

PERANCANGAN KONTROL OPTIMAL *LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)* DENGAN *GLOWWORM SWARM OPTIMIZATION (GSO)* UNTUK SISTEM SUSPENSI AKTIF MODEL KENDARAAN SEPEREMPAT

Susdarminasari Taini^{*)}, Sumardi, and Aris Triwiyatno

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jalan Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}Email: darminasari.sus@gmail.com

Abstrak

Sistem suspensi pada kendaraan merupakan salah satu komponen penting. Sistem suspensi yang ideal dapat meminimalkan defleksi dan percepatan vertikal badan kendaraan yang menjamin kenyamanan dan ketahanan dalam berkendara untuk variasi kondisi permukaan jalan. Pada penelitian ini menggunakan kendali LQR_{GSO} untuk menganalisis sistem suspensi aktif pada model kendaraan seperempat. Metode LQR_{GSO} merupakan sebuah mekanisme untuk menentukan nilai gain LQR optimal dimana nilai variabel diagonal matriks bobot Q dan R pada LQR dihitung menggunakan GSO. Sistem suspensi aktif diuji dengan beberapa model gangguan yang diwakilkan oleh sinyal gundukan, random, dan sinusoidal. Hasil simulasi yang diperoleh yaitu perbandingan antara respon suspensi aktif yang menggunakan kontrol LQR_{GSO} , LQR, dan suspensi pasif. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, suspensi aktif dengan LQR_{GSO} memiliki faktor kenyamanan dan ketahanan yang relatif lebih baik pada frekuensi 2-25 Hz[14]. Pada gangguan gundukan memberikan defleksi badan kendaraan sebesar 10,27 cm untuk LQR_{GSO} , 12,22 cm untuk LQR, dan 13,68 cm untuk suspensi pasif. Saat gangguan random, suspensi aktif dengan LQR_{GSO} memiliki performansi yang lebih baik dengan rata-rata percepatan sebesar $7,976 \text{ m/s}^2$, dibandingkan dengan LQR sebesar $8,413 \text{ m/s}^2$, dan suspensi pasif sebesar $8,803 \text{ m/s}^2$.

Kata kunci: Suspensi Aktif, kendaraan seperempat, LQR, GSO.

Abstract

The suspension system on the vehicle is one of the important components. An ideal suspension system can minimize deflection and vertical acceleration of the vehicle's body that ensures the comfort and endurance of driving on every surface condition in road. This study uses LQR_{GSO} control system to analyze an active suspension system in a quarter car model. LQR_{GSO} method is a mechanism to determine the optimal LQR gain value, while the diagonal matrix value of Q and R weight in LQR have been calculated by GSO. Active suspension system was tested by several models of interference which are represented by bump, random and sinusoidal signal. The simulation show the comparison result among active suspension responses which used LQR_{GSO} , LQR, and passive suspension. Based on the test, active suspension system using LQR_{GSO} has better comfort and endurance are better at a frequency of 2-25 Hz[14]. On bump disturbance, it causes the deflection of the vehicle body of 10,27 cm for LQR_{GSO} , 12,22 cm for LQR and 13,68 cm for passive suspension. On random disturbances, active suspension using LQR_{GSO} has better performance with an average acceleration of $7,976 \text{ m/s}^2$, compared to LQR of $8,413 \text{ m/s}^2$, and passive suspension of $8,803 \text{ m/s}^2$.

Keywords: Active Suspension, Quarter-Car, LQR, GSO.

1. Pendahuluan

Sistem suspensi memegang peranan yang sangat penting untuk memperoleh kenyamanan dan ketahanan dalam berkendara. Sistem suspensi yang ideal harus dapat meningkatkan kenyamanan dan ketahanan bagi penumpang dalam berkendara, yaitu dengan

meminimalkan percepatan vertikal badan kendaraan dan defleksi suspensi sehubungan dengan ketidakrataaan permukaan jalan.

Sistem suspensi saat ini dapat diklasifikasi menjadi pasif, semi-aktif, dan aktif. Pada sistem suspensi pasif, komponen yang digunakan masih konvensional dan

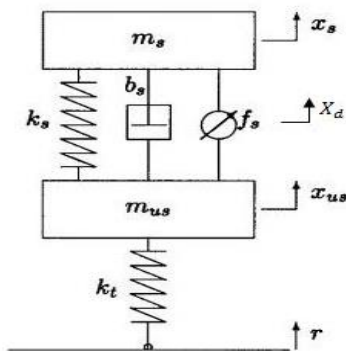
memiliki karakteristik tetap, yaitu pegas yang tidak dapat dikontrol dan peredam penyerap getaran. Sistem suspensi semi-aktif terdiri dari komponen pasif dan aktif. Sedangkan sistem suspensi aktif tidak memiliki komponen pasif. Saat ini, suspensi aktif ditandai dengan aktuator hidrolik yang ditempatkan secara seri (*low bandwidth*) atau paralel (*high bandwidth*) dengan pegas dan peredam[2]. Pegas dan peredam merupakan komponen utama yang menyusun suatu sistem suspensi, yang berfungsi untuk menopang badan kendaraan dan meredam getaran ketika kendaraan berinteraksi dengan jalan.

Pada penelitian ini, model yang digunakan adalah sistem suspensi aktif model kendaraan seperempat. Metode kontrol yang digunakan adalah *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan penentuan diagonal matriks bobot Q dan R menggunakan *Glowworm Swarm Optimization* (GSO). Fungsi objektif yang digunakan adalah Comprehensive Damping Index (CDI)[9][10]. Perancangan kontrol LQR dilakukan agar sistem suspensi aktif mampu meminimalkan defleksi suspensi dan percepatan vertikal badan kendaraan.

2. Metode

2.1. Pemodelan Suspensi Aktif

Pada penelitian ini, digunakan suspensi aktif tipe paralel seperti terlihat pada Gambar 1. Aktuator pada suspensi aktif dipasang secara paralel. Suspensi aktif memiliki daya masukan eksternal yang diharapkan mampu meningkatkan performansi sistem suspensi tersebut.



Gambar 1 Suspensi aktif tipe paralel[2]

dimana

- r : permukaan jalan
- m_s : massa badan mobil
- m_{us} : massa roda
- b_s : koefisien peredam
- k_s : koefisien pegas
- k_t : koefisien pegas pada roda
- X_s : pergerakan badan mobil
- X_{us} : pergerakan roda
- f_s : gaya keluaran aktuator (u)
- X_d : posisi aktuator

Berikut ini persamaan diferensial dari sistem suspensi aktif berdasarkan Gambar 1.

$$m_s \cdot \ddot{x}_s = -k_s(x_s - x_{us}) - b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) + f_s \quad (1)$$

$$m_{us} \cdot \ddot{x}_{us} = k_s(x_s - x_{us}) + b_s(\dot{x}_s - \dot{x}_{us}) - k_t(r - x_{us}) - f_s \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan diferensial 1 dan 2 dapat dibuat persamaan keadaan (*state-space*) sebagai berikut.

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

Sedangkan persamaan keluaran sistem adalah

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

Dengan isi matriks $A, B, C, D,$ dan G sebagai berikut.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-b_s}{m_s} & \frac{b_s}{m_s} & \frac{-k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} \\ \frac{b_s}{m_{us}} & \frac{-b_s}{m_{us}} & \frac{k_s}{m_{us}} & \frac{-k_s - k_t}{m_{us}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} \\ -1 \\ \frac{1}{m_{us}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{-b_s}{m_s} & \frac{b_s}{m_s} & \frac{-k_s}{m_s} & \frac{k_s}{m_s} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_s} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_t}{m_{us}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Untuk keperluan perhitungan, simulasi, dan analisis, harga parameter suspensi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Harga Parameter Suspensi[2]

m_s	m_{us}	b_s	k_s	k_t
290 kg	59 kg	1000 Ns/m	16812 N/m	190000 N/m

2.2. Linear Quadratic Regulator (LQR)

Pada sistem kontrol optimal berdasarkan indeks performansi kuadrat, optimasi kontrol dicapai dengan meminimalkan nilai indeks performansi berikut.

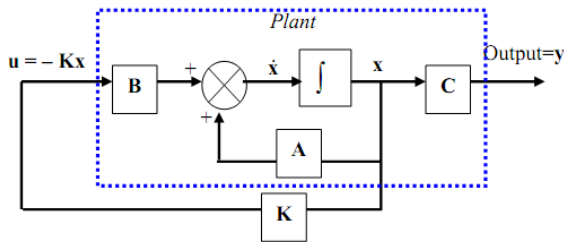
$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (10)$$

Dimana

$Q \geq 0$: matriks bobot, $[n \times n]$, dan semi definit positif

$R > 0$: matriks bobot, $[m \times m]$, dan definit positif
 x dan u diperoleh dari persamaan 3 dan 4.

Dengan menentukan matriks bobot Q dan R maka nilai indeks performansi pada persamaan 10, matriks P dari persamaan Riccati, dan umpan balik K dapat dihitung.



Gambar 2 Blok diagram sistem kontrol LQR

Persamaan Riccati:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (11)$$

dimana

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

Sehingga sinyal input optimal yang dihasilkan sistem sebagai berikut.

$$u = -Kx \quad (13)$$

Dengan adanya umpan balik K , persamaan keadaan 3 akan berubah menjadi persamaan (14).

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (14)$$

2.3. Glowworm Swarm Optimization (GSO)

Algoritma GSO[22] merupakan pengembangan dari algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) dan karakter kunang-kunang. Setiap kunang-kunang atau agen memiliki jarak penglihatan untuk mengetahui keberadaan agen lain atau tetangga, yang disebut *local decision range*. *Local decision range* tergantung dari jumlah tetangga, ketika jumlah tetangga terlalu sedikit maka *local decision range* membesar untuk menemukan lebih banyak tetangga, sebaliknya *local decision range* akan mengecil apabila jumlah tetangga terlalu banyak. Nilai *luciferin* setiap agen dikaitkan dengan nilai fungsi objektif, sedangkan parameter nilai fungsi objektif dikaitkan dengan posisi dari setiap agen. Setiap agen selalu mengubah arah gerak sesuai dengan posisi tetangga yang

dipilih dan hanya satu tetangga yang dipilih oleh setiap agen, yaitu tetangga yang memiliki nilai *luciferin* yang tertinggi diantara seluruh tetangga dari agen tersebut. Pada akhirnya, sebagian besar agen akan berkumpul di beberapa lokasi.

Secara garis besar, GSO terdiri atas tiga tahap yaitu tahap memperbaiki *luciferin*, tahap pergerakan agen dan tahap memperbaiki *local decision range*.

Persamaan untuk memperbaiki *luciferin*:

$$\ell_i(t) = (1 - \rho)\ell_i(t - 1) + \gamma J(x_i(t)) \quad (15)$$

dengan

ℓ_i : nilai *luciferin* dari agen i pada waktu t

ρ : konstanta peluruhan *luciferin* ($0 < \rho < 1$)

γ : konstanta peningkatan *luciferin*

$J(x_i(t))$: nilai fungsi objektif pada lokasi agen i pada waktu t

Setiap agen menggunakan mekanisme probabilitas untuk menentukan arah gerak berdasarkan posisi tetangga yang mempunyai nilai *luciferin* yang lebih tinggi dari dirinya sendiri. Setiap agen i memiliki probabilitas menuju ke agen j dengan persamaan 16.

$$p_{ij}(t) = \frac{\ell_j(t) - \ell_i(t)}{\sum_{k \in N_i} \ell_k(t) - \ell_i(t)} \quad (16)$$

dimana

$j \in N_i(t)$

$N_i(t) : \{j : d_{ij}(t) < r_d^i(t); \ell_i(t) < \ell_j(t)\}$

$d_{ij}(t) = \|x_j(t) - x_i(t)\|$

$N_i(t)$: jumlah tetangga agen i pada waktu t

$d_{ij}(t)$: jarak antara agen i dengan agen j pada waktu t

$r_d^i(t)$: *local decision range* agen i pada waktu t

Setelah agen i mendapatkan posisi agen j yang memiliki nilai probabilitas tertinggi maka gerakan setiap agen dapat dinyatakan dengan persamaan 17.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \quad (17)$$

dimana

s : nilai langkah agen i

Persamaan untuk memperbaiki *local decision range*:

$$r_d^i(t + 1) = \min\{r_s, \max\{0, r_d^i(t) + \beta(n_t - |N_i(t)|)\}\} \quad (18)$$

dimana

r_s : batas maksimum dari *local decision range*

β : parameter konstan

n_t : parameter yang digunakan untuk mengendalikan jumlah tetangga

n_t , s , ℓ_0 , β , ρ , dan γ adalah parameter algoritma yang telah ditentukan[22] dan bernilai tetap.

Tabel 2. Parameter Algoritma GSO[22]

ρ	γ	β	n_t	s	ℓ_0
0,4	0,6	0,08	5	0,03	5

2.4. Perancangan Aktuator

Aktuator yang digunakan pada penelitian ini adalah aktuator hidrolis model orde 1. Persamaan aktuator pada penelitian ini sebagai berikut.

$$T\dot{U} + U = U_c \tag{19}$$

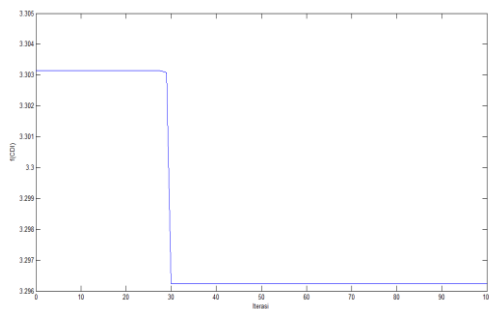
$$U = X_d - X_{us} \tag{20}$$

Dimana T adalah waktu konstan, U adalah keluaran aktuator, U_c adalah masukan aktuator, X_d adalah posisi aktuator, dan X_{us} adalah posisi massa roda.

3. Hasil dan Analisis

3.1. Kontrol Optimasi LQR Dengan GSO Pada Sistem Suspensi Aktif

Pada pengujian ini, variabel diagonal matriks pembobot LQR pada sistem suspensi aktif dirancang menggunakan algoritma GSO. Fungsi objektif yang digunakan berdasarkan CDI (*Comprehensive Damping Index*)[9][10]. Jumlah iterasi yang digunakan adalah seratus dan jumlah agen yang digunakan adalah sepuluh.



Gambar 3 Nilai fungsi objektif berdasarkan iterasi GSO

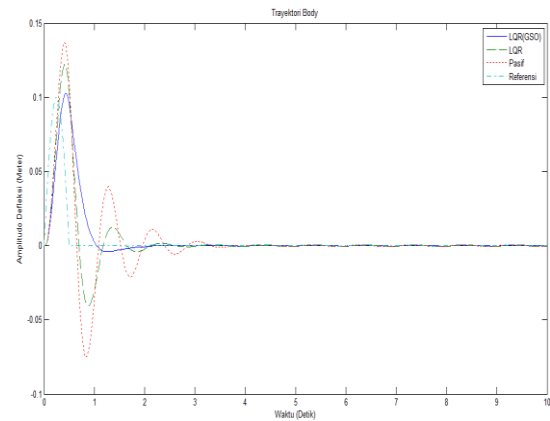
Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai fungsi objektif telah mencapai konvergensi dengan nilai 3,2962 pada saat iterasi ke-30.

3.2. Respon Sistem Terhadap Gangguan Gundukan

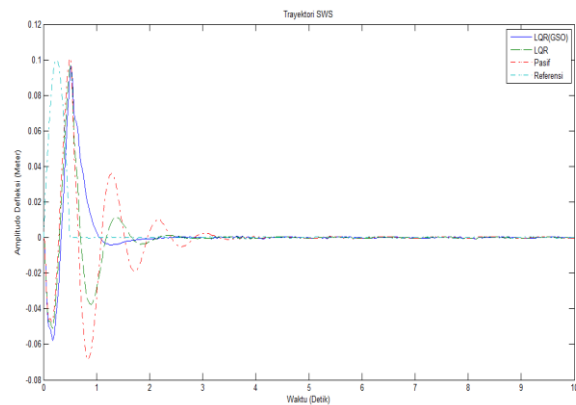
Sistem akan diberi gangguan berupa gundukan yang dapat dibuat dari sinyal sinusoidal yang diambil setengah periode.

$$w = \begin{cases} 0,1 \sin(2\pi t) & \text{untuk } t_0 < t < t_0 + 0,5T \\ 0 & \text{untuk nilai } t \text{ yang lain} \end{cases} \tag{21}$$

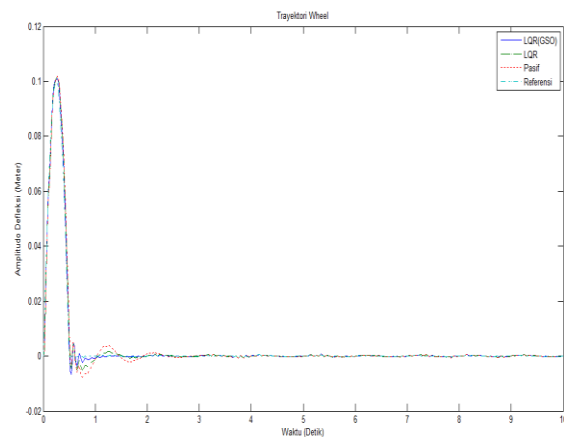
dengan T adalah periode getaran yang besarnya 1 detik dan $t_0 = 0$ detik adalah waktu ketika gundukan mulai dirasakan oleh roda kendaraan. Gundukan yang dirancang merupakan analogi dari polisi tidur yang terdapat pada permukaan jalan dengan amplitude 10 cm.



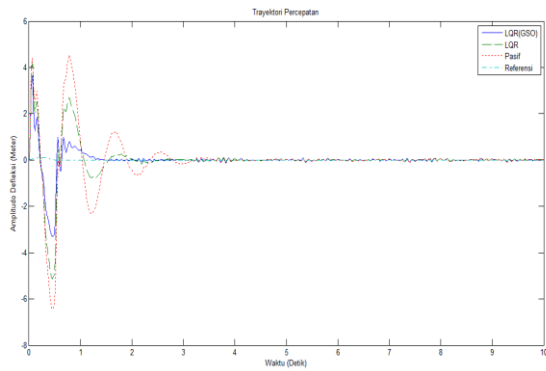
Gambar 4 Trayektori badan kendaraan terhadap masukan gundukan



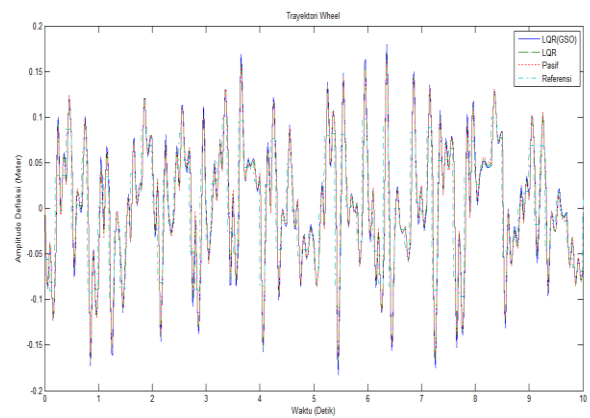
Gambar 5 Trayektori SWS terhadap masukan gundukan



Gambar 6 Trayektori roda kendaraan terhadap masukan gundukan



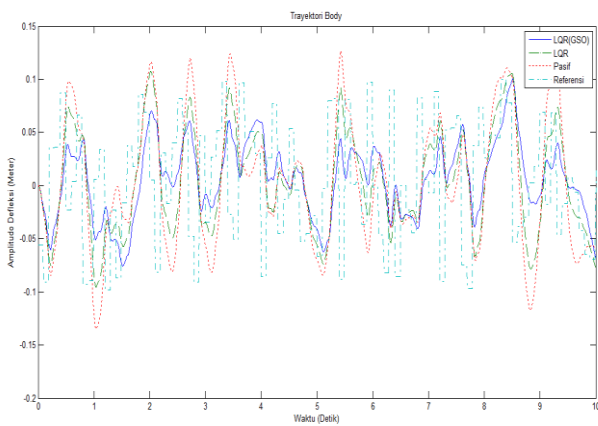
Gambar 7 Trayektori percepatan vertikal terhadap masukan gundukan



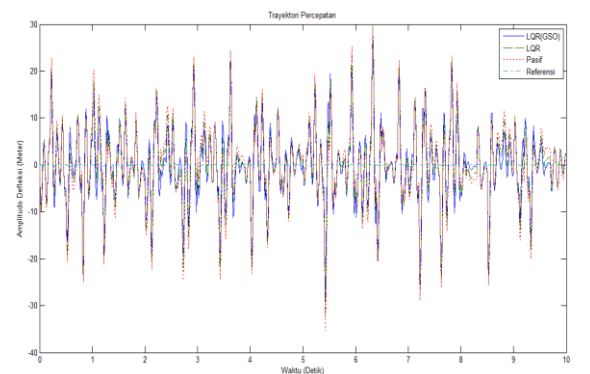
Gambar 10 Trayektori roda kendaraan terhadap masukan random

3.3. Respon Sistem Terhadap Gangguan Random

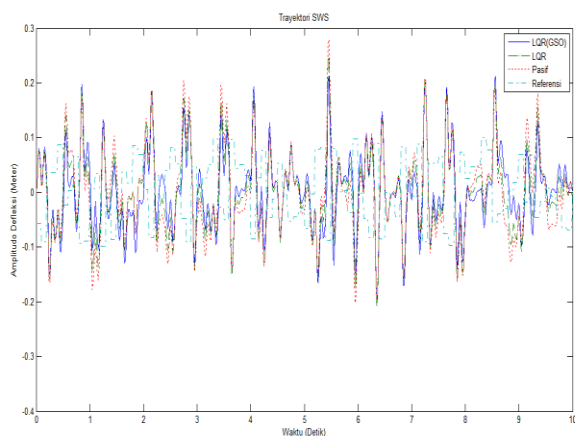
Sistem akan diberikan masukan gangguan berupa sinyal random yang menganalogikan permukaan jalan makadam (jalan yang tidak rata). Sinyal *random* yang diberikan memiliki amplitude maksimal dan minimal sebesar 10 cm selama 10 detik.



Gambar 8 Trayektori badan kendaraan terhadap masukan random



Gambar 11 Trayektori percepatan badan kendaraan terhadap masukan random



Gambar 9 Trayektori SWS terhadap masukan random

3.4. Perbandingan Pengendalian Sistem Suspensi Aktif dengan LQR_{GSO}, LQR, dan Suspensi Pasif

Respon sistem suspensi aktif dengan LQR_{GSO}, LQR, dan suspensi pasif dari seluruh pengujian yang telah dilakukan pada penelitian ini disajikan dalam Tabel 3. Analisis dilakukan dengan mengacu pada harga puncak (*peak*) dan nilai IAE untuk beberapa parameter yang di uji.

Tabel 3 Perbandingan respon sistem suspensi aktif dengan LQR_{GSO}, LQR, dan suspensi pasif

Gangguan Gundukan			
Parameter	LQR _{GSO}	LQR	Pasif
Defleksi body	10,27 cm	12,22 cm	13,68 cm
IAE	0,0438	0,0507	0,0765
Defleksi SWS	9,63 cm	9,70 cm	10,11 cm
IAE	0,06748	0,06815	0,08804
Defleksi wheel	10,11 cm	10,18 cm	10,19 cm
IAE	0,003693	0,005051	0,007575
Percepatan maksimum	3,6313 m/s ²	4,1479 m/s ²	4,5361 m/s ²
IAE	1,514	2,758	4,51
Gangguan Random			
Parameter	LQR _{GSO}	LQR	Pasif
Defleksi body	3,53 cm	4,73 cm	6,01 cm

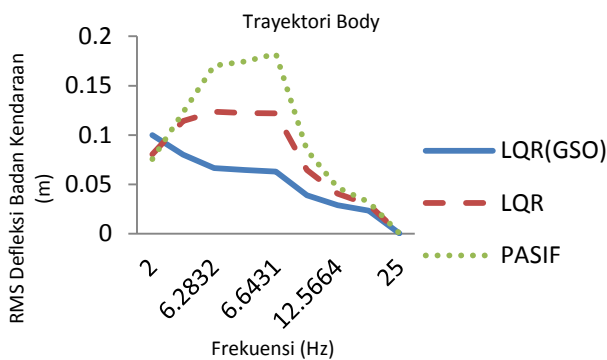
IAE	0,5149	0,5615	0,6416
Defleksi SWS	7,08 cm	7,36 cm	8,04 cm
IAE	0,9882	0,9890	1,0240
Defleksi wheel	6,82 cm	6,60 cm	6,50 cm
IAE	0,2582	0,2470	0,2445
Percepatan maksimum	7,976 m/s ²	8,413 m/s ²	8,803 m/s ²
IAE	56,87	58,53	61,46

Berdasarkan Tabel 3, secara keseluruhan penggunaan suspensi aktif dengan kontrol optimal LQR_{GSO} lebih baik dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR dan suspensi pasif. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai rata-rata defleksi dan IAE badan kendaraan, roda, SWS, dan percepatan maksimum dengan LQR_{GSO} yang lebih minimal dibandingkan dengan LQR pada suspensi aktif dan suspensi pasif. Untuk nilai defleksi dan IAE pada roda kendaraan untuk gangguan *random*, suspensi pasif lebih minimal dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR_{GSO} dan suspensi aktif dengan LQR, hal ini tidak akan begitu dirasakan oleh pengendara karena osilasi ini terjadi dibagian roda kendaraan.

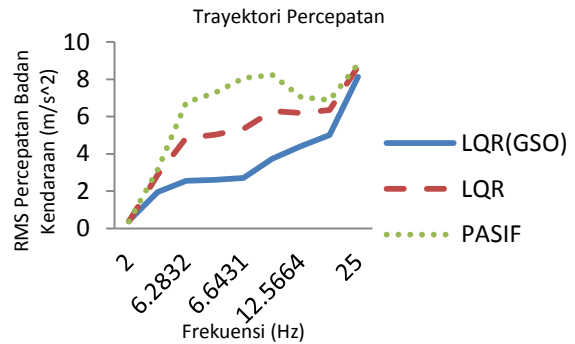
3.5. Faktor Kenyamanan dan Ketahanan

Sebuah sistem suspensi dapat dikatakan relatif nyaman jika percepatan vertikal dan defleksi badan kendaraan semakin kecil. Jika semakin besar percepatan vertikal dan defleksi badan kendaraan akan membuat penumpang tidak nyaman dan bisa terlempar atau terlenting. Sebuah sistem suspensi juga akan dinyatakan relatif tahan dalam hal ketahanan komponen penyusunnya jika daerah kerja suspensi atau SWS dapat seminimal mungkin. Semakin kecil defleksi SWS maka sistem suspensi akan memiliki ketahanan yang relatif baik. Analisis terhadap faktor kenyamanan dapat diperoleh dengan memberikan gangguan *sinusoidal* penuh dengan amplitude 0,1 m (10 cm) untuk daerah frekuensi 2; 5; 6,2832; 6,4367; 6,6431; 10; 12,5664; 15 dan 25 Hz dengan lama getaran 10 detik[14]. Pada daerah frekuensi tersebut merupakan daerah frekuensi yang paling terasa pada tubuh manusia.

3.5.1. Faktor Kenyamanan



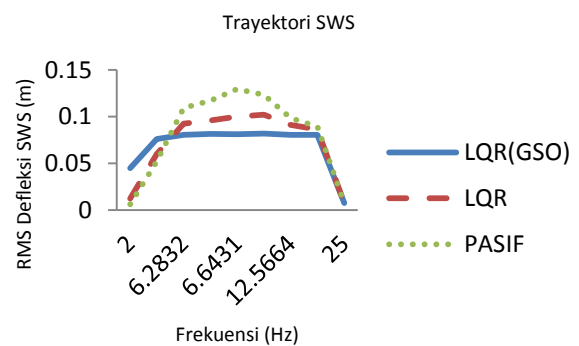
Gambar 12 Rata-rata defleksi badan kendaraan terhadap gangguan *sinusoidal*



Gambar 13 Rata-rata percepatan badan kendaraan terhadap gangguan *sinusoidal*

Gambar 12 menunjukkan RMS defleksi badan kendaraan terhadap gangguan *sinusoidal*. Berdasarkan hasil simulasi, sistem suspensi aktif dengan LQR_{GSO} yang dirancang mengalami penurunan bila dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR dan suspensi pasif. Pada daerah frekuensi 2 Hz, sistem suspensi aktif dengan LQR_{GSO} memberikan defleksi rata-rata badan kendaraan maksimal 10 cm, suspensi aktif dengan LQR sebesar 8,04 cm dan suspensi pasif sebesar 7,57 cm. Namun, turun secara tajam pada daerah frekuensi selanjutnya yang diuji cobakan. Semakin tinggi frekuensi, amplitude defleksi semakin berkurang. Gambar 13 menunjukkan rata-rata percepatan vertikal badan kendaraan. Secara keseluruhan pada daerah frekuensi yang diambil untuk uji coba sistem suspensi aktif dengan LQR_{GSO} memberikan percepatan gerak vertikal badan kendaraan yang kecil dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR dan suspensi pasif.

3.5.2. Faktor Keamanan



Gambar 14 Rata-rata defleksi SWS terhadap gangguan *sinusoidal*

Gambar 14 menunjukkan RMS atau rata-rata defleksi SWS terhadap gangguan *sinusoidal*. Pada daerah frekuensi 2-5 Hz suspensi aktif dengan LQR_{GSO} memiliki rata-rata defleksi lebih besar dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR dan suspensi pasif. Namun, pada daerah frekuensi 5-25 Hz, LQR_{GSO} memiliki rata-rata defleksi

lebih kecil dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR dan suspensi pasif.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa untuk melakukan perancangan matriks bobot Q dan R pada LQR dapat menggunakan metode GSO untuk memperoleh parameter yang optimal. Selain itu, penelitian ini membuktikan bahwa kontrol LQR_{GSO} mampu meminimalkan defleksi suspensi dan percepatan vertikal badan kendaraan. Sistem suspensi aktif dengan LQR_{GSO} juga memberikan kenyamanan dan ketahanan dalam berkendara yang lebih baik dibandingkan dengan suspensi aktif dengan LQR dan suspensi pasif. Untuk penelitian selanjutnya, sistem suspensi yang telah dirancang diaplikasikan ke dalam bentuk perangkat keras, serta menggunakan metode kendali yang lebih dapat meminimalkan defleksi suspensi dan percepatan vertikal badan kendaraan.

Referensi

- [1]. Muthi, G.A., *Perancangan Pengaturan Sistem Suspensi Aktif Pada Model Kendaraan Setengah Dengan Menggunakan Metode Kontrol Optimal LQR*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2004.
- [2]. Sam, Yahya, *Robust Control Of Active Suspension System For A Quater Car Model*, Malaysia, University Teknologi Malaysia, 2006.
- [3]. Yagiz, Nurkan, Sakman, L.E. and Rahmi G., *Different Control Applications On A Vehicle Using Fuzzy Logic Control*, Istanbul, Department of Mechanical Engineering Istanbul University, 2007.
- [4]. Basuki, Arief, *Pengaturan Kecepatan Motor DC Secara Real Time Menggunakan Teknik Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR)*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2004.
- [5]. Johnson MA, Grimble MJ., *Recent Trends in Linear Optimal Quadratic Multivariable Control System Design*, IEE Proc., 1987; 134: 1.
- [6]. Robandi I, Nishimori K, Nishimura R, Ishihara N., *Application of Genetic Algorithms to Improve a Q Weighting Matrix of Optimal Control Solution in Power System*, The proceeding of Universities Power Engineering Conference (UPEC), Leicester UK, 1999.
- [7]. Hamidi J., *Control System Design Using Particle Swarm Optimization (PSO)*, *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2012; 1(6): 116-119.
- [8]. Robandi I, Nishimori K, Nishimura R, Ishihara N., *Full-element weighting matrices Q and R design in optimal Load Frequency Control solution using genetic Algorithm*, Tottori Univerity Japan, 2000.
- [9]. Mishra S, Tripathy M, Nanda J., *Multi-machine power system stabilizer design by rule based bacteria foraging*, *Electric Power Systems Research*. 2007; 77: 1595-607.
- [10]. Shayeghi H, Shayanfar HA, Safari A, Aghmasheh R., *A robust PSSs design using PSO in a multimachine environment*, *Energy Conversion and Management*, 2010; 51(4): 696-702.
- [11]. Santosa, Dikki T., *Perancangan Sistem Suspensi Aktif Nonlinier Tipe Paralel Dengan Kendali Hybrid Fuzzy PID Pada Model Kendaraan Seperempat*, Semarang, Universitas Diponegoro, 2012.
- [12]. Xue, X.D., K.W.E. Cheng, and Z. Zhang, *Study of Art Automotive Active Suspensions*, Hongkong, Department of Electrical Engineering, 2011.
- [13]. Maratyanto, Oni B.T., *Perancangan Auto Tuning Fuzzy PID Pada Sistem Suspensi Aktif Tipe Paralel Nonlinear Model Kendaraan Seperempat*, Semarang, Universitas Diponegoro, 2013.
- [14]. Martinus, D., Soenarko, B. and Yunazwin, Y., *Aplikasi Teori Kontrol Optimal Pada Sistem Peredam Getar Semi-Aktif Menggunakan Model Kendaraan Setengah*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 1996.
- [15]. Fialho, Ian and Gary J.B., *Road Adaptive Active Suspension Design Using Linear Parameter-Varying Gain-Scheduling*, University of Minnesota, Minneapolis, 2002.
- [16]. Sumardi, *Perancangan Sistem Suspensi Semi-Aktif Dengan Peredam Nonlinier Menggunakan Pengontrol Fuzzy*, Bandung, Institut Teknologi Bandung, 1998.
- [17]. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan) Jilid 2*, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [18]. Rajeswari, K and P. Lakshmi., *Simulation of Suspension System with Intelligent Active Force Control*, International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, 2010.
- [19]. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik (Sistem Pengaturan) Jilid 1*, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [20]. D'Souza, Frank, *Design of Control System*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1988.
- [21]. Setiawan, Iwan, *Penentuan Matriks Pembobot Q Pada Teori Kontrol Optimal Suatu Studi Kasus Sistem Mekanis*, Bandung, Institut Teknologi Bandung, 1998.
- [22]. Krishnanand KN, Ghose D., *Theoretical foundations for rendezvous of glowworm-inspired agent swarms at multiple locations*, *Robotics and Autonomous System*, 2008; 56: 549-569.
- [23]. Bin Wu, Cunhua Qian, Weihong Ni, Shuhai Fan, *The improvement of glowworm swarm optimization for continous optimization problems*, *Expert System with Application*, 2012; 39: 6335-6342.
- [24]. Arsyad, *Perancangan Kontrol Optimal Pada Sistem Multi Machine Menggunakan Linear Quadratic Regulator-Glowworm Swarm Optimization (LQR-GSO)*, Universitas Diponegoro, Semarang, 2013.