

KENDALI KECEPATAN MOTOR DC BERBASIS JARINGAN DATA MENGUNAKAN REGULATOR LQG

DATA NETWORKED BASED LQG REGULATOR FOR DC MOTOR SPEED CONTROL

Listy Amalia¹, M. Ary Murti², Erwin Susanto³

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

¹listyamalia@telkomuniversity.ac.id, ²arymurti@telkomuniversity.ac.id,

³erwin.susanto@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Peralihan sistem kontrol manual ke sistem kontrol otomatis berbasis jaringan data yang lebih efektif dan efisien. Sistem kontrol berbasis jaringan data, atau lebih dikenal sebagai *Networked Control System* (NCS). NCS biasa digunakan sebagai kontrolernya dimana memungkinkan lebih banyak aktuator dan sensor terhubung dengan jaringan. Performa kontrol sering mengalami gangguan pada *plant*. Maka dari itu diperlukan metode untuk meminimalkan gangguan tersebut berupa *noise*.

Plant yang digunakan berupa motor DC karena mempunyai karakteristik kecepatan yang variatif. NCS akan dianalisis menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG). LQG adalah sistem kontrol optimal yang digunakan untuk mendesain dinamik optimal regulator dan estimator optimal (filter kalman) yang berfungsi mengestimasi variabel keadaan dan menyaring *noise*.

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapat hasil pengujian motor DC tanpa regulator LQG pada NCS sudah sesuai spesifikasi yang telah ditentukan seperti, nilai *settling time* $\leq 1,78$ detik, *rise time* $\leq 0,7$ detik, persentase overshoot $\leq 2\%$, *steady state error* $\leq 0,5\%$ dan respon sistem stabil. Sedangkan, hasil pengujian motor DC dengan regulator LQG pada NCS sudah sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan dan sistem stabil namun, belum bekerja sempurna. Hal tersebut dikarenakan hasil respon sistem lebih besar dari *set point*.

Kata kunci : Filter Kalman, *Linear Quadratic Gaussian* (LQG), *Linear Quadratic Regulator* (LQR), Motor DC, *Networked Control System*(NCS), Performa Sistem

Abstract

Manual control system transition into automatic control system based on data network which is more effective and efficiency. Data network based control system can be called as *Networked Control System* (NCS). NCS is used as a controller which allows more actuators and sensors that connected to the network. The control performance is frequently impaired in the plant. Therefore, a method to minimize the disturbance in form of noise is needed.

The plant that will be used is DC motor. It is because the DC motor has varies speed characteristic that can be chosen. NCS will be analyze using *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) method. LQG is an optimal control system that can be used to design optimal dynamic regulator and optimal estimator (kalman filter) which has function to estimate state variable and to filter the noise.

By this research, can be seen that implementation of NCS without LQG regulator works well. The system response has meets the needs with settling time ≤ 1.78 seconds, rise time ≤ 0.7 seconds, the percentage of overshoot $\leq 2\%$, steady state error $\leq 0.5\%$. and also the system was stable. However the implementation of NCS with LQG regulator works not perfect yet. It is because the system response results is bigger than the set point. Yet some of results has meet the needs and also the system was stable.

Keywords : Kalman Filter, *Linear Quadratic Gaussian* (LQG), *Linear Quadratic Regulator* (LQR), Motor DC, *Networked Control System*(NCS), Perform of System

1. Pendahuluan

Di dunia manufaktur modern telah terjadi peralihan sistem kontrol manual ke sistem kontrol otomatis yang lebih efektif dan efisien. Sistem kontrol berbasis jaringan data, atau lebih dikenal dengan NCS (*Networked Control System*). NCS biasa digunakan sebagai kontrolernya, dapat dipasang banyak sensor yang saling terhubung melalui jaringan sehingga memungkinkan lebih banyak aktuator yang terhubung dengan kontroler melalui jaringan di tempat yang berbeda. Performa sistem kontrol sering mengalami gangguan pada *plant* berupa turun ataupun matinya daya listrik. Maka dari itu diperlukan metode tertentu untuk meminimalkan gangguan tersebut.

Aplikasi motor DC banyak digunakan di dunia manufaktur karena mempunyai karakteristik kecepatan yang dapat dipilih, untuk itu motor DC pada tugas akhir ini digunakan sebagai *plant*. *Networked Control System* pada tugas akhir ini, akan dianalisis menggunakan metode LQG (*Linear Quadratic Gaussian*). LQG adalah sistem kontrol optimal yang diimplementasikan dalam bentuk ruang dan waktu (*state space*) yang digunakan untuk mendesain dinamik optimal regulator. Pada pengembangan konsep regulator optimal dilakukan

penambahan estimator optimal (filter kalman) yang berfungsi mengestimasi variabel keadaan dan menyaring *noise* (derau).

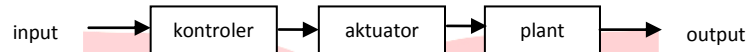
LQG dengan yang digunakan berdasarkan rujukan dari penelitian sebelumnya “*Study on LQG Regulation Design of Motor DC*” oleh G. Liu dan H. Gao dengan kesimpulan bahwa LQG merupakan algoritma yang memperhitungkan *noise* baik pada masukan ataupun keluaran sistem serta mampu mencapai efek kontrol optimal dalam waktu yang singkat. NCS yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan rujukan dari tugas akhir sebelumnya “*Analisis Penggunaan Algoritma State Variable Feedback pada Networked Control System*” oleh Zahra Babeth.

2. Dasar Teori

2.1. Sistem Kontrol

a. Sistem Kontrol Loop-Terbuka

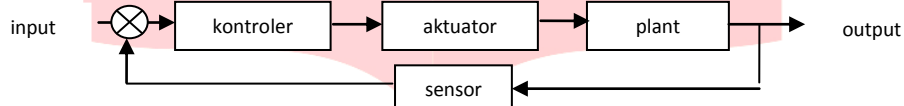
Sistem kontrol loop-terbuka adalah sistem yang nilai masukannya tidak dipengaruhi oleh nilai keluarannya.



Gambar 1. Sistem Kontrol Loop-Terbuka

b. Sistem Kontrol Loop-Tertutup

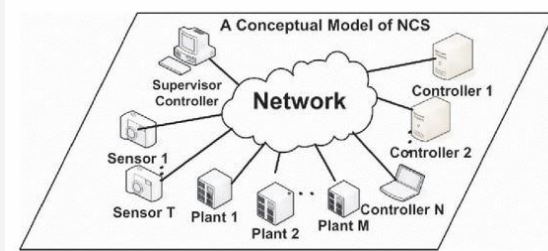
Sistem kontrol loop-tertutup adalah sistem yang nilai keluarannya berpengaruh langsung pada aksi pengontrolannya.



Gambar 2. Sistem Kontrol Loop-Tertutup

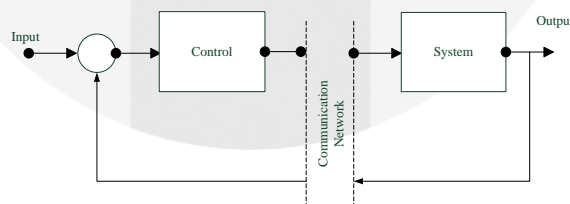
2.2. Networked Control System (NCS)

Networked Control System merupakan sistem kontrol umpan balik dimana loop kontrol tertutup melalui jaringan secara real-time. Pertukaran informasi dari masukan referensi, sensor, maupun komponen yang mempengaruhi keluaran sistem, dikirim ke pengontrol *plant* menggunakan jaringan.



Gambar 3. Konfigurasi Umum NCS^[5]

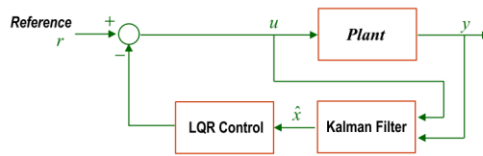
Diagram blok dari *Networked Control System* yang telah disederhanakan pada gambar 4, dengan jaringan komunikasi.



Gambar 4. Diagram Blok NCS yang Disederhanakan

2.3. Linear Quadratic Gaussian (LQG)

Linear Quadratic Gaussian (LQG) adalah implemmentasi dari teknik kontrol modern dalam bentuk ruang dan waktu (*state space*) yang digunakan untuk mendesain dinamik *regulator* optimal atau yang lebih dikenal dengan LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Konsep LQR mengalami perkembangan dengan mengikutsertakan optimal *estimator* (filter Kalman) yang berfungsi mengestimasi variabel keadaan (*state variable*) dan menyaring derau (*noise*).



Gambar 5. Diagram Blok *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)^[11]

Model *state space* plant yang digunakan pada LQG:

$$\dot{x} = Ax + Bu + v(t) \quad [11] \quad (1)$$

$$y = Cx + w(t) \quad [11] \quad (2)$$

keterangan:

\dot{x} = Input proses. v = Noise Input. y = Output proses. w = Noise Output.

dimana nilai $v(t)$ dan $w(t)$ dapat dianggap sebagai *white noise*.

$$E(w w^T) = Q_e, E(v v^T) = R_e, E(w v^T) = N, N = 0 \quad [11] \quad (3)$$

Model *state space* dari regulator LQG:

$$\hat{x} = (A - BF - K_e C)\hat{x} + K_e y \quad [11] \quad (4)$$

$$u = -F\hat{x} \quad [11] \quad (4)$$

dengan nilai indeks performansi sebagai berikut:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T (x^T Q x + u^T R u) dt \right], Q \geq 0, R > 0 \quad [11] \quad (5)$$

Noise pada kontroler menyebabkan tidak optimalnya aktuator, untuk mengoptimalkan *input* pada *plant* (u) diperlukan kontroler regulator (F) dan penguat estimator kalman filter (K_e). Untuk merancang regulator LQG dapat dilakukan dengan teori pemisahan.

2.4. Controllability and Observability

Sebuah sistem memiliki persamaan *state space* sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad [1] \quad (6)$$

$$y = Cx + Du \quad [1] \quad (7)$$

Untuk mengetahui sistem dari persamaan 6 dan 7 *controllability* maka:

$$M = [B : AB : \dots : A^{n-1}B] \quad [1] \quad (8)$$

Persamaan 8 merupakan matriks $n \times n$ dan memiliki *rank* n . *Rank* n merupakan banyak baris atau kolom pada matriks yang *independent* sebanyak n . *Rank* matriks tersebut dapat ditentukan dengan melihat *non-singular* atau nilai determinan $\neq 0$. Untuk mengetahui sistem dari persamaan 6 dan 7 *observability* maka:

$$N = [C^T : A^T C^T : \dots : (A^T)^{n-1} C^T] \quad [1] \quad (9)$$

persamaan 9 merupakan matriks $n \times n$ dan *non-singular* atau nilai determinan $\neq 0$.

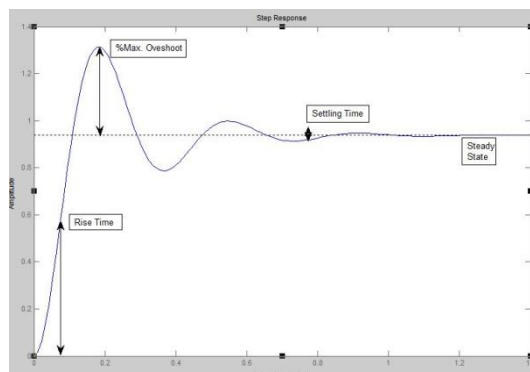
2.5. Performa Sistem Kontrol

Performa sistem kontrol dapat terlihat seperti gambar 6, dengan mengamati respon sistem saat diberi masukan *step*. Dengan respon *step* dapat diketahui *settling time*, *rise time*, persentase *overshoot*, serta *steady state error* sistem.

1. *Settling time* (T_s) adalah waktu yang diperlukan oleh keluaran agar dapat mencapai persen tertentu (biasanya 2% atau 5%) dari nilai akhir keluaran.
2. *Rise time* (T_r) adalah waktu yang diperlukan untuk naik dari 10% menjadi 90% nilai akhir oleh respon.
3. Persentase *overshoot* adalah nilai *peak level* lebih tinggi dari *steady state*.

$$\text{Persentase overshoot} = \frac{(\text{nilai peak level}) - (\text{nilai steady state})}{\text{nilai steady state}} \times 100\% \quad [4] \quad (10)$$

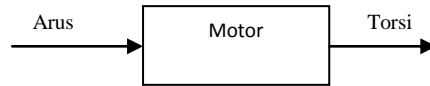
4. *Steady state error* adalah perbedaan antara keluaran *steady state* yang dihasilkan dengan keluaran yang diinginkan.



Gambar 6. Performa Sistem Kontrol

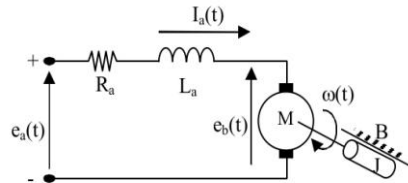
2.6. Motor DC

Motor dapat dimodelkan dengan bagian kotak berikut:



Gambar 8. Konversi energi pada motor listrik

Model fisik dari sebuah motor DC secara lengkap yang menggambarkan bagian elektrik dan bagian mekanik sebagai berikut:



Gambar 9. Model Fisik Motor DC^[12]

Keterangan:

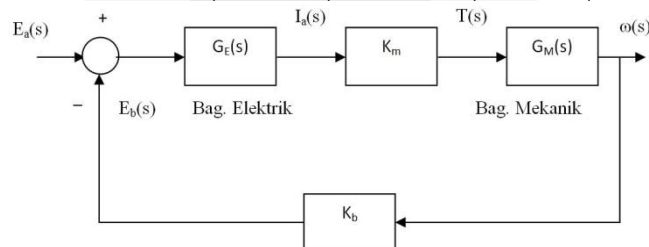
K _b = Nilai konstanta GGL lawan	T = Torsi
K _m = Konstanta motor	J = Momen inersia
e _b (t) = Tegangan back emf	M = Motor DC
e _a (t) = Tegangan jangkar	B = Konstanta gesek
I _a (t) = Arus jangkar	R _a = Tahanan jangkar
ω(t) = Kecepatan jangkar	L _a = Induktansi jangkar

3. Pembahasan

3.1. Pemodelan Motor DC

Pemodelan motor DC dapat dilakukan dengan cara mengukur dan menghitung beberapa parameter. Adapun beberapa hasil pengukuran dan perhitung sebagai berikut:

1. Saat motor ditahan dengan $V_{DC} = 1$ V dan I_{DC} yang terukur = 0,37 A. Maka, tahanan jangkar (R_a) = 2,7 Ω .
2. Induktansi yang terukur (L) = 1,693mH.
3. Saat motor diberi tegangan DC maksimum motor (E_a) = 12 V dan I_a yang terukur = 0,28 A. Sehingga nilai $P = 3,36$ Watt.
4. Kecepatan putar motor diamati saat motor diberi tegangan maksimum sebesar 12 Volt, nilai kecepatan putar (ω_n) = 233,33 RPM = 24,43 rad/sec selama 14,67 s.
5. Nilai $K_b = 0,46$ V.sec/rad
6. Nilai $E_b = 11,237$ V
7. Nilai $T = 0,137$ N.m/rad
8. Nilai $K_m = 0,038$ N.m/A
9. Nilai $B = 0,0056$ N.m.sec/rad
10. Nilai momen inersia (J) = $1,15 \times 10^{-4}$ N.m.sec²/rad.
11. Maka, untuk nilai G_E dan G_M adalah $G_E = \frac{1}{0,001693 s + 2,7}$ dan $G_M = \frac{1}{0,000115 s + 0,0056}$



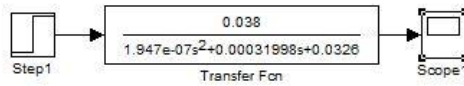
Gambar 10. Model Fungsi Alih Motor DC

Setelah dilakukan perhitungan spesifikasi motor DC maka, dilakukan pemodelan motor DC pada gambar 10, untuk mendapatkan fungsi alih sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{0.038}{1.947e^{-7} s^2 + 0.00031998 s + 0.0326} \quad (11)$$

3.2. Pengujian Pemodelan Motor DC

Fungsi alih dari pemodelan motor DC disimulasikan menggunakan Simulink pada Matlab. Simulasi dilakukan dengan menggunakan blok fungsi sebagai berikut:



Gambar 11. Simulasi Pemodelan Motor DC

Fungsi alih pemodelan motor DC kemudian diubah menjadi bentuk *state space* sebagai berikut: jika $b_0=0.038$, $b_1=0$, $b_2=0$, $a_0=0.0326$ $a_1=0.00031998$ $a_2=1.947e-07$ maka, bentuk state spacenya adalah:

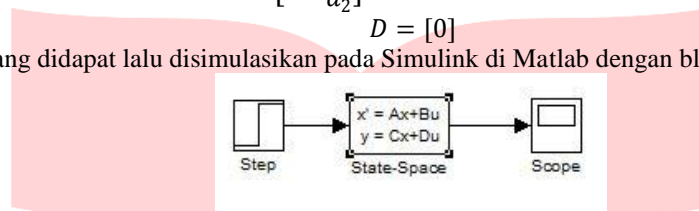
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{a_2} & -\frac{a_0}{a_2} \\ \frac{a_2}{a_2} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1643 & -1.674e + 05 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & \frac{b_0}{a_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1.952e + 05 \end{bmatrix}$$

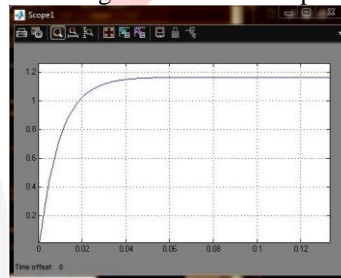
$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

Nilai matriks yang didapat lalu disimulasikan pada Simulink di Matlab dengan blok pada gambar 12.



Gambar 12. Simulasi Bentuk *State Space* Pemodelan Motor DC

Hasil respon yang didapat dari gambar 11 dan gambar 12 terlihat pada gambar 13.



Gambar 13. Respon Simulasi Pemodelan Motor DC

Hasil simulasi pemodelan motor DC dengan bentuk *state space* menghasilkan respon sama dengan hasil simulasi pemodelan motor DC dengan fungsi alih. Hal tersebut membuktikan bahwa bentuk pemodelan *state space* yang didapat telah benar.

3.3. Penentuan Nilai Matriks LQR

Untuk fungsi alih dari persamaan 11 didapat persamaan *state space* dengan waktu sampling sebesar 100ms:

$$A = \begin{bmatrix} -1643 & -1.674e + 05 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1.952e + 05 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

dimana nilai $R = [1]$ dan $Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 3.8092e + 10 \end{bmatrix}$.

Dengan persamaan Riccati:

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (13)$$

diperoleh nilai matriks $P = \begin{bmatrix} 1e + 03 & 9e + 04 \\ 9e + 04 & 1.6125e + 08 \end{bmatrix}$.

Dimana:

$$F = R^{-1}B^T P \quad (14)$$

maka, hasil perhitungan matriks $F = [0,0054e + 04 \ 8.9715e + 04]$.

3.4. Penentuan Nilai Matriks Filter Kalman

Penentuan nilai matriks filter kalman dapat ditentukan dengan langkah-langkah dibawah.

Untuk fungsi alih dari persamaan 11 didapat persamaan *state space* dengan waktu sampling sebesar 100ms pada persamaan 12. Dimana nilai $v = [0.1]$ dan $w = [0.1]$.

Dengan persamaan Riccati:

$$P_e A^T + A P_e - P_e C^T R_e^{-1} C P_e + Q_e = 0, P_e > 0 \quad (15)$$

Diperoleh nilai matriks $P_e = \begin{bmatrix} 46889 & 29 \\ 29 & 0.1 \end{bmatrix}$.

Dimana:

$$K_e = P_e C^T R^{-1} \quad [11]$$

(16)

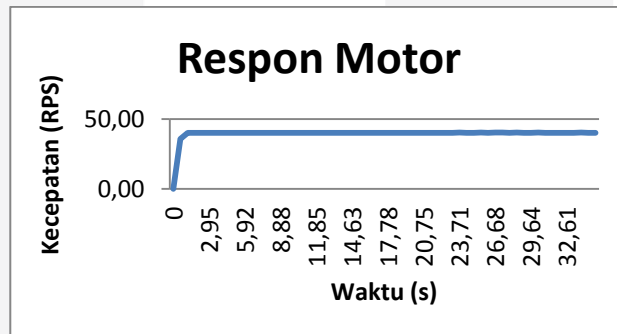
maka, hasil perhitungan matriks $K_e = \begin{bmatrix} 12.9808 \\ -0.0084 \end{bmatrix}$.

3.5. Pengujian Respon Motor DC tanpa Regulator LQG

Setelah dilakukan tiga kali pengujian respon motor DC tanpa pengendali saat diberi tegangan $\pm 10,5$ volt, maka diambil hasil terbaik yang terlihat pada tabel 1. dan gambar 14.

Tabel 1. Respon Motor DC tanpa Regulator LQG

RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)
0,00	0,00	40,00	7,10	40,00	14,22	40,00	21,34	40,31	28,46
35,78	0,58	40,16	7,70	40,00	14,63	40,16	21,93	40,16	29,05
40,16	1,18	40,16	8,29	40,00	15,42	40,16	22,51	40,16	29,64
40,16	1,77	40,00	8,88	40,00	16,01	40,16	23,12	40,31	30,24
40,16	2,36	40,16	9,48	40,00	16,60	40,31	23,71	40,16	30,83
40,00	2,95	40,16	10,07	40,16	17,19	40,16	24,30	40,16	31,42
40,16	3,55	40,16	10,67	40,16	17,78	40,16	24,90	40,16	32,02
40,16	4,14	40,00	11,26	40,16	18,38	40,31	25,49	40,16	32,61
40,16	4,73	40,16	11,85	40,16	18,97	40,16	26,09	40,00	33,20
40,16	5,33	40,16	12,44	40,16	19,56	40,31	26,68	40,31	33,79
40,00	5,92	40,00	13,04	40,16	20,17	40,31	27,27	40,16	34,49
40,00	6,51	40,00	13,63	40,00	20,75	40,16	27,86	40,16	34,98



Gambar 14. Respon Motor DC tanpa Pengendali

Set Point	=	40 RPS
Settling Time	=	1,18 s
Steady State	=	40,16 RPS
Steady State Error	=	0,06 %
Rise Time	=	0,59 s
Max. Overshoot	=	0,38 %

Karakteristik respon sistem yang diinginkan yaitu, nilai *settling time* $\leq 1,78$ detik, *rise time* $\leq 0,7$ detik, persentasi *overshoot* $\leq 2\%$ dan *steady state error* $\leq 0,5\%$. Dari hasil simulasi tanpa pengendalian dapat diperlihatkan pada gambar 4.4, bahwa respon motor memiliki *rise time* yang kecil namun butuh waktu cukup lama untuk mencapai keadaan tunak. Respon yang didapat sudah mendekati nilai *set point* yang ditentukan.

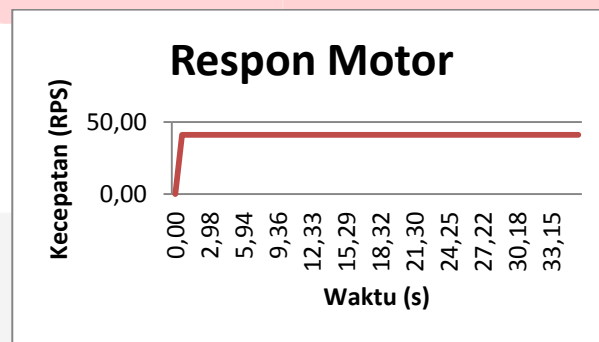
Nilai *max. overshoot* yang didapat kurang 2% disimpulkan sistem sudah cukup baik. Sistem tanpa pengendali tersebut memiliki banyak noise sehingga hasil keluaran masih belum stabil maka, diperlukan kontroler untuk mendapatkan sinyal kontrol yang optimal.

3.6. Pengujian Respon Motor DC dengan Regulator LQG

Pengujian respon motor DC dengan pengendali filter kalman dan LQR sebagai penyusun regulator LQG, dilakukan selama tiga kali saat diberi tegangan $\pm 10,5$ volt maka diambil hasil terbaik yang terlihat pada tabel 2 dan gambar 15.

Tabel 2. Respon Motor DC dengan Regulator LQG

RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)	RPS	Waktu (s)
0,00	0,00	41,00	7,58	41,00	14,70	41,00	21,88	41,00	29,00
41,03	0,60	41,00	8,18	41,00	15,29	41,00	22,47	41,00	29,59
41,00	1,19	41,00	8,77	41,00	15,89	41,00	23,07	41,00	30,18
41,00	1,78	41,00	9,36	41,00	16,48	41,00	23,66	41,00	30,78
41,00	2,38	41,00	9,96	41,00	17,14	41,00	24,25	41,00	31,37
41,00	2,98	41,00	10,55	41,00	17,73	41,00	24,85	41,00	31,97
41,00	3,56	41,00	11,18	41,00	18,32	41,00	25,44	41,00	32,56
41,00	4,16	41,00	11,74	41,00	19,92	41,00	26,03	41,00	33,15
41,00	4,75	41,00	12,33	41,00	19,51	41,00	26,63	41,00	33,75
41,00	5,34	41,00	12,93	41,00	20,10	41,00	27,22	41,00	34,34
41,00	5,94	41,00	13,51	41,00	20,70	41,00	27,81	41,00	34,93
41,00	6,99	41,00	14,11	41,00	21,30	41,00	28,41	41,00	35,60



Gambar 15. Respon Motor DC dengan Pengendali

Set Point	=	40 RPS
Settling Time	=	1,19 s
Steady State	=	41 RPS
Steady State Error	=	0,4 %
Rise Time	=	0,54 s
Max. Overshoot	=	0,06 %

Dari hasil simulasi nilai *steady state* dari respon tersebut melebihi *set point* yang telah ditentukan karena penambahan nilai pengendali LQR dan filter kalman sebagai penyusun regulator LQG, sehingga nilai keluaran respon sistem akan membesar. Nilai dari *max. overshoot* yang didapat kurang dari 2% serta sistem tersebut stabil.

Namun, hasil dari respon sistem lebih besar daripada nilai *set point*. Dapat disimpulkan bahwa sistem dengan pengendali belum dapat bekerja dengan hasil yang sempurna.

4. Kesimpulan

4.1. Kesimpulan

Pada penelitian yang telah dilakukan, penyusun dapat mengambil beberapa kesimpulan.

- Penentuan fungsi alih motor DC dapat dilakukan dengan pemodelan motor DC dengan cara mengukur dan menghitung spesifikasi Motor DC. Fungsi alih dari pemodelan motor DC didapatkan fungsi transfer orde 2.
- Hasil simulasi menghasilkan respon yang sama untuk pemodelan motor DC dengan bentuk *state space* dan pemodelan motor DC dengan fungsi alih.
- Hasil perhitungan nilai matriks LQR, $F = [0,0054e + 04 \ 8.9715e + 04]$. Dan, hasil perhitungan nilai matriks filter kalman, $K_e = \begin{bmatrix} 12.9808 \\ -0.0084 \end{bmatrix}$.
- Karakteristik respon sistem yang diinginkan yaitu, nilai *settling time* $\leq 1,78$ detik, *rise time* $\leq 0,7$ detik, persentase overshoot $\leq 2\%$ dan *steady state error* $\leq 0,5\%$. Pada pengujian motor DC tanpa pengendali

didapatkan: *max. overshoot* = 0,38%, *steady state error* = 0,06 %, *rise time* = 0,59 detik, *settling time* = 1,18 detik, respon sistem yang stabil, serta semua karakteristik respon sistem terpenuhi.

- e. Pengujian motor DC dengan pengendali didapatkan: *max. overshoot* = 0,06%, *steady state error* = 0,4 %, *rise time* = 0,58 detik, *settling time* = 1,19 detik, respon sistem stabil. Hasil dari respon sistem lebih besar daripada nilai *set point*, sehingga sistem belum dapat bekerja dengan sempurna.

4.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, penyusun menyarankan beberapa hal. Pengukuran *noise* dilakukan pada input maupun proses, sehingga hasil yang didapat lebih baik. Implementasi sistem dapat dilakukan pada jenis *plant* yang lain untuk melihat pengaruh regulator LQG pada NCS. Serta, implementasi sistem dilakukan pada jaringan yang lebih luas seperti *internet* untuk melihat unjuk kerja.

Daftar Pustaka:

- [1] Burns, Roland S. 2001. *Advanced Control Engineering*. Oxford, UK : Butterworth-Heinemann.
- [2] Gupta, R.A. dan Chow, Mo-Yuen. 2008. “*Overview of Networked Control System*”. *Networked Control System, Theory and Application*. London, UK : Springer London.
- [3] Lewis, F.L. 1995. *Optimal Control*. Kanada : John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Ogata, Katshuiko. 1997. *Modern Control Engineering, Third Edition*. USA : Prentice Hall, Inc.
- [5] Zhang, Wei. 2001. *Stability Analysis of Networked Control Systems*. United States : Case Western Reserve University.
- [6] Babeth, Zahra. 2014. Analisis Penggunaan Algoritma *State Variable Feedback* pada *Networked Control System*. Bandung: Universitas Telkom.
- [7] Anonymous. 2002. *Control System Toolbox for Use with MATLAB*. The Math Works.
- [8] G. Liu dan H. Gao. 2014. *Study on LQG Regulation Design of Motor DC*. New York : Springer New York.
- [9] Heru, D.L. 2009. Simulasi Pola Tingkah Laku Kecepatan Motor DC di Titik Operasi Mempergunakan Metoda Penempatan Kutub. Padang: Univesitas Andalas.
- [10] Siswoyo. 2008. Teknik Listrik Industri Jilid 2. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- [11] Chen, B.M. 2000. *Optimal Control Systems*. The National University of Singapore.
- [12] Harifuddin. 2008. *Pemodelan dan Pengendalian Motor DC Terkendali Jangkar*. Makassar: Universitas Negeri Makassar.