

Analisis Respon Sistem Kendali LQR (*Linear Quadratic Regulator*) Pada Simulasi *Gimbal* Kamera Dua Sumbu

Qalisha Putri Syahna^{1,†}, Elvan Yuniarti¹, Edi Kurniawan²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Jalan. Ir. H. Djuanda No.95, Cempaka Putih, Ciputat, Kota Tangerang Selatan, Banten 15412, Indonesia

²Pusat Penelitian Fisika LIPI, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

[†]qalishasyahna@gmail.com

Abstrak. Telah dilakukan penelitian untuk analisis respon sistem kendali gimbal kamera dua sumbu untuk arah *pitch* dan *roll* dengan menggunakan sistem kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Analisis dilakukan pada pengaruh nilai penguat Q dimana nilai ini divariasikan dalam perhitungan sistem kendali LQR. Hasil keluaran sistem diplot menjadi sinyal *step* sehingga dapat dilakukan analisis respon transient dimana dengan menggunakan metode ini terdapat beberapa parameter sinyal keluaran sehingga dapat dikatakan stabil seperti nilai *overshoot* dan *settling time*. Selain itu hasil keluaran sistem juga diplot menjadi sinyal sinusoidal untuk mengetahui nilai amplitudo beserta waktu amplitudo. Sebagai perbandingan, sistem kendali PID dengan metode *auto-tuning* digunakan dalam penelitian ini. Perbandingan dilakukan agar dapat mengetahui apakah sistem kendali LQR lebih tepat digunakan dalam sistem gimbal kamera dua sumbu. Hasil dari analisis variasi nilai Q yang diberikan pada kedua sudut adalah sistem berjalan dengan stabil saat nilai P sama dengan 4 untuk sudut *roll* dan nilai P sama dengan 6 untuk sudut *pitch*. Untuk pengaruh nilai penguat Q terhadap sistem menghasilkan perubahan keluaran yang signifikan saat nilai P berada pada *range* 1 hingga 10. Sedangkan hasil perbandingan antara respon sistem kendali LQR dan PID dapat membuktikan bahwa sistem kendali LQR menghasilkan respon sistem yang lebih baik.

Kata Kunci : *Gimbal*, Sistem kendali, LQR, PID, Respon sistem.

Abstract. Research has been conducted to analyzed the responses of the two axis camera gimbal control system for *pitch* and *roll* direction using the *Linear Quadratic Regulator* (LQR) control system. It focused on the effect from the value of gain Q in calculation of the LQR. The system output was plotted into a *step* signal so it will be analyzed with transient response method and plotted into sinusoidal signals to find the amplitude value along with the amplitude time. For comparison, the PID control system with the *auto-tuning* method was also used in this study. It has been done in order to find out whether the LQR control system is more appropriate to use in the two axis camera gimbal system or not. The result from the analysis of the variation of the Q value given at both angles is that the system runs stable when the value of $P=4$ for *roll* angle and $P=6$ for *pitch* angle. For the effect from value of gain Q on the whole system is it will make the output significantly changed when the $P=1-10$. While the results of the comparison can prove that the LQR control system has a better system responses.

Keywords: *Gimbal*, Control system, LQR, PID, System response.

PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi saat ini, banyak alat yang memudahkan manusia dalam melakukan kegiatan sehari-harinya. Salah satu contohnya adalah semakin mudah untuk melakukan pengambilan gambar menggunakan objek yang memiliki mobilitas yang tinggi. Objek ini biasa kita kenal dengan *drone*. Kamera yang tertempel pada *drone* akan mentransmisikan video secara langsung ke pusat pengendali sehingga pengguna dapat melakukan pengamatan suatu tempat [1] [2] [3].

Sebuah *drone* yang sedang mengudara tidak selalu dapat mempertahankan posisi dengan baik. Hal ini disebabkan karena adanya berbagai macam gangguan seperti angin, kegagalan sistem ataupun gerakan-gerakan manuver yang membuat gerak sebuah *drone* menjadi tidak stabil [4]. Agar gambar yang dihasilkan oleh *drone* memiliki kualitas yang baik, biasanya kamera diletakkan pada sebuah *gimbal* yang tertempel pada *drone*.

Gimbal merupakan alat yang biasa digantung pada *drone* dan digunakan untuk menjaga sebuah kamera untuk tetap berada pada posisi horizontal [5]. *Gimbal* mampu mempertahankan posisi kamera dengan mengatur sudut kamera ke posisi yang diinginkan setelah adanya [goyangan atau gerakan dari *drone* sehingga posisi kamera cenderung stabil. Kestabilan ini diatur oleh motor yang berada pada *gimbal* [6]. Jenis motor yang digunakan biasanya adalah motor *brushless* DC [7].

Sistem kendali diperlukan untuk mendukung stabilnya gerakan yang dihasilkan oleh motor. Banyak metode kendali yang biasa digunakan, contohnya adalah sistem kendali PID dan sistem kendali optimal dengan metode LQR (Linear Quadratic Regulator). Sistem kendali PID sendiri pernah diimplementasikan pada penggunaan *gimbal* kamera dua sumbu. Sistem kendali PID terdiri dari tiga nilai penguat yaitu nilai Kontrol Proporsional (K_p), Kontrol Integral (K_i) dan Kontrol Derivative (K_d) yang masing-masing nilai penguat ini memiliki kelebihan dan kekurangan dan dapat diimplementasikan secara bersamaan ataupun sendiri sesuai dengan target respon keluaran sistem yang diinginkan [8] [9] [10] [11]. Upaya untuk mendapatkan nilai ketiga gain pada sistem kendali PID hingga menghasilkan respon yang baik biasa dinamakan dengan *tuning* [12].

Jenis sistem kendali lainnya adalah sistem kendali optimal dengan metode LQR. Metode ini menggunakan pendekatan persamaan keadaan (*state-space*) dan aljabar Riccati yang digunakan untuk mengoptimalkan proses sistem dengan bentuk linear [13].

Metode optimasi menggunakan LQR adalah dengan menentukan sinyal masukan yang dipindahkan ke suatu keadaan sistem linier dari kondisi awal menuju ke suatu kondisi akhir yang meminimumkan indeks performansi kuadratik. Prinsip penggunaan metode LQR ini sendiri adalah dengan memperoleh sinyal kendali optimal dari umpan balik keadaan. Matriks umpan balik diperoleh dengan memecahkan persamaan Riccati [14].

Pada penelitian ini, penggunaan sistem kendali optimal metode LQR akan dibandingkan dengan sistem kendali PID yang sudah dilakukan penelitian terlebih dahulu sehingga dapat dilihat jenis sistem kendali yang mana yang cocok dengan penggunaan motor pada *gimbal*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei hingga Oktober 2018. Adapun tempat pelaksanaan penelitian adalah Pusat Penelitian Fisika (P2F), Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), kawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (PUSPIPTEK) Serpong, Gedung 440-442, Tangerang Selatan. Pada proses penelitian ini digunakan alat berupa 1 buah *Personal Computer* (PC) dan bahan berupa *software* MATLAB versi R2015b. Penelitian ini hanya menggunakan 1 buah alat dan bahan dikarenakan penelitian ini hanya berupa program simulasi.

Tabel 1. Definisi Parameter Respon Transien

Parameter	Keterangan
<i>Steady-state</i> (Keadaan Tetap)	Nilai saat kurva respon mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (biasanya 5% atau 2%)
<i>Rise Time</i> (Waktu Naik)	Waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 hingga 90% dari harga akhirnya.
<i>Settling Time</i> (Waktu Penetapan)	Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menetap pada Keadaan Tetap.
<i>Peak Time</i> (Waktu Puncak)	Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
<i>Overshoot</i> (Lewatan Maksimum)	Harga puncak maksimum dari respon yang diukur dari perbandingan selisih nilai puncakan pertama terhadap nilai keadaan tetap.

Dalam penelitian ini, dibuat 2 program simulasi menggunakan software MATLAB dan *Simulink* MATLAB. Program simulasi pertama merupakan simulasi *gimbal* dengan sistem kendali optimal metode LQR dan program simulasi kedua menggunakan sistem kendali PID. Program kedua ini merupakan simulasi yang bersifat pembandingan data hasil simulasi pertama.

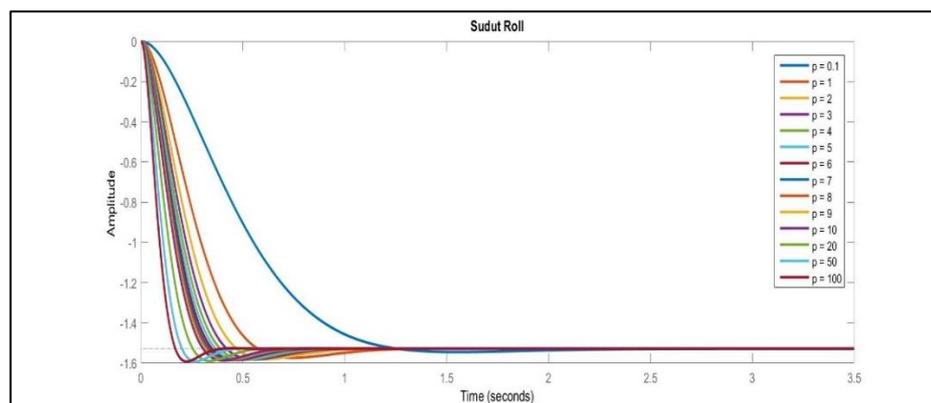
Terdapat 2 metode analisis data hasil simulasi yang digunakan. Metode pertama adalah dengan metode Respon Transien. Metode ini biasa digunakan untuk menganalisis sinyal keluaran hasil kendali dengan bentuk sinyal *step*. Beberapa nilai yang diperhatikan dalam metode ini adalah nilai *Steady-state*, *Rise Time*, *Settling Time*, *Peak Time* serta *Overshoot*. Penjelasan dari nilai-nilai di atas dapat dilihat pada Tabel 1 [15]. Metode kedua yang digunakan adalah analisis sinyal sinus. Dengan sinyal jenis ini maka terdapat dua nilai penting yang dapat diperhatikan yaitu nilai amplitudo serta waktu dari sinyal tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

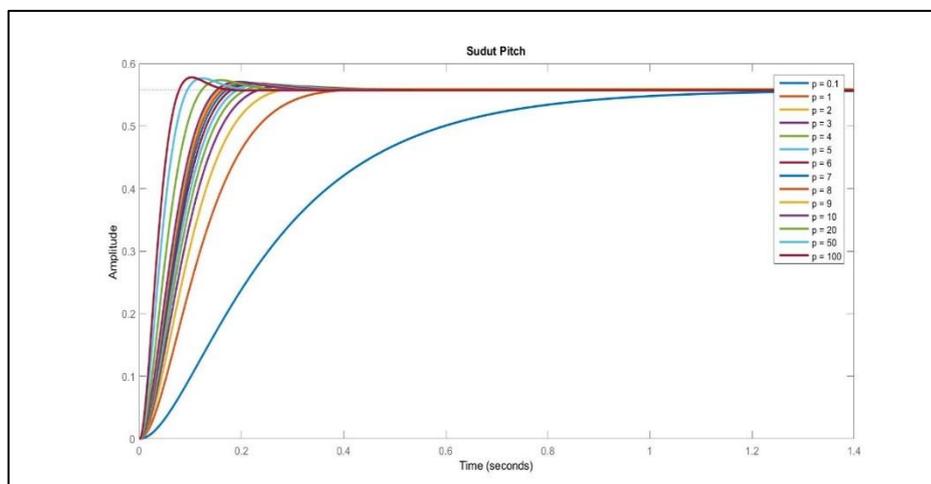
Variasi nilai Q diberikan melalui variasi nilai P pada program perhitungan kendali LQR. Terdapat 14 nilai yang berbeda yaitu 0, 1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 50, dan 100. Kemudian hasil dari simulasi diplot menjadi sinyal *step* serta sinusoidal dan hasil akhir analisis kendali LQR dibandingkan dengan hasil kendali PID.

Sistem Kendali LQR Sinyal Step

Metode analisis transien digunakan dalam pengolahan data sinyal *step*. Terdapat beberapa parameter yang terukur dari sinyal keluaran dan hasil dianalisis sehingga didapatkan nilai P yang menghasilkan keluaran paling baik dan stabil.



Gambar 1. Sinyal Step Sudut Roll



Gambar 2. Sinyal Step Sudut Pitch

Berikut nilai parameter respon transien yang didapatkan untuk kedua sudut :

Tabel 2. Nilai Parameter Respon Transien Sudut *Roll*

P	Peak Amplitude (rad)	Peak Time (sekon)	Overshoot(%)	Settling Time(sekon)	Rise Time(sekon)	Steady-state (rad)
0.1	-1.54	1.550	1.04	1.110	0.719	-1.53
1	-1.57	0.751	2.96	0.913	0.359	-1.53
2	-1.58	0.616	3.33	0.778	0.297	-1.53
3	-1.58	0.553	3.50	0.706	0.266	-1.53
4	-1.58	0.509	3.60	0.659	0.247	-1.53
5	-1.59	0.483	3.67	0.624	0.233	-1.53
6	-1.59	0.462	3.73	0.597	0.222	-1.53
7	-1.59	0.440	3.77	0.575	0.213	-1.53
8	-1.59	0.426	3.80	0.557	0.206	-1.53
9	-1.59	0.414	3.83	0.541	0.200	-1.53
10	-1.59	0.403	3.86	0.527	0.194	-1.53
20	-1.59	0.336	3.99	0.444	0.162	-1.53
50	-1.59	0.269	4.11	0.354	0.129	-1.53
100	-1.59	0.223	4.17	0.298	0.108	-1.53

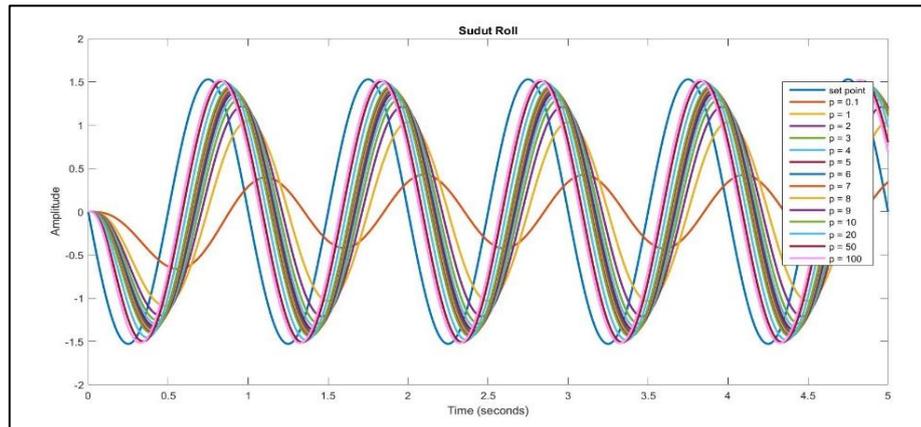
Tabel 3. Nilai Parameter Respon Transien Sudut *Pitch*

P	Peak Amplitude (rad)	Peak Time (sekon)	Overshoot(%)	Settling Time(sekon)	Rise Time(sekon)	Steady-state (rad)
0.1	0.556	>1.400	0.000	0.971	0.536	0.558
1	0.559	> 0.450	0.245	0.321	0.198	0.558
2	0.562	0.341	0.806	0.242	0.154	0.558
3	0.564	0.289	1.200	0.208	0.135	0.558
4	0.566	0.262	1.480	0.188	0.123	0.558
5	0.567	0.243	1.690	0.174	0.114	0.558
6	0.568	0.229	1.860	0.164	0.108	0.558
7	0.569	0.217	2.000	0.219	0.103	0.558
8	0.569	0.208	2.120	0.224	0.0991	0.558
9	0.570	0.201	2.220	0.222	0.0957	0.558
10	0.570	0.194	2.300	0.218	0.0928	0.558
20	0.573	0.159	2.810	0.191	0.076	0.558
50	0.576	0.124	3.320	0.155	0.0591	0.558
100	0.578	0.103	3.600	0.132	0.0491	0.558

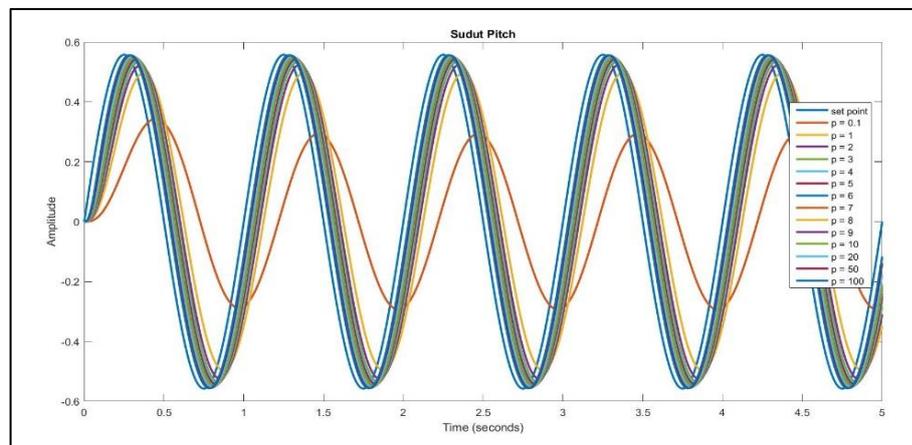
Dari nilai yang didapatkan di atas, dapat dianalisis sistem simulasi yang mana yang memiliki keluaran paling baik. Analisis ini didasarkan dengan mempertimbangkan nilai yang krusial dalam berjalannya sebuah sistem yaitu nilai *Overshoot* dan *Settling Time*. Sebuah sistem dapat dikatakan memiliki kinerja yang baik pada saat sistem dapat mencapai keadaan stabil dengan waktu yang cepat dan tanpa menimbulkan nilai keluaran melebihi nilai yang seharusnya dengan sangat berbeda. Selain itu, dipertimbangkan juga pengaruh nilai P dengan mengamati nilai selisih *Overshoot* dan *Rise Time* [15]. Dengan parameter ini maka dapat dikatakan sistem yang baik terjadi saat nilai P = 4 untuk sudut *roll* dan nilai P = 6 untuk sudut *Pitch*.

Sistem Kendali LQR Sinyal Sinusoidal

Selain diplot menjadi sinyal *step*, hasil keluaran kontrol juga diplot menjadi sinyal sinusoidal. Terdapat 2 parameter yang dapat diamati dari sinyal ini, yaitu nilai amplitudo dan waktu saat sinyal tersebut mencapai nilai amplitudonya.



Gambar 3. Sinyal Sinusoidal Sudut Roll



Gambar 4. Sinyal Sinusoidal Sudut Pitch

Untuk lebih jelas seberapa berpengaruh nilai P kepada sistem ini, berikut data Nilai amplitudo serta waktunya untuk variasi 10 nilai P :

Tabel 4. Parameter Amplitudo dan Waktu Sinyal Sinusoidal Sudut Roll

P	Amp.time set(sekon)	Amp time out (sekon)	Amplitude set (rad)	Amplitude out (rad)
0.1	0.75	1.12	1.529	1.110
1	0.75	1.00	1.529	1.046
2	0.75	0.96	1.529	1.213
3	0.75	0.95	1.529	1.291
4	0.75	0.93	1.529	1.340
5	0.75	0.92	1.529	1.372
6	0.75	0.91	1.529	1.394
7	0.75	0.90	1.529	1.411
8	0.75	0.90	1.529	1.425
9	0.75	0.89	1.529	1.435
10	0.75	0.89	1.529	1.440
20	0.75	0.86	1.529	1.484
50	0.75	0.84	1.529	1.511
100	0.75	0.82	1.529	1.519

Tabel 5. Parameter Amplitudo dan Waktu Sinyal Sinusoidal Sudut *Pitch*

P	Amp.time set(sekon)	Amp time out (sekon)	Amplitude set (rad)	Amplitude out (rad)
0.1	0.25	0.45	0.5576	0.343
1	0.25	0.37	0.5576	0.496
2	0.25	0.36	0.5576	0.521
3	0.25	0.34	0.5576	0.533
4	0.25	0.33	0.5576	0.5389
5	0.25	0.32	0.5576	0.5369
6	0.25	0.32	0.5576	0.5426
7	0.25	0.31	0.5576	0.5451
8	0.25	0.31	0.5576	0.5471
9	0.25	0.31	0.5576	0.5484
10	0.25	0.31	0.5576	0.5493
20	0.25	0.3	0.5576	0.554
50	0.25	0.29	0.5576	0.556
100	0.25	0.28	0.5576	0.5566

Dari kedua tabel di atas, terlihat bahwa semakin besar nilai P maka sinyal yang dihasilkanpun semakin mendekati sinyal *set point*. Akan tetapi semakin besar nilai P pula semakin kecil perubahan nilai yang terjadi. Dapat dilihat pada saat nilai P berubah dari 20, 50 hingga 100 perubahan nilai amplitudo di kedua sudut hanya sebesar 0.0027 dan 0.008 untuk sudut *roll* serta 0.002 dan 0.0006 untuk sudut *Pitch*. Hal ini dapat diartikan bahwa nilai P pada program sistem kendali optimal metode LQR dapat berpengaruh dengan baik hanya pada range nilai tertentu yaitu pada nilai 1 hingga 10.

Perbandingan Sistem Kendali LQR dan PID

Sebagai data pembandingan, dilakukan program simulasi *gimbal* menggunakan sistem kendali PID. Untuk mendapatkan nilai Kp, Ki dan Kd yang diperlukan dalam perhitungan kendali PID, dilakukan tuning menggunakan fitur *auto-tuning* pada blok PID di dalam program Simulink-MATLAB. Setelah dilakukan tuning dengan parameter *Overshoot* dan *Settling Time* terbaik didapatkan nilai penguatan PID sebagai berikut :

Tabel 6. Nilai Penguatan PID

Sudut	Kp	Ki	Kd
<i>Roll</i>	0.6803	0.6245	0.16970
<i>Pitch</i>	0.3592	0.1678	0.17564

Selanjutnya, didapatkan nilai parameter analisis respon transien dari hasil kendali PID menggunakan nilai penguatan di atas. Hasil ini kemudian dibandingkan dengan hasil kendali LQR sebagai berikut :

Tabel 7. Perbandingan Sistem Kendali LQR dan PID

Sudut	Sistem Kendali	Overshoot (%)	Settling Time (sekon)
<i>Roll</i>	Optimal Metode LQR	3.609	0.659
	PID	9.875	1.422
<i>Pitch</i>	Optimal Metode LQR	1.860	0.164
	PID	10.556	2.650

Terlihat dengan nilai yang paling berbeda jauh dengan hasil sistem kendali optimal metode LQR adalah nilai *Overshoot* yang jauh lebih besar, yaitu 9.875% untuk sudut *roll* dan 10.556% untuk sudut *Pitch*. Selain itu respon sistem juga lebih lambat dibandingkan dengan respon sistem

kendali optimal metode LQR. Hal ini dapat dilihat dari nilai *Settling Time* yang jauh berbeda diantara keduanya. Dengan perbedaan yang cukup jelas, dapat dikatakan bahwa sistem kendali optimal dengan metode LQR dapat menghasilkan respon sistem *gimbal* dua sumbu yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali PID.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi *gimbal* kamera dua sumbu dan mengacu pada data yang didapatkan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Parameter Nilai Q pada sistem kendali optimal metode LQR berpengaruh terhadap respon sistem dimana dalam penelitian ini nilai Q yang optimal digunakan adalah dengan $P = 4$ untuk sudut *roll* dan $P = 6$ untuk sudut *pitch*.
2. Parameter nilai Q pada sistem kendali optimal metode LQR hanya berpengaruh signifikan untuk respon sistem hanya pada *range* nilai tertentu yaitu 1 hingga 10 dan akan semakin berkurang kualitas hasil kendali tersebut apabila digunakan nilai Q yang semakin besar.
3. Sistem kendali optimal dengan metode LQR menghasilkan respon sistem *gimbal* dua sumbu yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali PID dengan metode *auto-tuning*.

REFERENSI

- [1] M. K. H. R and Y. Raharjo, "Rancang Bangun Sistem Penstabil Kamera untuk Foto Udara Berbasis Wahana Udara Quadcopter," *ELECTRICIAN*, vol. 8, 2014.
- [2] K. Min, B. Gi-Sig, K. Gwan-Hyung and C. Myoung-Hoon, "The Stabilizer Design for a Drone-mounted Camera Gimbal System Using Intelligent-PID Controller and Tuner Mass Damper," *International Journal of Control and Automation*, vol. 9 no. 5, pp. 387-394, 2016.
- [3] F. A. Muhammad, M. Rivai and Suwito, "Perancangan Sistem Stabilisasi Kamera Tiga Sumbu dengan Metode Kontrol Fuzzy untuk Mobile Surveillance Robot," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, 2016.
- [4] D. B. Saputro, "Sistem Kendali Arah Gimbal 3 Axis Menggunakan Gesture Kepala," Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta, 2016.
- [5] T. Shiino, K. Kawada, T. Yamamoto, M. Komichi and T. Nishioka, "Gimbals Control with The Camera for Aerial Photography inRC Helicopter," Department of Education Hiroshima University, Japan.
- [6] M. Abdo, A. Vali, A. Toloei and M. Arvan, "Stabilization Loop of Two Axes Gimbal System Using Self-Tuning PID Type Fuzzy Controller," *ISA Trans*, vol. 53, no. 2, pp. 591-602, 2014.
- [7] L. Vaghese and J. T. Kuncheria, "Modelling and Design of Cost Efficient Novel Digital Controller for Brushless DC Motor Drive," pp. 1-5, 2014.
- [8] M. Ali, "Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software MATLAB," *Jurnal Edukasi*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2014.
- [9] E. Susanto, Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) untuk Motor DC Menggunakan Personal Computer, Bandung: Dept. Teknik Elektro Intitu Teknologi Telkom Bandung.
- [10] M. J. Willis, "Proportional - Integral - Ferivative Control," 1999. [Online]. Available: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/pid/pid.pdf>. [Accessed 5 10 2018].
- [11] B. Ogunnaike and W. Ray, "Process Dynamics, Modelling and Control," Oxford University Press, New York, 1994.
- [12] S. Skogestad, "Probably The Best Simple PID Tuning In The World," *Journal of Process Control*, 2001.
- [13] U. Badri, A. I. G. S. M. Sc, I. K. MT and A. Dipl. Eng, "Kontrol Optimal Pada Motor DC Menggunakan Metode Linear Quadratic Regulator (LQR)," Department of Electronis Engineering, ITS, Surabaya, 2010.
- [14] Ilham, "Kendali Linear Quadratic Regulator (LQR) pada Motor Induksi 3 Phasa dengan Direct Torque Control (DTC)," *Inspiration*, vol. 4, no. 2, 2014.
- [15] K. Ogata, Teknik Kontrol Otomatik, Jakarta: Erlangga, 1995.