

PERBANDINGAN KINERJA KONTROL OPTIMAL LINEAR QUADRATIC INTEGRAL TRACKING DENGAN ALGORITMA GENETIKA DAN LINEAR QUADRATIC TRACKING UNTUK PENGENDALIAN KETINGGIAN AIR DAN TEMPERATUR UAP PADA MODEL STEAM DRUM BOILER

Rosdiana Fajar Mardhika^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

^{*)}*Email:* rosdianafajar@gmail.com

Abstrak

Steam drum adalah suatu alat pada *boiler* yang berfungsi menampung air dari *feedwater system* dalam pembuatan uap yang temperaturnya tinggi dan memisahkan fluida antara fase gas dan fase cair. Keberadaannya dalam sistem *boiler*, memegang peranan yang penting. Pengukuran ketinggian air dan temperatur uap pada steam drum adalah hal yang sangat penting untuk *safety* dan efisiensi operasional dari *boiler*. Penelitian ini dilakukan untuk merancang sistem kontrol yang mampu menjaga ketinggian air dan temperatur uap *steam drum boiler* pada nilai normal *setpoint*. Kontroler yang digunakan pada penelitian ini yaitu menggunakan metode kontrol *Linear Quadratic Integral Tracking* (LQIT) menggunakan optimasi algoritma genetika dan menggunakan metode kontrol *Linear Quadratic Tracking* (LQT). Kedua kontroler tersebut digunakan karena merupakan sistem kontrol optimal yang bertujuan “memaksa” keluaran agar keluaran yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan. Hasil simulasi yang diperoleh berupa respon sistem menggunakan kontroler LQIT yang dioptimasi dengan algoritma genetika yang dibandingkan dengan LQT. Dari pengujian yang dilakukan, diketahui bahwa respon sistem dengan LQT memiliki kinerja yang lebih baik dibanding LQIT dengan optimasi algoritma genetika. Namun, baik LQT maupun LQIT dengan optimasi algoritma genetika belum dapat mengatasi gangguan eksternal yang terjadi pada sistem karena respon tidak dapat kembali pada *setpoint*.

Kata kunci: LQIT, LQT, ketinggian air, algoritma genetika, steam drum boiler, dan temperatur uap

Abstract

A steam drum is a device on boiler that is used to receive water from feedwater system in steam production which has a high temperature and to separate the fluid between gas phase and liquid phase. Its existence in the boiler system has an important role. The measuring of water level and steam temperature on a steam drum is a very important thing for the safety and operational efficiency from the boiler. This research is conducted to design a control system which is able to maintain the water level and the steam temperature of steam drum boiler at setpoint value. Controller which is used in this research were Linear Quadratic Integral Tracking control method (LQIT) using genetic algorithm optimization and control method of Linear Quadratic Tracking (LQT). Both controller are used because it is an optimal control system which aims to force an output value so the output value that is produced is in accordance with the desired value. The result of the simulation which is in the form of system response using LQIT controller which is optimized with genetic algorithm and then compared with LQT. From the experiment, it is found that LQT has a better performance than LQIT with genetic algorithm optimization. Nevertheless, LQT or LQIT with genetic algorithm optimization cannot solve external distraction which happens on the system yet because the response cannot return to the setpoint.

Keyword : LQIT, LQT, water level, genetic algorithm, steam drum boiler

1. Pendahuluan

Prinsip kerja PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) secara umum adalah pembakaran bahan bakar untuk

memanaskan air dan mengubah air tersebut menjadi uap yang sangat panas yang digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan tenaga listrik dari kumparan medan magnet di generator. Uap yang dibangkitkan ini

berasal dari perubahan fase air yang berada pada boiler akibat mendapatkan energi panas dari pembakaran bahan bakar. Secara garis besar sistem pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari beberapa peralatan utama diantaranya: boiler, turbin, generator, dan kondensor.

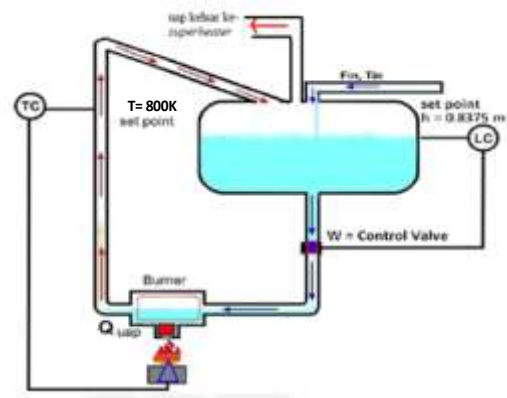
Steam drum adalah suatu alat pada boiler yang berfungsi menampung air dari *feedwater system* dalam pembuatan uap yang temperaturnya cukup tinggi dan memisahkan fluida antara fase gas dan fase cair. Keberadaannya dalam sebuah sistem *boiler*, memegang peranan yang sangat penting. Variabel yang dianalisa dalam *steam drum boiler* adalah ketinggian air dan temperatur uap. Pengukuran ketinggian air dan temperatur uap pada *steam drum* adalah hal yang sangat penting untuk *safety* dan *efisiensi* operasional dari *boiler*. Dapat dikatakan bahwa *steam drum boiler* adalah jantung dari sebuah *boiler*. Disinilah uap yang digunakan untuk memutar turbin pertama kali dihasilkan. Maka diperlukan suatu pengontrol yang dapat mengendalikan ketinggian air dan temperatur uap pada *steam drum boiler* secara optimal.

Pada tugas akhir ini, dilakukan penelitian untuk merancang sistem kontrol yang mampu menjaga ketinggian air dan temperatur uap *steam drum boiler* pada nilai normal *setpoint* meskipun terjadi perubahan beban maupun masukan pada sistem. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga keamanan dan efisiensi kerja *steam drum boiler*. Kontroler yang digunakan pada penelitian ini yaitu menggunakan metode kontrol *Linear Quadratic Integral Tracking* (LQIT) menggunakan optimasi algoritma genetika dan menggunakan metode kontrol *Linear Quadratic Tracking* (LQT). Tujuan dari menggunakan kedua kontroler tersebut yaitu mengetahui kinerja dari kedua kontroler tersebut untuk mengontrol sistem agar mampu mengikuti *setpoint* yang telah ditentukan (*tracking*).

2 Metode

2.1 Steam Drum Boiler

Dapat dikatakan bahwa *steam drum boiler* adalah jantung dari sebuah *boiler* yang menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin. Pada pengendalian ketinggian air pada *steam drum boiler* ini, ketinggian air dipertahankan pada ketinggian *NWL* (*normal water level*) dan temperatur uap juga dipertahankan pada *setpoint*. Apabila terjadi suatu gangguan pada salah satu variabel tersebut, maka proses secara keseluruhan akan terganggu. Oleh karena itu, model matematika dari *steam drum boiler* dibentuk oleh dua variabel yaitu ketinggian air dan temperatur uap. Skema sistem *steam drum boiler* ditampilkan melalui Gambar 1.



Gambar 1. *Steam drum boiler*[16]

Persamaan model matematis ketinggian air pada *steam drum boiler* [2]:

$$A \frac{dh}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (1)$$

$$\text{dengan } F_{out} = kw\sqrt{h} \quad (2)$$

sedangkan persamaan model matematis dari temperatur uap *steam drum boiler*^[2] adalah:

$$Ah \frac{dT}{dt} = F_{in}(T_{in} - T) + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (3)$$

Keterangan:

F_{in} : *Flow* air yang masuk (kg/menit)

F_{out} : *Flow* air yang keluar (kg/menit)

T : Temperatur uap (K)

T_{in} : Temperatur air yang masuk (K)

Q : *Flow* uap (kg/menit)

V : Volume air (m^3)

A : Luas *steam drum boiler* (m^2)

h : Ketinggian air (m)

ρ : Massa jenis air (kg/m^3)

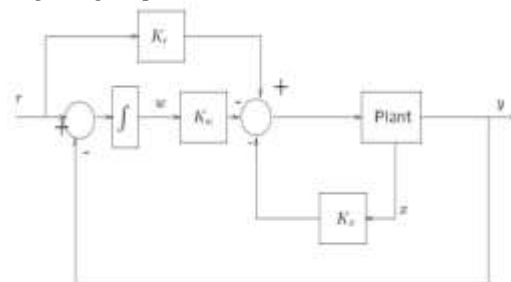
C_p : Kapasitas panas dalam *steam drum* (J/kg K)

w : *control valve flow* air (m)

k : koefisien *control valve* (Cv/jam)

2.2 Linear Quadratic Integral Tracking

Linear Quadratic Integral Tracking merupakan sistem kontrol optimal yang bertujuan untuk “memaksa” keluaran agar keluaran yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan. Gambar 2.3 merupakan diagram blok *tracking integral problem* [5].



Gambar 2. Diagram blok *tracking integral problem* [5]

Diberikan sebuah sistem

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

dan persamaan keluaran

$$y = Cx \quad (5)$$

Pada keadaan tunak sudah tidak ada lagi perubahan keadaan, diasumsikan untuk sebuah referensi keluaran r terdapat kombinasi variabel keadaan \bar{x} dan masukan \bar{u} yang membuat $y = r$.

Sehingga

$$\dot{\tilde{x}} = 0 \quad (6)$$

$$\tilde{x} = A\bar{x} + B\bar{u} \quad (7)$$

$$-A\bar{x} = B\bar{u} \quad (8)$$

$$\bar{x} = -A^{-1}B\bar{u} \quad (9)$$

dengan mensubstitusikan Persamaan (9) ke Persamaan (5), diperoleh

$$\bar{y} = -CA^{-1}B\bar{u} = r \quad (10)$$

$$\bar{u} = -[CA^{-1}B]^{-1}r \quad (11)$$

Sebuah pendekatan intuitif untuk membuat keluaran y mengikuti sebuah referensi r yaitu dengan mengganti persamaan keadaan pada LQIT dengan sebuah persamaan *state error*.

Dengan mendefinisikan $\tilde{x} = x - \bar{x}$ dan $\tilde{u} = u - \bar{u}$ maka

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u} \quad (12)$$

Indeks performansi yang sesuai adalah

$$J = \int_0^\infty \tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{u}^T R \tilde{u}, \quad Q \geq 0, R > 0 \quad (13)$$

hukum kontrol umpan balik keadaan menjadi

$$\tilde{u}(t) = -K\tilde{x}(t) \Rightarrow u(t) = \bar{u}(t) - K(x(t) - \bar{x}(t)) \quad (14)$$

dengan

$$K = R^{-1}B^T S \quad (15)$$

dan S adalah solusi persamaan Riccati

$$0 = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q \quad (16)$$

Dengan mengganti nilai untuk \bar{u} dan \bar{x} pada Persamaan 2.28, diperoleh

$$\begin{aligned} u(t) &= -Kx(t) + KA^{-1}[CA^{-1}B]^{-1}r - [CA^{-1}B]^{-1}r \\ &= -Kx(t) + (KA^{-1}B - I)[CA^{-1}B]^{-1}r \\ &= -Kx(t) + Fr \end{aligned} \quad (17)$$

dengan

$$F = (KA^{-1}B - I)[CA^{-1}B]^{-1} \quad (18)$$

Aksi integral pada kontrol *Tracking System* digunakan untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak ketika sistem mendapat gangguan. Integral dari *tracking error* dihasilkan dengan mengikuti Persamaan (18).

$$\dot{w} = r - y(t) = r - Cx(t) \quad (19)$$

Dengan mendefinisikan sebuah *augmented state error*

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ w \end{bmatrix} \quad (20)$$

maka Persamaan (21) adalah persamaan ruang keadaan *augmented state error*

$$\dot{\hat{x}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}}_{\hat{A}} \hat{x} + \underbrace{\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}}_{\hat{B}} \tilde{u} \quad (21)$$

Indeks performansi yang sesuai adalah

$$J = \int_0^\infty \hat{x}^T Q \hat{x} + \tilde{u}^T R \tilde{u}, \quad Q \geq 0, R > 0 \quad (22)$$

dan hukum kontrol optimal adalah

$$\tilde{u} = -K\hat{x} \quad (23)$$

dengan

$$K = R^{-1}\hat{B}^T S = [K_x \ K_w] \quad (24)$$

dan S adalah solusi persamaan Riccati

$$0 = \hat{A}^T S + S\hat{A} - S\hat{B}R^{-1}\hat{B}^T S + Q \quad (25)$$

Dengan menggunakan definisi untuk \hat{x} dan \tilde{u} , diperoleh

$$u = -K_x \tilde{x} - K_w w + \bar{u} \quad (26)$$

karena $\tilde{x} = x - \bar{x}$, maka

$$u = -K_x(x - \bar{x}) - K_w w + \bar{u} \quad (27)$$

Sebelumnya telah diketahui bahwa $\bar{u} = -[CA^{-1}B]^{-1}r$ dan $\bar{x} = -A^{-1}B\bar{u}$

hukum kontrol optimal menjadi Persamaan (28).

$$u = -K_x x - K_w w + K_r r \quad (29)$$

Dengan nilai K_r didapat dari Persamaan (29).

$$K_r = (K_x A^{-1}B - I)[CA^{-1}B]^{-1} \quad (30)$$

2.3 Algoritma Genetika

Sesuai dengan teori genetika, sebelum algoritma genetika dapat dijalankan, sebuah kode yang sesuai (representatif) untuk persoalan harus dirancang. Untuk ini maka titik solusi dalam ruang permasalahan dikodekan dalam bentuk kromosom/string yang terdiri atas komponen genetik terkecil, yaitu gen. Pemakaian bilangan seperti *integer*, *floating point*, dan abjad sebagai *allele* (nilai gen) memungkinkan operator genetika, yaitu reproduksi (*reproduction*), pindah silang (*crossover*) dan mutasi (*mutation*) untuk menciptakan himpunan titik-titik solusi. Untuk memeriksa hasil optimasi, dibutuhkan fungsi *fitness*, sebagai ukuran dari proses optimasi (dalam istilah teknik optimasi, ini lebih dikenal sebagai fungsi tujuan (*object function*) atau fungsi biaya (*cost function*)). Pada setiap generasi, kromosom akan melalui proses evaluasi dengan fungsi *fitness*. Generasi berikutnya dikenal dengan istilah anak (*offspring*) terbentuk dari gabungan dua kromosom generasi sekarang yang bertindak sebagai induk (*parent*) dengan menggunakan operator penyilangan, suatu kromosom dapat juga dimodifikasi dengan menggunakan operator mutasi^[9]. Selama berjalan, induk harus digunakan untuk reproduksi, pindah silang

dan mutasi untuk menciptakan keturunan. Populasi generasi yang baru dibentuk dengan cara menyeleksi nilai *fitness* dari kromosom induk dan nilai *fitness* dari kromosom anak (*offspring*), serta menolak kromosom-kromosom yang lainnya sehingga ukuran populasi (jumlah kromosom dalam suatu populasi) konstan. Setelah melalui beberapa generasi algoritma ini akan konvergen ke kromosom terbaik [9]. Individu dengan kromosom terbaik inilah yang merupakan solusi dari persoalan yang dicari.

Secara umum hal-hal yang harus dilakukan dalam algoritma genetika adalah sebagai berikut:

1. Mendefinisikan individu.
Suatu individu menyatakan salah satu solusi (penyelesaian) yang mungkin dari permasalahan yang diangkat.
2. Mendefinisikan nilai *fitness*.
Nilai *fitness* merupakan ukuran baik-tidaknya sebuah individu atau baik-tidaknya solusi yang didapatkan.
3. Menentukan proses pembangkitan populasi awal.
Hal ini biasanya dilakukan dengan menggunakan pembangkitan acak seperti *random-walk*.
4. Menentukan proses seleksi yang akan digunakan.
Menentukan proses pindah silang dan mutasi gen yang akan digunakan.

2.4 Linear Quadratic Tracking

Pada *tracking system*, sistem kontrol optimal bertujuan untuk “memaksa” keluaran, agar keluaran yang dihasilkan sesuai dengan yang diinginkan [11].

Diberikan sebuah sistem

$$\dot{x} = Ax + Bu_c \quad (31)$$

dan persamaan keluaran

$$y = Cx \quad (32)$$

Pada keadaan tunak sudah tidak ada lagi perubahan keadaan, diasumsikan untuk sebuah referensi keluaran r terdapat kombinasi variabel keadaan \bar{x} dan masukan \bar{u} yang membuat $y = r$, sehingga [5]

$$\dot{\bar{x}} = 0 \quad (33)$$

$$\bar{\dot{x}} = A\bar{x} + B\bar{u}_c \quad (34)$$

$$-A\bar{x} = B\bar{u}_c \quad (35)$$

$$\bar{x} = -A^{-1}B\bar{u}_c \quad (36)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (36) ke persamaan (37), diperoleh

$$\bar{y} = -CA^{-1}B\bar{u}_c = r \quad (37)$$

$$\bar{u}_c = -[CA^{-1}B]^{-1}r \quad (38)$$

Sebuah pendekatan intuitif untuk membuat keluaran y mengikuti sebuah referensi r yaitu dengan mengganti persamaan keadaan pada LQR dengan sebuah persamaan *state error*.

Dengan mendefinisikan $\tilde{x} = x - \bar{x}$ dan $\tilde{u}_c = u_c - \bar{u}_c$ maka

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u}_c \quad (39)$$

indeks performansi yang sesuai adalah

$$J = \int_0^{\infty} \tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{u}_c^T R \tilde{u}_c, \quad Q \geq 0, R > 0 \quad (40)$$

hukum kontrol umpan balik keadaan menjadi

$$\tilde{u}_c(t) = -K\tilde{x}(t) \Rightarrow u_c(t) = \bar{u}_c(t) - K(x(t) - \bar{x}(t)) \quad (41)$$

dengan

$$K = R^{-1}B^T S \quad (42)$$

dan S adalah solusi persamaan Riccati

$$0 = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q \quad (43)$$

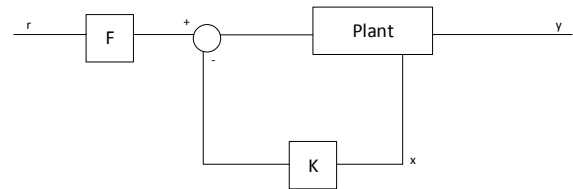
dengan mengganti nilai untuk \bar{u} dan \bar{x} pada persamaan (37), diperoleh

$$\begin{aligned} u_c(t) &= -Kx(t) + KA^{-1}[CA^{-1}B]^{-1}r - [CA^{-1}B]^{-1}r \\ &= -Kx(t) + (KA^{-1}B - I)[CA^{-1}B]^{-1}r \\ &= -Kx(t) + Fr \end{aligned} \quad (44)$$

dengan

$$F = [KA^{-1}B - I][CA^{-1}B]^{-1} \quad (45)$$

nilai gain F juga berfungsi untuk mengurangi *steady state error*.



Gambar 3. Diagram blok kontroler *Linear Quadratic Tracking* [11]

3 Hasil dan Analisis

3.1 Perancangan Simulink Sistem

Pemodelan serta parameter-parameter *plant steam drum boiler* telah diketahui dari penelitian yang dilakukan sebelumnya berdasarkan Tabel 1.

Tabel 1. Parameter fisik model [2] [16]

Parameter	Nilai	Satuan
F_{in}	9,65	kg/menit
F_{out}	$kw\sqrt{h}$	kg/menit
k	1	Cv/menit
w	13,74	m
T	800	K
T_{in}	323	K
Q	11	kg/menit
A	2,202415625	m^2
h	0,8375	m
ρ	1000	kg/ m^3
C_p	79,676	J/kg °K

Persamaan (2.10) dan (2.17) merupakan bentuk sistem non linear. Untuk mendesain kontroler dengan metode LQIT dan LQT maka dibutuhkan plant dalam bentuk persamaan *state* linear. Oleh karena itu, akan dilakukan proses pelinearannya dengan mencari matriks Jacobian. Dilinearkan disekitar nilai setting yaitu $h = 0,8375$ m dan $T = 800$ K serta $w = 13,74$ m dan $Q = 11$ kg/menit sehingga dapat dibentuk matriks persamaan keadaan sistem linear dari model steam drum boiler sebagai berikut [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{kw}{2A\sqrt{h}} & 0 \\ -\frac{F_{in}T_{in}}{Ah^2} + \frac{F_{in}T}{Ah^2} - \frac{Q}{Ah^2\rho C_p} & -\frac{F_{in}}{Ah} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{k\sqrt{h}}{A} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Ah\rho C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (46)$$

Karena keluaran yang dihasilkan yaitu ketinggian air dan temperatur uap, maka matriks persamaan keluaran adalah [2]:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Persamaan model matematika dari steam drum boiler (47) dapat ditulis menjadi bentuk secara umum sebagai berikut [2]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

dengan:

$$x = [x_1 \quad x_2]^T = [h \quad T]^T \quad (48)$$

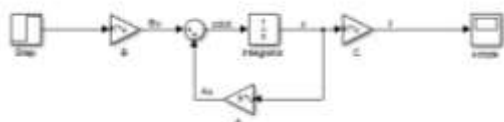
$$u = [v_1 \quad v_2]^T = [w \quad Q]^T \quad (49)$$

dan

$$A = \begin{bmatrix} -3,4085 & 0 \\ -87,4555 & -5,2317 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -0,41552 & 0 \\ 0 & 0,0000068 \end{bmatrix}$$

Dalam menentukan optimal kontrol, maka harus dirancang indeks performansi sedemikian hingga, dalam penelitian ini akan diatur ketinggian air sesuai dengan *normal water level* yaitu 0,8375 m dan temperatur uap sesuai nilai setting yaitu 800 K. Dari Persamaan 3.7 – 3.13, dibuat Simulink untuk sistem linear ketinggian air dan temperatur uap model *plant steam drum boiler* seperti pada Gambar 3.4.

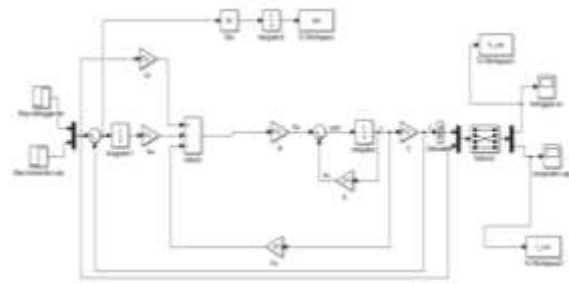


Gambar 4. *Plant linear* ketinggian air dan temperatur uap steam drum boiler

3.1.2 Perancangan Kontroler LQIT-GA

Algoritma genetika pada penelitian ini digunakan sebagai langkah optimasi dari teori desain *linear quadratic*

integral tracking. Skema optimasi yang digunakan adalah LQIT seperti pada gambar 4.



Gambar 5. Diagram skema LQIT pada sistem.

Pada skema LQIT pada gambar 3.7 terdapat 3 jenis parameter kontrol, yaitu K_r , K_w dan K_x . Parameter kontrol itulah yang nantinya akan dicari nilai-nilainya dengan menggunakan algoritma genetika. Ketiga variabel tersebut nantinya akan dijadikan sebagai gen pembentuk individu dalam algoritma genetika.

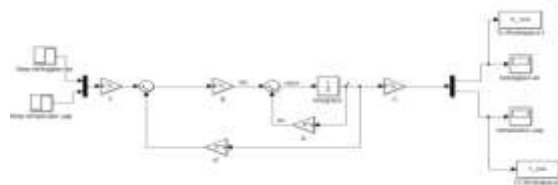
3.1.3 Perancangan Kontroler LQR^(3,8)

Pada perancangan sistem kendali ketinggian air dan temperatur uap pada model *steam drum boiler*, kriteria yang diinginkan adalah respon sistem yang relatif cepat dan penggunaan energi yang relatif kecil. Dengan mendefinisikan Q dan R , didapat:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 \\ 0 & 0,001 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pada kendali optimal LQR dengan *tracking system*, variabel yang perlu dicari adalah nilai konstanta penguatan umpan balik K dan konstanta F .

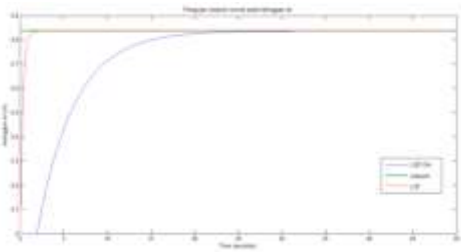


Gambar 6. Diagram skema LQR pada sistem

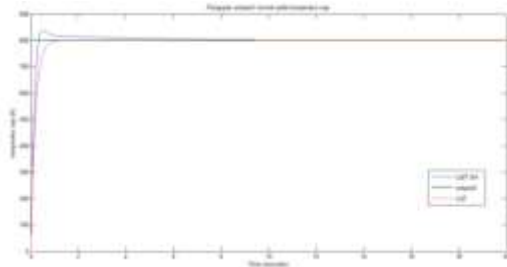
3.2 Pengujian Kontroler

3.2.1 Pengujian terhadap Setpoint Normal

Pengujian terhadap *setpoint* normal dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* sebesar 0,8375 m untuk ketinggian air dan 800°F untuk temperatur uap. Hasil respon sistem ditampilkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.



Gambar 6. Respon ketinggian air steam drum boiler SP=0,8375 m



Gambar 7. Respon temperatur uap steam drum boiler SP=800K

Respon sistem pada ketinggian air dan temperatur uap dengan pengujian terhadap *setpoint* normal dirangkum dalam Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan respon sistem pada ketinggian air dan temperatur uap

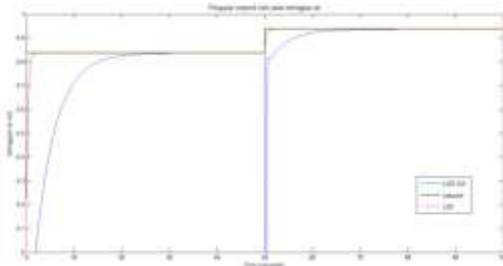
Respon Sistem	LQIT- GA		LQT	
	Ketinggian Air	Temperatur Uap	Ketinggian Air	Temperatur Uap
Delay time (s)	4,78	0,11	0,21	0,13
Rise time (s)	9,66	0,23	0,66	0,41
Peak time (s)	-	0,52	-	-
Maximum overshoot (%)	-	4,73	-	-
Settling time (s)	22,66	6,98	1,64	1,09
IAE	8,84	186,62	0,25	148,44

Dari Tabel 2, dapat diketahui bahwa respon ketinggian air dengan LQT mengalami *delay time* (t_d) yaitu pada detik ke-0,21 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-4,78, *rise time* (t_r) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-0,66 dibanding kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-9,66. Pada kontroler LQIT-GA maupun LQT tidak mengalami overshoot. *Settling time* (t_s) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-1,64 dibanding dengan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-22,66 . Pada temperatur uap, LQT juga mengalami *delay time* (t_d) yaitu pada detik ke-0,13 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-0,11, *rise time* (t_r) pada kontroler LQT yaitu pada detik ke-0,41 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-0,23. Pada kontroler LQIT-GA mengalami *overshoot* sebesar 4,78% sedangkan LQT

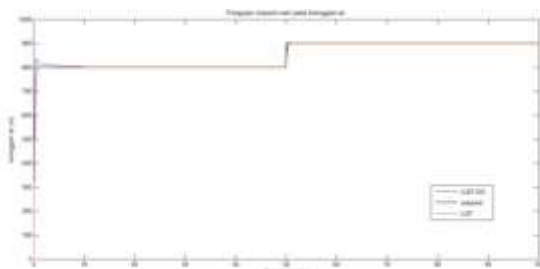
tidak mengalami *overshoot*. *Settling time* (t_s) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-1,09 dibanding dengan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-6,98. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 0,25 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 8,84 dan nilai *Integral Area Error* (IAE) pada temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 148,44 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 186,62. Oleh karena itu, pengujian terhadap *setpoint* normal dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler LQT menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler LQIT-GA.

3.2.2 Pengujian terhadap *Setpoint* Naik

Pengujian terhadap *setpoint* naik dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* dinaikkan sebesar 0,1 m atau dari *setpoint* normal menjadi 0,9375 m untuk ketinggian air. Untuk temperatur uap nilai *setpoint* dinaikkan sebesar 100 K atau menjadi 900 K. Dari pengujian dengan kenaikan *setpoint*, didapatkan hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Respon ketinggian air steam drum boiler setpoint naik



Gambar 9. Respon temperatur uap steam drum boiler setpoint naik

Respon transien pada ketinggian air dan temperatur air dengan pengujian terhadap *setpoint* naik dirangkum dalam Tabel 3

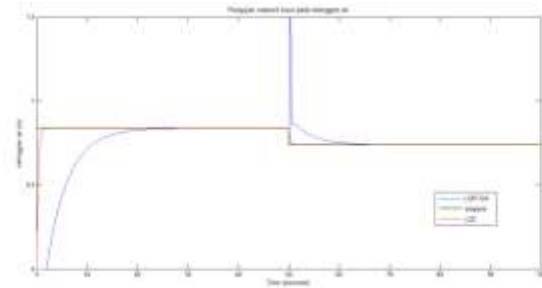
Tabel 3. Perbandingan respon transien pada ketinggian air dan temperatur uap pengujian setpoint naik

Respon Sistem	LQIT- GA		LQT	
	Ketinggian Air	Temperatur Uap	Ketinggian Air	Temperatur Uap
Delay time (s)	4,73	0,11	0,2	0,13
Rise time (s)	9,47	0,24	0,67	0,41
Peak time (s)	-	0,52	-	-
Maximum overshoot (%)	-	4,73	-	-
Settling time (s)	24,66	6,84	1,74	1,04
IAE	9,38	198,02	0,26	157,71

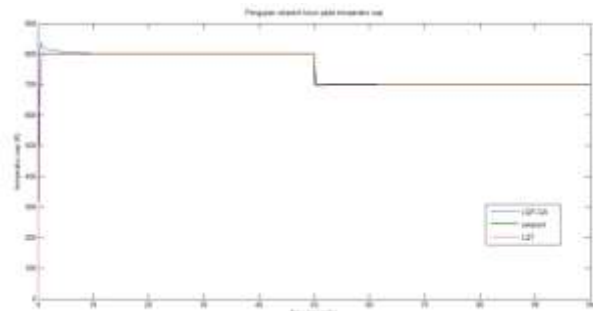
Dari Tabel 3, dapat diketahui bahwa respon ketinggian air dengan LQT mengalami *delay time* (t_d) yaitu pada detik ke-0,2 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-4,73, *rise time* (t_r) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-0,67 dibanding kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-9,47. Pada kontroler LQIT-GA maupun LQT tidak mengalami overshoot. *Settling time* pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-1,74 dibanding dengan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-24,66 . Pada temperatur uap, LQT juga mengalami *delay time* (t_d) yaitu pada detik ke-0,13 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-0,11, *rise time* (t_r) pada kontroler LQT yaitu pada detik ke-0,41 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-0,24. Pada kontroler LQIT-GA mengalami *overshoot* sebesar 4,78% sedangkan LQT tidak mengalami *overshoot*. *Settling time* (t_s) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-1,04 dibanding dengan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-6,84. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 0,26 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 9,38 dan nilai *Integral Area Error* (IAE) pada temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 157,71 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 198,02. Oleh karena itu, pengujian terhadap kenaikan *setpoint* dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler LQT menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler LQIT-GA.

3.2.3 Pengujian terhadap Setpoint Turun

Pengujian terhadap *setpoint* turun dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* diturunkan sebesar 0,1 m atau dari *setpoint* normal menjadi 0,7375 m untuk ketinggian air. Untuk temperatur uap nilai *setpoint* diturunkan sebesar 100 K atau menjadi 700 K. Dari pengujian dengan penurunan *setpoint*, didapatkan hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Respon ketinggian air steam drum boiler setpoint turun



Gambar 11. Respon temperatur uap steam drum boiler setpoint turun

Respon sistem pada ketinggian air dan temperatur air dengan pengujian terhadap *setpoint* turun dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan respon transien pada ketinggian air dan temperatur uap pengujian setpoint turun

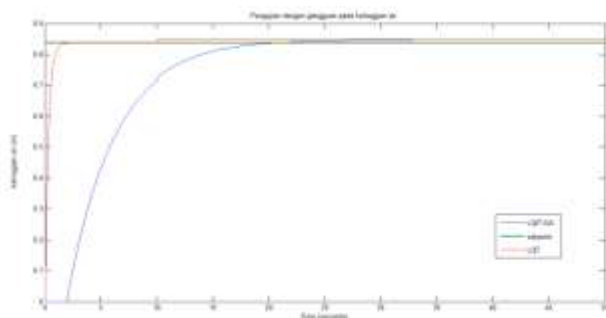
Respon Sistem	LQIT- GA		LQT	
	Ketinggian Air	Temperatur Uap	Ketinggian Air	Temperatur Uap
Delay time (s)	4,43	0,11	0,18	0,13
Rise time (s)	8,47	0,23	0,6	0,41
Peak time (s)	-	0,52	-	-
Maximum overshoot (%)	-	4,73	-	-
Settling time (s)	23,36	6,84	1,48	1,04
IAE	9,37	198,02	0,26	157,71

Dari Tabel 4, dapat diketahui bahwa respon ketinggian air dengan LQT mengalami *delay time* (t_d) pada detik ke-0,18 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-4,43, *rise time* (t_r) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-0,6 dibanding kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-8,47. Pada kontroler LQIT-GA maupun LQT tidak mengalami overshoot. *Settling time* (t_s) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-1,48 dibanding dengan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik

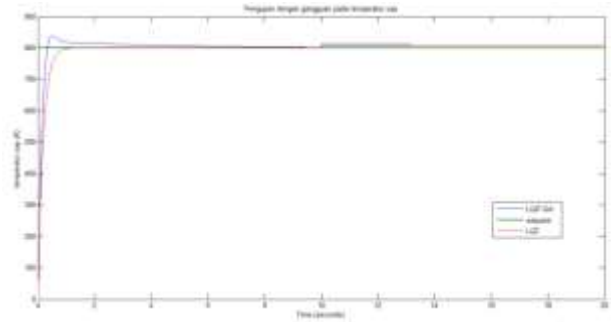
ke-23,36 . Pada temperatur uap, LQT juga mengalami *delay time* (t_d) yaitu pada detik ke-0,13 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-0,11, *rise time* (t_r) pada kontroler LQT yaitu pada detik ke-0,41 dan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-0,23. Pada kontroler LQIT-GA mengalami *overshoot* sebesar 4,78% sedangkan LQT tidak mengalami *overshoot*. *Settling time* (t_s) pada kontroler LQT lebih cepat yaitu pada detik ke-1,04 dibanding dengan kontroler LQIT-GA yaitu pada detik ke-6,84. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 0,26 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 9,367 dan nilai *Integral Area Error* (IAE) pada temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 157,71 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 1978,02. Oleh karena itu, pengujian terhadap penurunan *setpoint* dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler LQT menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler LQIT-GA meskipun terjadi perubahan *setpoint* yang diturunkan.

3.2.4 Pengujian terhadap Gangguan

Pengujian terhadap gangguan dilakukan pada sistem dengan *setpoint* normal yang ditambahkan gangguan berupa sinyal *step* pada menit ke-10 sebesar 0.01 m pada ketinggian air dan 10 K pada temperature uap. Gangguan sinyal *step* pada ketinggian air diibaratkan sebagai penambahan *flow* air masuk ke *steam drum boiler* yang menyebabkan perubahan ketinggian air secara tiba-tiba. Gangguan sinyal *step* pada temperatur uap diibaratkan sebagai penambahan bahan bakar pada *burner* yang menyebabkan proses pemanasan yang lebih cepat dan menghasilkan temperatur uap yang lebih tinggi pula. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui performa kontroler dalam merespon gangguan yang terjadi pada sistem. Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11. Respon ketinggian air *steam drum boiler* dengan gangguan



Gambar 12. Respon temperatur uap *steam drum boiler* dengan gangguan

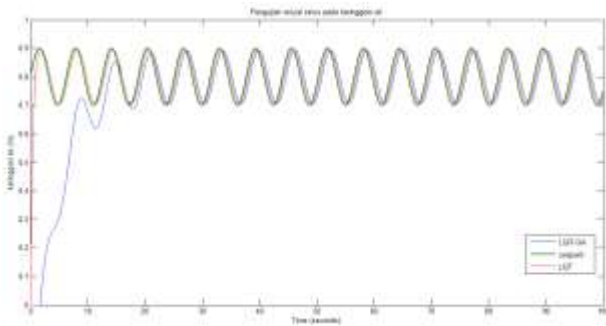
Tabel 5. Perbandingan respon sistem pada ketinggian air dan temperatur uap pengujian terhadap gangguan

Respon Transien	LQIT- GA		LQT	
	Ketinggian Air	Temperatur Uap	Ketinggian Air	Temperatur Uap
<i>Delay time</i> (s)	4,43	0,11	0,18	0,13
<i>Rise time</i> (s)	8,47	0,23	0,6	0,41
<i>Peak time</i> (s)	-	0,52	-	-
<i>Maximum overshoot</i> (%)	-	4,73	-	-
<i>Setting time</i> (s)	17,67	6,84	1,48	1,04
IAE	8,83	186,62	0,25	148,44

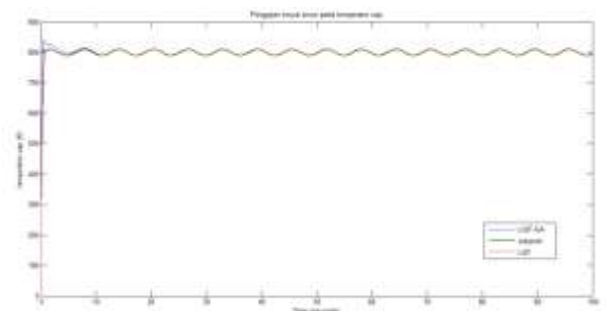
Respon sistem pada ketinggian air dan temperatur air dengan pengujian terhadap gangguan dirangkum dalam Tabel 5. Dari Gambar 11 dan Gambar 12, dapat diketahui bahwa dengan pemberian gangguan sinyal *step* pada ketinggian air, respon dari LQT maupun LQIT-GA tidak dapat kembali mencapai *setpoint* meskipun telah bergerak menuju *setpoint* setelah merespon gangguan yang diberikan. Begitu pula pada temperatur uap. Namun, jika dilihat dari nilai IAE pada ketinggian air dan temperatur uap, kontroler LQT memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan nilai IAE kontroler LQIT-GA.

3.2.5 Pengujian dengan Referensi Sinyal Input Sinus

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai pengujian terhadap sistem kontrol optimal LQIT-GA dan LQT untuk ketinggian air dan temperatur uap pada model *steam drum boiler*, dengan memberikan referensi berupa sinyal input *sinus*, untuk ketinggian air diberikan amplitudo 0,1 dan temperatur uap diberikan amplitudo 10.



Gambar 13. Respon ketinggian air steam drum boiler (amplitudo=0,1)



Gambar 14. Respon temperatur uap steam drum boiler (amplitudo=10)

Respon sistem pada ketinggian air dan temperatur air dengan pengujian terhadap sinyal sinus dirangkum dalam Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan IAE pada ketinggian air dan temperatur uap pengujian dengan referensi sinyal sinus

Respon Transien	LQIT- GA		LQT	
	Ketinggian Air	Temperatur Uap	Ketinggian Air	Temperatur Uap
IAE	10,06	209,91	1,13	194,34

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kinerja kontroler dengan pemberian referensi berupa sinyal sinus telah dilakukan. Dari hasil pengujian kinerja kontroler LQT dan kontroler LQIT-GA mampu mengikuti *tracking* yang telah ditentukan dilihat dari respon pada sistem. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 1,13 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 10,06 dan nilai *Integral Area Error* (IAE) pada temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler LQT sebesar 194,34 lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler LQIT-GA yaitu sebesar 209,91. Oleh karena itu, pengujian terhadap referensi sinyal sinus dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler LQT memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler LQIT-GA.

4 Kesimpulan

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kinerja kontroler dengan perubahan *setpoint*, pemberian gangguan maupun dengan referensi sinyal sinus telah dilakukan. Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa perubahan *setpoint* yang terjadi pada sistem tidak mempengaruhi kinerja kontroler LQT yang lebih baik jika dibandingkan dengan kontroler LQIT-GA dilihat dari respon transien dan nilai IAE yang lebih kecil. Untuk pengujian terhadap gangguan, kontroler LQT maupun LQIT-GA tidak dapat kembali pada *setpoint* yang telah ditentukan setelah merespon gangguan yang diberikan atau dapat dikatakan bahwa kinerja kontroler LQT dan LQIT-GA tidak menunjukkan kinerja yang baik. Pada pengujian dengan referensi sinyal sinus, kinerja kontroler LQT yang lebih baik jika dibandingkan dengan kontroler LQIT-GA dilihat dari nilai IAE yang lebih kecil.

Referensi

- [1] Jamaludin, A.N., *Estimasi Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Steam Drum Boiler*, Skripsi S-1, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2011.
- [2] Anggraeni, I.E., *Pengendalian Optimal Pada Sistem Steam Drum Boiler Menggunakan Metode Linier Quadratic Regulator (LQR)*, Skripsi S-1, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2010.
- [3] Herlambang, Teguh. *Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum Boiler dengan Metode Sliding Mode Control (SMC)*, Skripsi S-1, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya, 2010.
- [4] Stephanopoulos, G., *Chemical Process Control An Introduction to Theory and Practice*, Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliff, New Jersey, 2002.
- [5] Lewis, Frank, dkk. *Optimal Control*. John Wiley & Sons, Inc. 1995.
- [6] Kusumadewi ,S., Purnomo,H., 2005: *Penyelesaian Masalah Optimasi dengan Teknik-Teknik Heuristik*, Graha Ilmu: 2005
- [7] Suyanto, *Algoritma Genetika dalam Matlab*, ANDI : 2005
- [8] Haupt, Randy L., dan Haupt, Sue E., 2004: *Practical Genetic Algorithms*, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [9] Sanjoyo, *Aplikasi Algoritma Genetika*, 2006.
- [10] Safitri, Meilia, *Perancangan Sistem Kendali Genetic-Fuzzy: Studi Kasus pada Pengendalian Top and Side End Point Composition dan Bottom Refluks Temperature pada Distillation Column*, Tugas Akhir S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [11] Yoel, Dista,dkk, *Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal*, Jurnal Transmisi Universitas Diponegoro, 2010
- [12] Santoso, Fendy, *Desain Sistem Kontrol Dengan Metode Penempatan Kutub(Pole Placement) Pada Motor DC Servo*, Program Studi Teknologi Industri Universitas Kristen Petra, 2009

- [13] Wahid, Nurbaiti, dkk, *Comparative Assesment Using LQR and Fuzzy Logic Controller for a Pitch Control System*, European Journal of Scientific Research, 2010.
- [14] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik (Sistem Pengaturan) Jilid 1*, Erlangga, 1989.
- [15] Storn, R. dan Price, K. *Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces*, *Journal of Global Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 11: 341-359, 1997
- [16] Alivia, F.A., *Desain Sistem Kontrol Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Studi Kasus: Pengontrolan Ketinggian Air dan Temperatur Uap Steam Drum Boiler*, Tugas Akhir S-1, Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [17] Triwiyatno, A., Nuh, M., Santoso, A. dan Sutantra I. N., (2011), *Engine Torque Control of Spark Ignition Engine Using Linear Quadratic Integral Tracking (LQIT)*, IPTEK, The Journal for Technology and Science, vol. 22, no. 4, hal 190- 197.