

Implementasi *Full State Feedback LQR* dengan JST pada Kendali Ketinggian *Quadrotor*

Faisal Fajri Rahani¹, Tri Kuntoro Priyambodo²

Abstract—One type of unmanned aircraft that is often used today is quadrotor. This type of aircraft has the ability to take off vertically. This study implemented an altitude control system on the z-axis quadrotor. The control used is the full state method of Linear Quadratic Regulator (LQR) with artificial neural networks. The LQR full state feedback method used in this system is 12-states with each feedback constant K tuned to the neural network method. This study implements the artificial neural network method to change the feedback constant on the z-axis. Artificial neural network architecture used 12 input layers, 48 hidden layers, and 1 output layer. This study compares the value of the results of the simulation with the response value of the system implementation results applied to the quadrotor. Testing with full state LQR feedback using artificial neural networks improves the system response to ± 0.77 seconds and improves steady state error values up to ± 12 cm. Based on the results of these studies, this system can be implemented to control other systems.

Intisari—Salah satu jenis pesawat tanpa awak yang sering digunakan saat ini adalah *quadrotor*. Pesawat jenis ini memiliki kemampuan untuk lepas landas secara vertikal. Makalah ini mengimplementasikan sistem kendali ketinggian pada sumbu z *quadrotor*. Kendali yang digunakan yaitu metode *full state feedback Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan jaringan saraf tiruan. Metode *full state feedback LQR* yang digunakan pada sistem ini adalah dua belas *state* dengan masing-masing konstanta *feedback K* ditala dengan metode jaringan saraf tiruan. Makalah ini mengimplementasikan metode jaringan saraf tiruan untuk mengubah konstanta *feedback* pada sumbu z. Arsitektur jaringan saraf tiruan yang digunakan yaitu dua belas *input layer*, 48 *hidden layer*, dan satu *output layer*. Makalah ini membandingkan nilai hasil simulasi dengan nilai respons sistem hasil implementasi yang diterapkan pada *quadrotor*. Pengujian dengan *full state feedback LQR* menggunakan jaringan saraf tiruan memperbaiki respons sistem hingga $\pm 0,77$ detik serta perbaikan nilai *steady state error* hingga ± 12 cm. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, sistem ini dapat diimplementasikan kendali pada sistem yang lain.

Kata Kunci—Pesawat Tanpa Awak, Jaringan Saraf Tiruan, UAV, State Space, Kendali Ketinggian.

I. PENDAHULUAN

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) merupakan wahana terbang tanpa awak yang dapat terbang secara mandiri. Sistem ini dapat terbang dengan sistem kendali jarak jauh maupun

menggunakan sistem kendali tertanam pada sistem tersebut. *Quadrotor* merupakan salah satu jenis UAV yang sering digunakan saat ini. Kemampuan *quadrotor* yang memiliki fleksibilitas baik serta kemampuan manuver yang andal dalam pengoperasiannya meningkatkan popularitas *quadrotor* di kalangan penggemar, pemerhati militer, serta peneliti. Penggunaan *quadrotor* sering diimplementasikan pada banyak kalangan sebagai alat untuk misi pemetaan, pencarian, penyelamatan, dan sebagainya [1].

Pada pengembangan sistem UAV diperlukan beberapa langkah untuk aplikasi secara nyata pada teknologi kedirgantaraan. Dari sekian banyak jenis UAV yang ada, para peneliti memilih *quadrotor* sebagai wahana penelitian. *Quadrotor* memiliki kelebihan dibandingkan dengan jenis UAV jenis *fixed wings*. *Quadrotor* adalah salah satu jenis UAV yang dapat lepas landas dalam landasan yang terbatas, karena *quadrotor* dapat terbang dan mendarat secara vertikal [2]. Pengembangan sistem dengan menggunakan *quadrotor* dinilai lebih murah serta hanya membutuhkan tempat yang tidak terlalu luas. Kemudahan dalam hal implementasi sistem kendali serta kemudahan operasi menjadi nilai tambah penggunaan *quadrotor* [3].

Sistem pada *quadrotor* menggunakan empat buah rotor dengan empat buah bilah baling pada setiap rotor, yang digunakan untuk memperoleh gaya angkat ke atas sehingga *quadrotor* dapat terbang. Agar dapat mencapai keadaan stabil, *quadrotor* membutuhkan sistem kendali kesetabilan yang sesuai dengan peruntukannya. Kendali dalam mempertahankan ketinggian adalah hal penting dalam pengoperasian *quadrotor*. Hal tersebut dikarenakan pada pengoperasian UAV yang sesungguhnya, pengendalian ketinggian merupakan hal yang tidak mudah [4]. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh getaran pada sistem kendali jarak jauh maupun perubahan daya yang dihasilkan pada masing-masing rotor. Hal ini membuat kendali ketinggian mendapat lebih banyak gangguan. Permasalahan tersebut membuat sistem kendali ketinggian pada *quadrotor* perlu digunakan.

Beberapa metode kendali telah banyak diajukan pada sistem kendali *quadrotor*. Di antara metode kendali tersebut adalah metode *Proportional Integral Derivatif* (PID) [5], *Fuzzy*, *Ant Colony Optimization* [6], dan *Full State Feedback* dengan *Linier Quadratic Regulator* (LQR) [7]. Metode metode *full state feedback LQR* merupakan salah satu metode kendali yang banyak digunakan di dalam dunia kendali UAV secara umum.

Metode *full state feedback LQR* adalah sebuah pengembangan dari metode penempatan kutub dan Hamiltonian Jacobi Bellman (HJB) dengan cara mengatur *state* sistem pada sistem bernilai nol dengan masukan sistem seoptimal mungkin [8]. Pengaturan tersebut memiliki tujuan untuk meminimalkan nilai *overshoot* dan mendapatkan

¹ Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Kec. Banguntapan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191 (telp: (0274) 563515; e-mail faisal.fajri@tif.uad.ac.id)

² Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara Bulaksumur, Kotak Pos 21, Senolowo, Sinduadi, Kec. Mlati, Kab. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281 (telp: (0274) 513339; e-mail: mastri@ugm.ac.id)

tanggap waktu yang sesuai dengan kriteria sistem yang ditentukan. *Full state feedback* LQR merupakan metode kendali yang dapat menerapkan sistem multimasukan dan multikeluaran atau *Multiple Input Multiple Output* (MIMO).

Metode kendali *full state feedback* LQR menggunakan sistem *state space* pada pengaturan sistem kendali [9]. Sistem tersebut diterapkan pada *quadrotor* yang digunakan pada penelitian ini dengan menentukan jumlah *state* yang digunakan. Banyaknya jumlah *state* yang digunakan pada kendali *full state feedback* LQR bergantung pada jumlah masukan dan orde dari sistem tersebut.

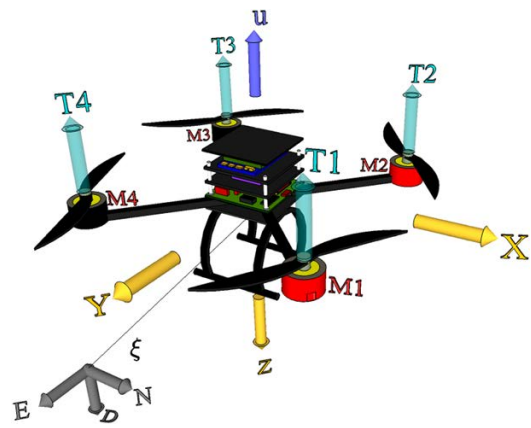
Sistem kendali penahan ketinggian dengan metode *full state feedback* LQR pada *quadrotor* memiliki kelemahan yang disebabkan oleh beberapa hal yang mendasar. Pengendalian dengan metode pemodelan sistem tersebut menghasilkan kendali yang kurang akurat. Hal tersebut dikarenakan linearisasi kendali dengan LQR serta perhitungan parameter pemodelan kendali yang kurang tepat [10]. Nilai komponen konstanta *feedback* yang bersifat tetap akan membuat respons sistem tidak baik. Hal itu dikarenakan sistem *quadrotor* banyak menerima gangguan yang tidak tetap, sedangkan sistem kendali yang digunakan tidak dapat mengakomodasi gangguan tersebut [11]. Dikarenakan hal tersebut, maka dibutuhkan sebuah sistem untuk mengatur nilai konstanta *feedback* agar sistem dapat mempertahankan ketinggian pada sistem *quadrotor*.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengubah nilai komponen konstanta *feedback* adalah sistem jaringan saraf tiruan. Sistem jaringan saraf tiruan diimplementasikan pada sistem ini menggunakan sistem *online* pada *quadrotor* tersebut. Jaringan saraf tiruan merupakan representasi dari saraf yang terdapat pada tubuh manusia seperti pada otak. Sistem ini menyimulasikan proses pembelajaran yang terjadi pada otak manusia [12]. Jaringan saraf tiruan ini digunakan untuk menyesuaikan konstanta *feedback* pada kendali *full state feedback* LQR pada kendali penahan ketinggian sesuai dengan kebutuhan sistem *quadrotor* [10].

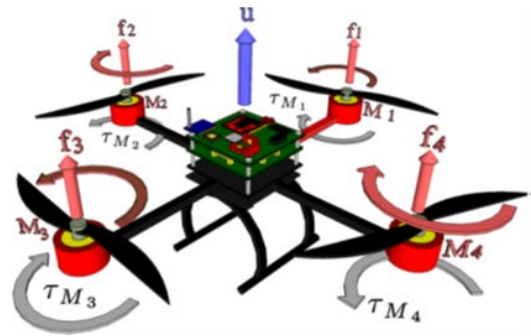
II. METODE

Quadrotor merupakan jenis UAV yang terdiri atas empat buah rotor dengan empat buah baling-baling yang masing-masing berada pada ujung kerangka *quadrotor*. Pada penerbangan *quadrotor* terdapat dua jenis konfigurasi terbang yang digunakan. Konfigurasi yang digunakan yaitu konfigurasi terbang plus (+) serta konfigurasi terbang silang (x). Penggunaan masing-masing konfigurasi terbang tersebut akan memengaruhi cara kerja *quadrotor* dalam melakukan misi terbangnya.

Pengendalian terbang pada *quadrotor* dilakukan dengan cara mengatur kecepatan masing-masing rotor yang akan menghasilkan gaya angkat pada setiap rotor. Gaya angkat tersebut akan memengaruhi gerakan *quadrotor* dalam gerakannya. Masing-masing dari empat rotor tersebut memiliki arah putar yang saling berlawanan. Dua rotor berlawanan tempat memiliki arah putar yang sama, yaitu searah jarum jam dan sepasang rotor yang lain berputar berlawanan dengan arah jarum jam. Kecepatan putar masing-masing rotor tersebut akan memengaruhi gerakan *quadrotor*. Guna mempertahankan



Gbr. 1 Konfigurasi gerak *quadrotor* X [13].



Gbr. 2 Masukan kendali *quadrotor* [13].

ketinggian pada *quadrotor*, dibutuhkan sistem kendali untuk mengatur kecepatan masing-masing rotor.

Posisi antara kerangka badan *quadrotor* dan orientasi bumi ditunjukkan pada Gbr. 1. Arah positif sumbu x kerangka *quadrotor* adalah ke depan pada sistem *quadrotor* searah dengan sumbu x bumi, arah sumbu y *body frame* ke kiri *quadrotor* searah dengan sumbu y bumi, sedangkan sumbu z ke arah atas kerangka *quadrotor* searah dengan sumbu z bumi. Penentuan arah tersebut akan memengaruhi cara kendali pada setiap sudut pada wahana *quadrotor*.

Quadrotor dengan konfigurasi kerangka X menggunakan empat buah rotor yang terbagi menjadi dua rotor depan dan dua rotor belakang, seperti pada Gbr. 2. Setiap rotor dengan baling-baling dapat menghasilkan gaya angkat dan torsi. Kombinasi dari gaya tersebut akan menghasilkan gaya angkat ke atas [13]. Gaya angkat *quadrotor* dapat diperoleh dengan cara mengatur kecepatan keempat rotor dengan kecepatan yang sama.

Quadrotor dapat bergerak secara translasi terhadap z bumi untuk menjaga ketinggian dengan mengatur kecepatan masing-masing rotor. Gerakan keempat rotor dengan kesetabilan yang seimbang akan menghasilkan gaya angkat untuk *quadrotor*. Gaya angkat tersebut dapat dimanfaatkan *quadrotor* untuk bergerak pada sumbu z bumi.

Masing-masing rotor M_i (untuk $i=1,2,3,4$) menghasilkan gaya F_i yang sebanding dengan kuadrat kecepatan rotor. Gaya angkat pada *quadrotor* didapatkan dari penjumlahan gaya dorong ke atas yang dihasilkan oleh masing-masing rotor.

Sistem pada *quadrotor* memiliki gaya angkat (thrust) yang diperoleh melalui (1) [14].

$$F_i = b\omega_i^2, \quad i = 1,2,3,4 \tag{1}$$

dengan F merupakan gaya angkat rotor, i merupakan posisi rotor ke- i , nilai b merupakan nilai konstanta gaya angkat dari baling-baling, dan nilai ω merupakan kecepatan putar baling-baling.

Pemodelan sistem quadrotor dilakukan dengan menggunakan pendekatan persamaan Newton-Euler. Hukum Newton II digunakan untuk mencari hubungan antara gaya dorong F dan percepatan a yang dialami sebuah pusat massa. Hal tersebut ditunjukkan pada (2). Gaya angkat pada quadrotor merupakan hasil dari total gaya angkat pada masing-masing rotor pada quadrotor. Gaya total didapatkan menggunakan (3).

$$F = ma \tag{2}$$

$$F_T = u_1 = \sum_{i=1}^4 F_i \tag{3}$$

Pergerakan quadrotor pada sumbu z bumi dapat dimodelkan dengan hukum Newton II pada (2) sehingga dapat diturunkan menjadi (4) sesuai dengan gaya yang terjadi pada masing-masing sumbu translasi.

Gerakan translasi pada sumbu z bumi nilai gaya F dikurangi dengan berat quadrotor. Pada saat pergerakan translasi pada sumbu y bumi, sudut yang berubah hanya sudut ψ (yaw). Sudut θ (pitch) dan ϕ (roll) dianggap tidak mengalami perubahan sehingga dianggap bernilai 0. Hal tersebut membuat (4) dapat disederhanakan menjadi (5) dan (6) menunjukkan gerakan translasi yang bekerja pada sumbu z .

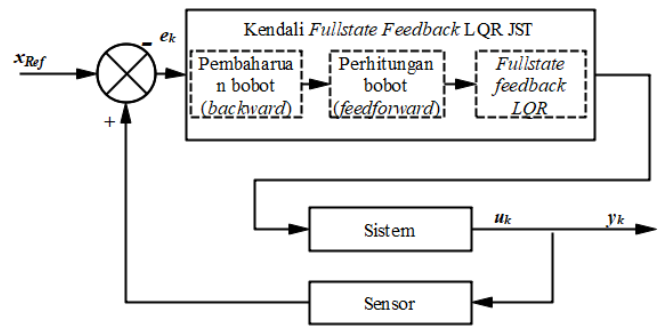
$$m\dot{z} = -(\cos \phi \cos \theta)F_T + mg \tag{4}$$

$$m \cdot \ddot{z} = -F_T + m \cdot g \tag{5}$$

$$\ddot{z} = -\frac{1}{m}F_T + g \tag{6}$$

Kestabilan terbang pada quadrotor dikatakan baik pada gerakan rotasi jika quadrotor dapat mempertahankan sudut rotasi pada nilai toleransi sebesar 5% [15]. Guna memperoleh data ketinggian pada sistem ini, digunakan pembacaan ketinggian dengan sensor ultrasonik. Prinsip kerja sensor tersebut adalah dengan mengirimkan gelombang dari pemancar yang kemudian dipantulkan oleh permukaan di bawah wahana quadrotor. Hasil pemantulan tersebut diterima oleh peranti penerima. Pembacaan ketinggian dari wahana diperoleh dengan cara membagi dua hasil kali dari waktu dan kecepatan rambat gelombang.

Sistem kendali full state feedback LQR pada wahana ini dikombinasikan dengan sistem jaringan saraf tiruan [16]. Sistem jaringan saraf tiruan digunakan untuk menala komponen full state feedback K agar dapat menyesuaikan dengan gangguan saat mempertahankan ketinggian wahana quadrotor. Sistem jaringan saraf yang diimplementasikan pada wahana ini menggunakan tiga buah layer, berupa input layer, hidden layer, output layer. Penalaan komponen K pada sistem ini dilakukan saat wahana quadrotor terbang mempertahankan ketinggian.



Gbr. 3 Sistem kendali penahan ketinggian.

Kendali ketinggian pada sistem ini memiliki beberapa parameter keberhasilan sistem. Nilai toleransi pada sistem nonlinier orde 2 adalah 5% pada toleransi steady-state error [15]. Pada kendali ketinggian quadrotor, sistem dapat menjaga ketinggian terhadap nilai acuan posisi z vertikal yang ditentukan pengguna dengan toleransi 5% dari ketinggian nilai acuan terhadap permukaan bumi. Ketinggian yang dapat ditentukan oleh pengguna sebesar 1 m. Hal tersebut ditentukan dari kemampuan sensor yang digunakan.

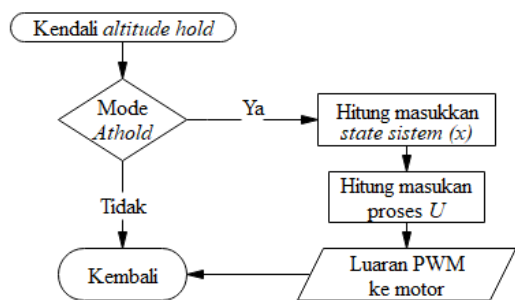
A. Rancangan Sistem Kendali

Sistem kendali full state feedback LQR dengan menggunakan sistem jaringan saraf tiruan diusulkan pada makalah ini untuk mempertahankan ketinggian wahana quadrotor saat terbang. Sistem ini tertanam pada pengendali yang terdapat pada wahana quadrotor.

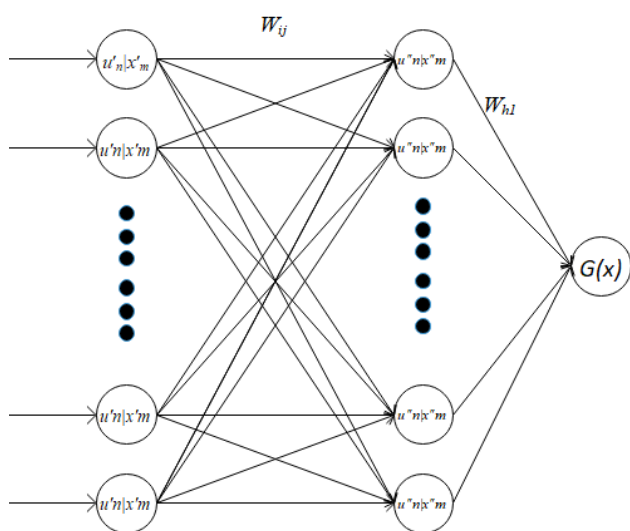
Rancangan sistem kendali memperahankan ketinggian pada wahana ini ditunjukkan pada Gbr. 3. Sistem ini memperoleh masukan nilai acuan yang telah ditentukan sebelumnya. Nilai acuan kemudian dibandingkan dengan nilai bacaan sensor ketinggian. Selisih dari kedua nilai tersebut merupakan nilai error. Nilai error tersebut menjadi masukan sistem kendali dan sistem jaringan saraf tiruan. Sistem jaringan saraf menjadikan nilai error sebagai masukan dan menghitung nilai keluaran jaringan. Hasil dari penalaan sistem jaringan saraf tiruan tersebut digunakan oleh sistem kendali full state feedback LQR untuk memberikan sinyal kendali pada sistem aktuator. Hasil dari keluaran sinyal kendali tersebut kemudian dibaca oleh sensor kembali yang selanjutnya akan menjadi masukan sistem selanjutnya.

Sistem kendali pada quadrotor untuk kendali ketinggian menggunakan dua belas state dari masukan sensor dengan dua state untuk kendali ketinggian. Hasil dari masukan state tersebut kemudian dimasukkan pada sistem full state feedback dengan mengalikan hasil masukan dengan konstanta K berupa matriks (12x4). Sistem jaringan saraf tiruan ini akan mengubah nilai K yang telah ditala dengan sistem LQR. Masukan jaringan saraf tiruan ini menggunakan masukan yang sama dengan masukan sistem kendali full state feedback pada quadrotor.

Sistem kendali ketinggian (altitude hold) pada makalah ini ditunjukkan pada Gbr. 4. Pada saat kendali ketinggian diaktifkan, sistem akan menghitung masukan state sistem. Nilai U selanjutnya dihitung, yang berupa masukan proses dengan kalkulasi perhitungan hasil perkalian antara gain feedback



Gbr. 4 Alur kendali ketinggian.



Gbr. 5 Arsitektur jaringan saraf tiruan.

dengan *state* sistem yang akan dikendalikan. Hasil perhitungan tersebut kemudian dikonversi menjadi sinyal kendali untuk mengatur kecepatan setiap rotor.

B. Sistem Jaringan Saraf Tiruan

Masukan sistem jaringan saraf tiruan adalah *input layer*. Masukan sistem ini merupakan bacaan masing-masing sensor yang digunakan. Kendali penahan ketinggian menggunakan dua masukan, yaitu ketinggian serta kecepatan perubahan ketinggian wahana. Sistem jaringan saraf tiruan yang digunakan ditunjukkan pada Gbr. 5.

Hidden layer jaringan saraf tiruan ditentukan sesuai banyaknya *state* sistem yang akan dikendalikan. Sistem pada jaringan ini menggunakan dua belas *state* sistem dengan 48 jumlah konstanta *feedback* yang dikalkulasi. Pada sistem ini hanya diaktifkan dua *state* sistem untuk kendali ketinggian. Masukan dari *hidden layer* pada jaringan saraf tiruan adalah hasil jumlahan dari perkalian bobot W_{ij} dengan nilai hasil aktivasi *node* tersebut, dengan i merupakan urutan *node* masukan dan j merupakan urutan *node* *hidden*.

Pada *output layer* terdapat satu *node* yang memperoleh nilai dari hasil jumlahan dari perkalian bobot W_{hl} dan keluaran dari *node* *hidden*. Fungsi aktivasi yang digunakan pada setiap *node* pada ketiga lapisan adalah fungsi aktivasi *sigmoid*. Fungsi aktivasi *sigmoid* tersebut digunakan untuk menjaga nilai

masing-masing *node* pada setiap lapisan agar tidak berlebih dan masih saling berkorelasi pada setiap lapisan. Sistem jaringan saraf ini menggunakan inisialisasi bobot awal seperti pada (7).

$$W_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sedangkan untuk nilai bobot jaringan saraf dari *hidden layer* ke *output layer* digunakan nilai awal konstanta K hasil dari penalaan menggunakan metode LQR. Nilai acuan awal bobot pada jaringan akan ditala dengan metode jaringan saraf tiruan, sehingga dapat menyesuaikan dengan masukan sistem pada kendali ketinggian.

C. Algoritme Back-propagation

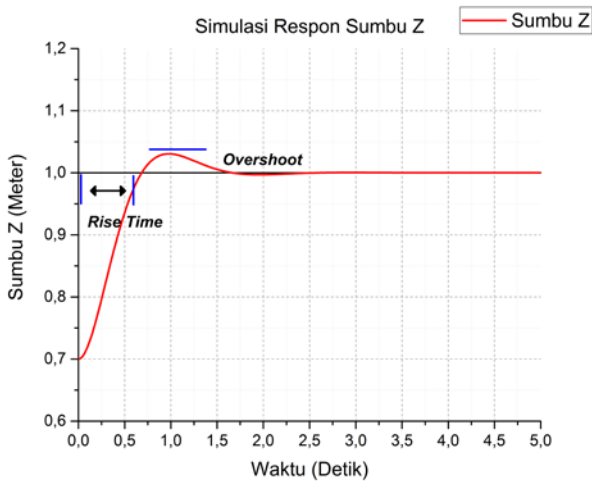
Nilai konstanta K pada sistem LQR merupakan nilai yang optimal berdasarkan nilai simulasi. Sistem jaringan saraf tiruan ini mengubah nilai K agar sesuai dengan gangguan secara *real-time*. Sistem jaringan saraf tiruan pada rancangan kendali ini menggunakan nilai *error* sistem yang berasal dari pembacaan sensor secara *real-time*. Respons sistem dianalisis dengan menghitung nilai *error* keluaran sistem yang berupa dua belas keadaan yang direpresentasikan dengan nilai masukan sistem.

Nilai *error* sebagai masukan umpan balik sistem *quadrotor* menjadi nilai acuan dalam proses pembelajaran jaringan saraf tiruan seperti terlihat pada (8). Menggunakan sistem pembelajaran tersebut, sistem jaringan saraf tiruan mengubah nilai K sesuai dengan besar kecilnya gangguan yang terjadi.

$$J = E_p = \sum_n \frac{1}{2} (y_{(n)} - X_{ref(n)})^2 \quad (8)$$

Hasil akhir dari jaringan saraf tiruan pada sistem ini digunakan untuk meminimalkan nilai rerata kesalahan sistem yang dikuadratkan (J). Pada sistem ini digunakan fungsi *error* pada (8). Nilai y merupakan keluaran sistem berupa bacaan sensor. Nilai X_{ref} merupakan nilai acuan sistem yang telah ditentukan. Selisih dari kedua nilai tersebut merupakan sebuah nilai *error*. Nilai n merupakan banyaknya *state* yang diamati pada sistem ini, yaitu sebanyak dua belas *state* sistem.

Perubahan nilai bobot diatur dengan menggunakan fungsi *learning rate* (η) dengan fungsi pembaharuan bobot sebesar 0,01. Nilai bobot W_{hl} selalu berubah, bergantung pada masukan sistem jaringan saraf tiruan. Nilai bobot tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan keluaran pada sistem kendali *full state feedback*. Untuk mencari nilai bobot dari *node* ke W_{hl} *hidden layer* ke *output layer*, digunakan (3) dan (4).



Gbr. 6 Hasil uji simulasi.

TABEL I
NILAI KONSTANTA FEEDBACK HASIL SIMULASI

Q	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 360 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
K	$[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 18,9737 \ 5,6158 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

$$w_{hl}(k+1) = w_{hl}(k) - \eta \frac{\partial j}{\partial w_{hl}} \tag{9}$$

$$\frac{\partial j}{\partial w_{hl}} = x_h^2(k) \cdot \frac{y(k) - y(k-1)}{u(k) - u(k-1)} \cdot \sum_n \frac{1}{2} (y_{(n)} - X_{ref(n)})^2 \tag{10}$$

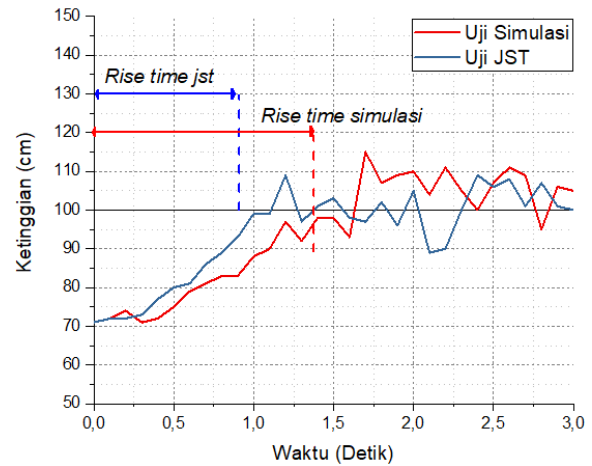
dengan η adalah *learning rate*. Persamaan (9) kemudian dijabarkan pada (10). Nilai u merupakan masukan sistem pada setiap *state* sistem.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada awalnya dilakukan simulasi terhadap sistem untuk memperoleh nilai parameter kendali sistem. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai komponen K pada sumbu z . Parameter yang dilihat pada proses simulasi ini yaitu *overshoot*, *rise time*, *steady state error*, dan kemampuan wahana untuk mendekati nilai referensi masukan. Nilai referensi pada sumbu z untuk simulasi ini menggunakan nilai posisi 1 meter untuk ketinggian dengan nilai gangguan awal sebesar 0,3 meter.

Hasil dari penalaan nilai Q_z dan Q_{v_z} digunakan untuk menentukan nilai kendali *full state feedback* K untuk kendali sistem. Hasil penalaan komponen nilai Q_z dan Q_{v_z} ditunjukkan pada Tabel I. Dari penalaan nilai komponen Q_z didapatkan nilai 360 dan komponen Q_{v_z} dengan nilai 14. Hasil penalaan konstanta *feedback* yang diperoleh yaitu K_z sebesar 18,9737 dan K_{ω_z} sebesar 5,6158.

Hasil dari penalaan masing-masing komponen tersebut diperoleh dari pengamatan terhadap respons sistem dengan gangguan awal, dengan perubahan ketinggian sebesar 0,3 meter. Hasil dari gangguan tersebut kemudian direspons oleh sistem dan respons tersebut dianalisis. Grafik respons sistem pada sumbu z ditunjukkan pada Gbr. 6. Dari hasil respons sistem



Gbr. 7 Hasil pengujian.

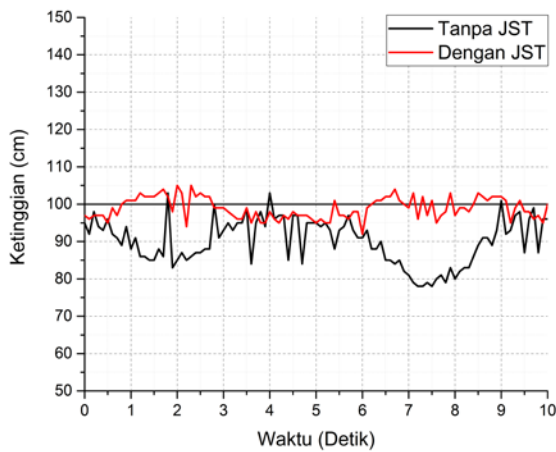
terlihat bahwa *rise time* dan *settling time* bernilai kurang dari 1 detik, *overshoot* mendekati 10% persen, dan nilai *error steady state* 0,2 meter.

Hasil penalaan konstanta *feedback* dengan menggunakan simulasi menunjukkan respons yang sesuai parameter kendali. Hal tersebut terlihat pada Gbr. 6, yaitu nilai *rise time* serta *steady state error* sesuai dengan parameter spesifikasi sistem yang diharapkan. Hal tersebut menunjukkan pemilihan konstanta Q_z dan Q_{v_z} sudah tepat, terlihat dari pengujian, telah mendapatkan respons yang sesuai kriteria sistem [15]. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menanamkan konstanta *feedback* sumbu z pada wahana secara langsung.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menanamkan sistem jaringan saraf tiruan pada kendali sumbu z . Pengujian dilakukan dengan mengamati respons sistem menggunakan nilai K sebagai konstanta *feedback* pada kendali sumbu z . Menggunakan nilai konstanta yang telah ditentukan dari hasil simulasi, sistem diuji dengan melakukan uji terbang pada wahana *quadrotor*. Pengujian dilakukan dengan mengubah posisi ketinggian wahana ke titik tertentu dengan jarak yang ditentukan pada sumbu z . Hasil pengujian, dengan gangguan pada sumbu z dengan parameter hasil simulasi dan parameter hasil penalaan jaringan saraf tiruan, terlihat pada Gbr. 7.

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali dengan gangguan sebesar 30 cm dari nilai *set point* 100 cm. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menanamkan sistem jaringan saraf tiruan pada kendali sumbu z . Pengujian ini dilakukan dengan mengamati respons sistem dengan menggunakan nilai awal konstanta K yang sama dengan konstanta sebelumnya sebagai konstanta *feedback* pada kendali sumbu z . Pengujian dengan menanamkan sistem jaringan saraf tiruan dilakukan sebanyak tiga kali dengan gangguan seperti uji sebelumnya. Hasil pengujian sistem terlihat pada Tabel II.

Respons sistem kendali ketinggian pada sumbu z dengan menggunakan konstanta *feedback* hasil simulasi menunjukkan sistem telah mampu mempertahankan posisi ketinggiannya pada posisi sekitar 1 meter. Walaupun demikian, penggunaan nilai konstanta *feedback* hasil simulasi masih belum mampu mengevaluasi nilai *steady state error* sesuai dengan spesifikasi sistem yang diinginkan, yaitu 5% dari nilai *set point* yang ditentukan.



Gbr. 8 Pengujian sistem tanpa gangguan.

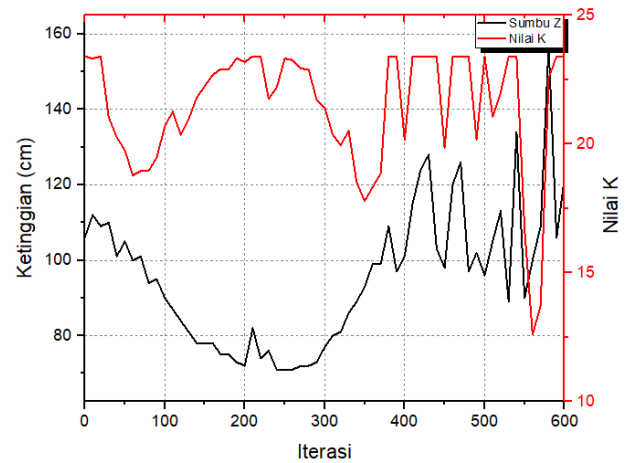
TABEL II
HASIL PENGUJIAN KENDALI KETINGGIAN

Respons transien	Uji Konstanta Hasil Simulasi				Uji Konstanta Hasil JST			
	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata	Uji 1	Uji 2	Uji 3	Rata-rata
Rise time (d)	1,9	1,4	1,4	1,7	1	0,9	0,9	0,93
SEE (cm)	±17				±5			

Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai konstanta *feedback* hasil simulasi masih belum sesuai dengan kebutuhan sesungguhnya wahana saat terbang. Selanjutnya, sistem diberi nilai konstanta *feedback* hasil penalaan jaringan saraf tiruan. Nilai *steady state error* dengan menggunakan kendali jaringan saraf tiruan menunjukkan nilai yang lebih baik dan sesuai dengan spesifikasi sistem. Hal tersebut terlihat dari nilai *steady state error* pada kendali sumbu z dengan jaringan saraf tiruan adalah kurang dari 5% nilai *set point*, yaitu sebesar ± 5 cm. Penggunaan sistem tersebut memperbaiki nilai *steady state error* sebesar ± 17 cm. Hasil pengujian tersebut terlihat pada Gbr. 8.

Respons *rise time* pada kendali ketinggian dengan menggunakan konstanta *feedback* hasil simulasi juga telah dapat mengembalikan posisi *quadrotor* pada ketinggian yang ditentukan saat dikenai gangguan. Hasil respons tersebut kemudian dibandingkan dengan menggunakan sistem jaringan saraf tiruan.

Respons sistem dengan menggunakan konstanta *feedback* hasil penalaan jaringan saraf tiruan menunjukkan respons yang lebih baik dengan memperbaiki respons hingga $\pm 0,77$ detik. Nilai besaran perubahan konstanta *feedback* pada sumbu z memiliki perubahan yang tidak signifikan pada pengujian. Perubahan nilai konstanta *feedback* tidak signifikan terhadap perubahan *error* yang terjadi, seperti terlihat pada Gbr. 9. Nilai perubahan konstanta yang tidak berlebih tersebut membantu respons sistem agar tidak memberikan respons yang terlampaui besar sehingga memperbesar nilai *overshoot* dan nilai *steady state error*.



Gbr. 9 Grafik perubahan nilai konstanta K.

Pada kendali dengan menggunakan jaringan saraf tiruan juga diamati perubahan nilai konstanta K_z dan K_{ω_z} . Nilai konstanta K_z dan K_{ω_z} berubah sesuai dengan nilai *error* yang masuk pada sistem kendali. Nilai konstanta K_z berkisar antara 13,5 hingga 22,9 pada pengujian, seperti terlihat pada Gbr. 9, sedangkan nilai konstanta K_{ω_z} berkisar antara 5,85 hingga 6,14 saat terdapat gangguan. Pada pengamatan dibutuhkan seratus iterasi penalaan jaringan saraf tiruan dari awal sistem dikenai gangguan hingga sistem menjadi stabil dengan waktu respons sekitar 1 detik.

IV. KESIMPULAN

Hasil pengujian, yang dilakukan dengan melakukan simulasi untuk memperoleh nilai parameter awal dan selanjutnya digunakan sebagai nilai acuan pada sistem jaringan saraf tiruan, menunjukkan hasil yang sesuai dengan parameter keberhasilan sistem. Sistem penalaan mandiri komponen *full state feedback* LQR dengan jaringan saraf tiruan pada kendali *quadrotor* dapat menghasilkan respons sistem yang sesuai. Hasil pengujian kendali pada kendali ketinggian dengan menggunakan jaringan saraf tiruan pada kendali *full state feedback* LQR memperbaiki *rise time* dan *steady state error* sesuai dengan spesifikasi sistem dibandingkan dengan kendali *full state feedback* LQR dengan konstanta hasil simulasi.

Pengujian dengan JST memperbaiki hasil pengujian pada sumbu z dengan menggunakan jaringan saraf tiruan pada kendali *full state feedback* dengan LQR memperbaiki *rise time* hingga $\pm 0,77$ detik dan *steady state error* hingga ± 12 cm. Nilai masing-masing konstanta *feedback* pada kendali *full state feedback* berubah sesuai dengan kebutuhan sistem saat dikenai gangguan. Nilai perubahan konstanta *feedback* ditala menggunakan sistem jaringan saraf tiruan.

Pada hasil pengujian terbang, terlihat bahwa penggunaan sistem jaringan saraf tiruan pada kendali ketinggian *quadrotor* untuk menala konstanta K dapat menghasilkan respons yang lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa jaringan saraf tiruan. Hal ini dikarenakan sistem jaringan saraf tiruan secara *real-time* mengubah nilai konstanta K untuk masukan kendali sistem agar sesuai dengan gangguan yang terjadi.

Pada proses pengujian gangguan yang besar, 30% dari nilai acuan ketinggian, terlihat respons yang lebih baik saat menggunakan sistem jaringan saraf tiruan. Pada pengujian dengan gangguan kecil maupun gangguan terbang yang sebenarnya, sistem dapat mempertahankan ketinggian dengan nilai *steady state error* yang sesuai dengan nilai parameter sistem yang ditentukan.

Berdasarkan hasil ini, sistem kendali *full state feedback* LQR dengan jaringan saraf tiruan dapat dikembangkan menjadi salah satu pilihan kendali untuk wahana *quadrotor*. Pada pengembangan selanjutnya, sistem dapat juga diimplementasikan pada wahana UAV jenis lain yang disesuaikan dengan kebutuhannya.

V. SARAN

Pada makalah ini masih terdapat beberapa hal yang dapat disempurnakan. Untuk pengembangan selanjutnya, terdapat saran-saran yang dapat digunakan untuk penelitian yang akan datang. Penelitian dapat menambahkan kendali integral untuk kendali masing-masing *state* dengan menambahkan sistem jaringan saraf sebagai alat untuk penalaan, agar sistem dapat mendekati nilai referensi dengan baik serta dilakukan penalaan komponen secara *online* dalam pembelajaran jaringan saraf tiruan untuk memperoleh nilai serta pembelajaran secara *online* pada wahana saat terbang.

Penggunaan sistem jaringan saraf tiruan secara *online* dapat dikembangkan dengan menggunakan sistem komputerisasi yang lebih kompleks dan kuat. Hal tersebut diharapkan dapat memberikan respons yang baik, didukung dengan banyaknya perangkat keras komputer mini yang sudah banyak tersedia.

Pada kendali ketinggian wahana dapat digunakan beberapa sensor yang menghasilkan bacaan yang lebih baik, baik dalam hal ketelitian, respons waktu pembacaan, maupun dalam hal jauhnya kemampuan ukur ketinggian pada sensor tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Magister Ilmu Komputer Universitas Gadjah Mada atas segala ilmu dan fasilitasnya.

REFERENSI

- [1] D. Matouk, O. Gherouat, F. Abdessemed, dan A. Hassam, "Quadrotor Position and Attitude Control via Backstepping Approach," *Proc. 2016 8th Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2016*, 2016, hal. 73–79.
- [2] D. Shatat dan T. A. Tutunji, "UAV Quadrotor Implementation: A Case Study," *2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2014*, 2014, hal. 1–6.
- [3] L. Keke, C. Yong, dan L. Songlin, "Research on Integrated Attitude Determination Methods Based on MEMS Device for Quadrotor UAVs," *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. Unmanned Syst. ICUS 2017*, 2017, hal. 150–155.
- [4] D.H. -Rui dan L. Bo, "Altitude Control Algorithm Design of the Quadrotor Aircraft," *Proceedings - 2017 Chinese Automation Congress, CAC 2017*, 2017, hal. 6022–6026.
- [5] A.E. Mulyono, A. Triwiyatno, dan Sumardi, "Desain Sistem Kontrol LQIT-Gain Scheduling PID untuk Way Point Tracking Control Quadrotor UAV," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, Vol. 3, No. 2, hal. 129–135, 2014.
- [6] T.K. Priyambodo, A. Dharmawan, O.A. Dhewa, dan N.A.S. Putro, "Optimizing Control Based on Fine Tune PID using Ant Colony Logic for Vertical Moving Control of UAV System," *AIP Conf. Proc.* 1755, 2016, hal. 170011-1-6.
- [7] E.C. Suicmez dan A.T. Kutay, "Attitude and Altitude Tracking of Hexacopter via LQR with Integral Action," *2017 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. ICUAS 2017*, 2017, hal. 150–159.
- [8] E. Lavretsky dan K. Wise, *Robust and Adaptive Control*, London, UK: Springer, 2013.
- [9] A. Dharmawan dan I.F. Arismawan, "Sistem Kendali Penerbangan Quadrotor pada Keadaan Melayang dengan Metode LQR dan Kalman Filter," *Indonesian J. Electron. Instrum. Syst. (IJEIS)*, Vol. 7, No. 1, hal. 49–60, 2017.
- [10] C. Sun, T. Lu, dan K. Yuan, "Balance Control of Two-wheeled Self-balancing Robot Based on Linear Quadratic Regulator and Neural Network," *2013 Fourth Int. Conf. Intell. Control Inf. Process.*, 2013, hal. 862–867.
- [11] P. Gautam, "Optimal Control of Inverted Pendulum System Using ADALINE Artificial Neural Network with LQR," *2016 Int. Conf. Recent Adv. Innov. Eng.*, 2016, hal. 1–6.
- [12] S. Kusumadewi dan S. Hartati, *Neuro-Fuzzy: Integrasi Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf*, 2nd ed. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2010.
- [13] L.R.G. Carrillo, A.E.D. López, R. Lozano, dan C. Pégard, *Quadrotorcraft Control*, Vol. 1, London, UK: Springer London, 2013.
- [14] P. Pounds, R. Mahony, dan P. Corke, "Modelling and Control of a Quadrotor Robot," *Proc. of the 2006 Australasian Conf. on Robotics and Automation*, 2006, hal. 1–10.
- [15] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed., Vol. 17, London, UK: Pearson, 2010.
- [16] F.F. Rahani dan T.K. Priyambodo, "Penalaan Mandiri Full State Feedback dengan LQR dan JST Pada Kendali Quadrotor," *Indonesian J. Electron. Instrum. Syst. (IJEIS)*, Vol. 9, No. 1, hal. 21–32, 2019.