>Steady State(sec)</i>	-77%	-77%	-72%	-80%

Tabel IV-13 Nilai Perbandingan Prototipe *Closed Loop* Terhadap *Open Loop*

Body Displacement	Body Velocity	Wheel Displacement	Wheel Velocity	Sprung Mass			Unsprung Mass		
				X	Y	Z	X	Y	Z
-68%	-25%	-70%	16%	13%	4%	1%	24%	-44%	-1%

Dari tabel IV-11 dan IV-12 diketahui sistem closed loop bekerja lebih baik dibandingkan sistem open loop dengan nilai rata-rata parameter seperti *Rise Time* bertambah $\pm 13\%$, *Overshoot* berkurang $\pm 5\%$, *Settling Time* berkurang $\pm 78\%$, dan waktu mencapai kondisi *Steady State* berkurang $\pm 77\%$. Pada tabel IV-13 kita juga dapat melihat perbaikan kinerja prototipe, sistem *Closed loop* dibandingkan dengan sistem *Open loop*.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan sejumlah kesimpulan, yaitu:

1. Berdasarkan hasil pengujian pada tabel IV-1 dan IV-2, sistem closed loop menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan open loop. Hasil uji **Rise Time** bertambah $\pm 13\%$, **Overshoot** berkurang $\pm 5\%$, **Settling Time** berkurang $\pm 78\%$, dan waktu mencapai kondisi **Steady State** berkurang $\pm 77\%$.
2. Hasil uji prototipe sistem *closed loop* juga menunjukkan hasil yang lebih baik, dibandingkan dengan sistem *Open loop*. Parameter uji seperti **Body Displacement** berkurang $\pm 68\%$, **Body Velocity** berkurang $\pm 25\%$, **Wheel Displacement** berkurang $\pm 70\%$, dan **Wheel Velocity** bertambah $\pm 16\%$.
3. Tercapainya tujuan dengan hasil percepatan vertikal *Sprung mass* sebesar 1g, dengan nilai toleransi perubahan $\pm 1\%$. Nilai uji didapat dari sumbu Z sensor accelerometer pada tabel IV-3.

6. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis berhasil mendapatkan sejumlah saran untuk penelitian-penelitian yang lebih lanjut, yaitu:

1. Lebih mengamati berbagai faktor lain seperti, pengaruh gaya gesek bearing pada tiang penyangga, kekuatan tiang penyangga terhadap beban yang diuji.
2. Mengamati dan melakukan pengaturan terhadap pembobotan matriks Q dan R, atau menggunakan metode kendali yang lain seperti **LQG** atau **Robust** untuk mengurangi nilai **Overshoot**.

Daftar Pustaka:

- [1] Nouby M. Ghazaly , Ahmad O. Moazz: "The Future Development and Analysis of Vehicle Active Suspension System"; IOSR journal of mechanical and civil engineering (sep-oct.2014).
- [2] Ayman A. Aly, Farhan A. Salem: "Vehicle Suspension Systems Control: A Review";International Journal Of Control, Automation, And Systems, 2013.
- [3] Roshelia: "MODELING AND CONTROL OF ACTIVE SUSPENSION FOR A FULL CAR MODEL"; Project Report of Faculty of Electrical Engineering University Teknologi Malaysia, (2008).
- [4] Susanto Erwin, Prasetya Dwi Wibawa, Wibowo,Agung Surya, dan Cahyantri Ekaputri, Cahyantri: "PENGANTAR KONTROL MAJU" Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, (2015).
- [5] Subhan,Muhammad, Satmoko,Ari : "PENENTUAN DIMENSI DAN SPESIFIKASI SILINDER PNEUMATIK UNTUK PENGGERAKAN TOTE IRADIATOR GAMMA MULTIGUNA BATAN";Jurnal Perangkat Nuklir Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) Batan (November 2016).