

DESAIN SISTEM KONTROL ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM (ANFIS) STUDI KASUS: PENGONTROLAN KETINGGIAN AIR DAN TEMPERATUR UAP STEAM DRUM BOILER

Fatimah Avtur Alifia^{*)}, Aris Triwiyatno, and Wahyudi

Laboratorium Teknik Kontrol Otomatik, Jurusan Teknik Elektro,
Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Sudharto, SH., Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)} E-mail: fatimahavtur_alifia@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan 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. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) adalah teknik kendali yang merupakan kombinasi dua buah metode yaitu metode fuzzy logic dan neural network. Proses perancangan ANFIS memerlukan pasangan data input-output yang didapat dari kontroler PI yang dianggap sebagai “guru” bagi ANFIS untuk proses pembelajaran. Setelah proses pembelajaran, didapat file FIS yang nilai parameter antecedent dan consequent telah di-update. File FIS tersebut yang diaplikasikan untuk mengontrol sistem steam drum boiler. Implementasi kontroler pada penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan Matlab/simulink. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa respon sistem menggunakan kontroler ANFIS yang dibandingkan dengan PI untuk perubahan setpoint diketahui bahwa respon sistem dengan ANFIS memiliki waktu konstan yang lebih cepat dibanding PI. Namun, ANFIS belum dapat mengatasi gangguan eksternal yang terjadi pada sistem karena respon tidak dapat kembali tepat pada setpoint.

Kata kunci : ANFIS, ketinggian air, matlab/simulink, steam drum boiler, dan temperatur uap

Abstract

The purpose of research is to design a control system that can keep the water level and steam temperature in the steam drum boiler on the setpoint although there was changing of load and input system. Steam drum boiler should be controlled to keep its safety and efficiency. its safety and efficiency. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). It is a combination of fuzzy logic control and neural network. Design ANFIS needs an input/ output data set that was gotten from PI controller that considered as a teacher for ANFIS for training process. After training process, its produce a FIS file that antecedent and consequent parameter value was updated. The updated FIS used to control the system of steam drum boiler. Implementation of controller in this research is simulated using matlab/ simulink. From the result of simulation it can conclude that a respon of system using ANFIS controller that compared with PI controller for changing of setpoint is known that the respon of system using ANFIS has a constant time faster than PI has. But, ANFIS couldn't exceed an external disturbance that happens to system because the output system couldn't back to the setpoint exactly.

Keyword : ANFIS, matlab/ simulink, steam drum boiler, steam temperature, and water level

1. Pendahuluan

Proses di dalam *steam drum boiler* dapat dikatakan sebagai proses nonlinier karena proses ini selalu berubah terhadap waktu proses/ tidak stabil, tergantung dari pasokan air melalui *feedwater* serta uap yang diperlukan oleh beban (turbin). Oleh karena itu, diperlukan

pengendali yang dapat mengatur ketinggian air dan temperatur uap dari *steam drum boiler* sehingga dapat dipertahankan pada nilai normal meskipun terjadi gangguan pada sistem.

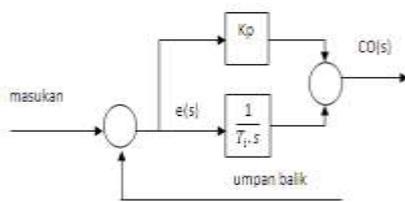
ANFIS adalah teknik kontrol kombinasi dua metode yaitu metode *fuzzy logic* dan *neural network*. Dari kombinasi

tersebut, didapatkan keuntungan dari masing-masing kontroler. Penelitian ini bertujuan untuk merancang suatu sistem pengontrolan ketinggian air dan temperatur uap pada *steam drum boiler*^[2] dengan menggunakan metode kontrol *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). *Software* yang digunakan untuk melakukan pengujian/ simulasi *plant* dan *controller* adalah MATLAB/SIMULINK dan Fuzzy Toolbox. Respon yang dihasilkan sistem dengan kontroler ANFIS akan dibandingkan dengan respon sistem menggunakan PI.

2. Metode

2.1 Kontroler Proporsional Integral (PI)^[20]

Kontroler PI merupakan gabungan dari dua macam kontroler, yaitu kontroler proporsional (*proportional controller*) dan kontroler integral (*integral controller*). Kontroler PI banyak digunakan untuk proses di industri karena permasalahan yang terjadi dapat diatasi secara maksimal hanya dengan kontroler PI. Penambahan kontrol derivatif pada sistem dengan respon yang cepat justru menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Blok kontroler PI ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok kontroler PI

2.2 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) merupakan gabungan antara prinsip belajar dari JST untuk adaptasi fungsi keanggotaan dari *fuzzy*. Kombinasi dari kedua jenis kontroler ini dilakukan untuk saling melengkapi kelebihan dan mengurangi kekurangan masing-masing kontroler. Secara fungsional, arsitektur ANFIS sama dengan *fuzzy rule base* dengan model Sugeno. Dapat dikatakan bahwa ANFIS adalah suatu metode yang menggunakan algoritma pembelajaran terhadap sekumpulan data untuk melakukan penyetelan aturan.^[14]

2.2.1 Arsitektur ANFIS^{[9],[14]}

Misalkan terdapat 2 *input* x dan y dengan masing-masing *input* memiliki 2 buah fungsi keanggotaan. *Output* jaringan yang dihasilkan yaitu f dengan 2 buah fungsi keanggotaan. Jika dalam suatu sistem hanya membutuhkan 2 buah aturan sebagai berikut:

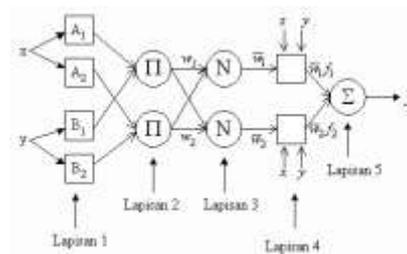
If x is A₁ and y is B₁ then f₁ = p₁₁x₁ + q₁₂x₂ + r₁₀

If x is A₂ and y is B₂ then f₂ = p₂₁x₁ + q₂₂x₂ + r₂₀

maka dapat dihitung nilai rata-rata terbobot sebagai keluaran jaringan (f) dengan nilai *firing strength* untuk kedua aturan adalah w₁ dan w₂:

$$f = \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} = \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \quad (1)$$

ANFIS dibentuk dengan arsitektur jaringan seperti *neural network* yang memiliki beberapa lapisan terdiri dari lapisan *input*, lapisan tersembunyi, serta lapisan *output*. Pada setiap lapisan terdapat proses perhitungan yang pada akhirnya akan menghasilkan *output* jaringan ANFIS. Arsitektur jaringan ANFIS dengan 5 lapisan ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arsitektur Jaringan ANFIS^[9]

Jaringan ANFIS pada Gambar 2. terdiri dari lapisan-lapisan sebagai berikut^{[9],[14]}:

- Lapisan 1: Tiap-tiap neuron *i* pada lapisan pertama adaptif terhadap parameter suatu fungsi aktivasi. *Output* dari tiap neuron berupa derajat keanggotaan yang diberikan oleh fungsi keanggotaan *input*, yaitu: $\mu_{A1}(x)$, $\mu_{B1}(y)$, $\mu_{A2}(x)$, atau $\mu_{B2}(y)$. Fungsi simpul pada lapisan ini adalah:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \text{ untuk } i = 1, 2 \quad (2)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1, 2 \quad (3)$$

Sebagai contoh, misalkan fungsi keanggotaan yang digunakan adalah *generalized bell* berikut:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (4)$$

{a,b,c} adalah parameter-parameter, biasanya b=1. Jika nilai parameter-parameter ini berubah, maka bentuk kurva yang terjadi pun akan ikut berubah. Parameter-parameter pada lapisan ini biasanya dikenal dengan nama *premise parameters*.

- Lapisan 2 : Pada tahap ini berlaku operasi perkalian (AND) antara nilai fuzifikasi dari titik yang ada sebelumnya sebagai proses implikasi *fuzzy*. Persamaan kaluaran pada simpul tetap ini adalah:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \text{ untuk } i = 1, 2 \quad (5)$$

- Lapisan 3: Setiap neuron pada lapisan ini adalah simpul tetap yang merupakan hasil perhitungan rasio dari aturan derajat keanggotaan ke-*i* dengan jumlah dari seluruh aturan derajat keanggotaan, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2 \quad (6)$$

Hasil ini dikenal dengan nama *normalized firing strength*.

- Lapisan 4 : Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul adaptif terhadap suatu *output*:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (7)$$

dengan \bar{w}_i adalah *normalized firing strength* pada lapisan ke-3 dan (p_i, q_i, r_i) adalah parameter-parameter pada neuron tersebut. Parameter-parameter pada lapisan 4 disebut dengan nama *consequent parameters*.

- Lapisan 5 : *Output Layer*. Setiap neuron pada lapisan ini merupakan simpul tunggal tetap yang menghitung keluaran dengan cara menjumlahkan semua masukan.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i f_i} \quad (8)$$

2.2.2 Algoritma Pembelajaran Hybrid^[14]

Proses adaptasi yang terjadi dalam sistem ANFIS dikenal juga dengan proses pembelajaran, yaitu parameter-parameter ANFIS (baik *premise* maupun *consequent*) akan diperbaharui selama proses pembelajaran. Pada saat parameter-parameter tersebut ditemukan, *output* yang terjadi merupakan kombinasi linier dari *consequent parameters*, yaitu^[14]:

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \quad (9)$$

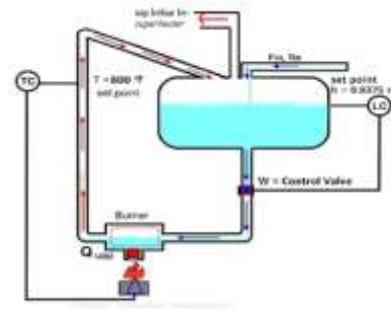
$$= \bar{w}_1 (p_{11}x_1 + q_{12}x_2 + r_{10}) + \bar{w}_2 (p_{21}x_1 + q_{22}x_2 + r_{20}); \quad (10)$$

$$= \frac{(w_1 x_1) p_{11} + (w_1 x_2) q_{12} + \bar{w}_1 r_{10} + (w_1 x_1) p_{21} + (w_2 x_2) q_{22} + \bar{w}_2 r_{20}}{(w_1 x_1) p_{11} + (w_1 x_2) q_{12} + \bar{w}_1 r_{10} + (w_1 x_1) p_{21} + (w_2 x_2) q_{22} + \bar{w}_2 r_{20}} \quad (11)$$

Algoritma pembelajaran *hybrid* akan mengatur parameter-parameter *output* p_{ij} , q_{ij} , dan r_{ij} secara maju (*forward*) dan akan mengatur parameter-parameter himpunan *fuzzy* (a_i , b_i , c_i) secara mundur (*backward*). Pada langkah maju (*forward*), *input* jaringan akan merambat maju sampai pada lapisan ke empat, di mana parameter-parameter p_{ij} akan diidentifikasi menggunakan metode *least square*. Sedangkan pada langkah mundur (*backward*), *error* sinyal akan merambat mundur dan parameter-parameter (a_i , b_i , c_i) akan diperbaiki dengan menggunakan metode *backpropagation gradient-descent*.

2.3 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 3.



Gambar 3. Steam drum boiler^[2]

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

$$A \frac{dh}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad (12)$$

$$\text{dengan } F_{out} = kw\sqrt{h} \quad (13)$$

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

$$Ah \frac{dT}{dt} = F_{in} (T_{in} - T) + \frac{Q}{\rho C_p} \quad (14)$$

Keterangan:

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

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

T : Temperatur uap (°F)

T_{in} : Temperatur air yang masuk (°F)

Q : Flow uap (kg/menit)

V : Volume air (m³)

A : Luas *steam drum boiler* (m²)

h : Ketinggian air (m)

ρ : Massa jenis air (kg/m³)

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

w : control valve flow air (m)

k : koefisien control valve (Cv/jam)

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], [6]}

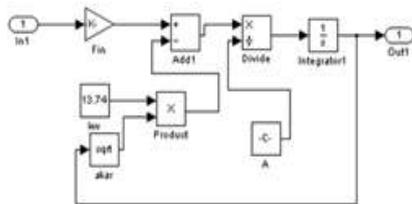
	Nilai	Satuan
F_{in}	9,65	kg/menit
F_{out}	$kw\sqrt{h}$	kg/menit
k	1	Cv/menit
w	13,74	m
T	800	°F
T_{in}	814	°F
Q	11	kg/menit
A	2,202415625	m ²
h	0,8375	m
ρ	1000	kg/m ³
C_p	79,676	J/kg °F

Untuk keperluan simulasi, pemodelan matematis dari *steam drum boiler* pada persamaan (12) dan (14) diubah dalam bentuk persamaan *Laplace* menjadi :

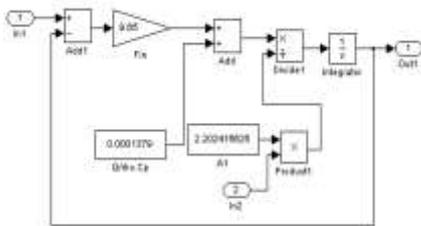
$$h(s) = \frac{F_{in}(s) - kw \sqrt{h}(s)}{A(s)} \times \frac{1}{s} \quad (15)$$

$$T(s) = \frac{F_{in}(s)T_{in}(s) - F_{in}(s)T(s) + \frac{Q}{\rho C_p}(s)}{Ah(s)} \times \frac{1}{s} \quad (16)$$

Pemodelan *plant* dalam bentuk *Laplace* kemudian direpresentasikan dalam diagram *simulink* pada Gambar 4 dan Gambar 5 dengan menggunakan nilai parameter fisik pada Tabel 1.



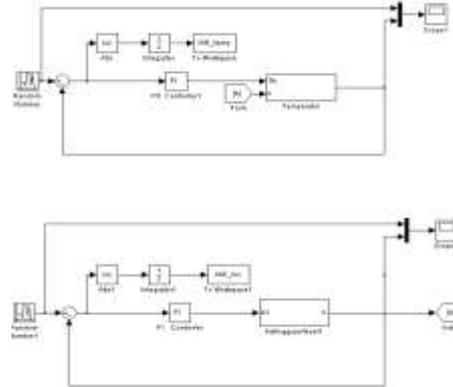
Gambar 4. Subsystem ketinggian air



Gambar 5. Subsystem temperatur uap

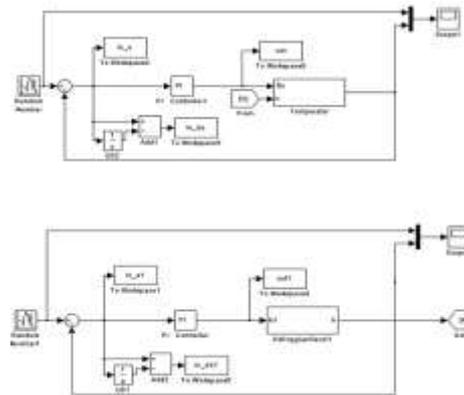
Setelah mengetahui model dari *plant*, yang perlu dilakukan selanjutnya adalah merancang sistem pengontrolan bagi *plant* tersebut. Kontroler PI akan digunakan sebagai guru untuk proses pembelajaran ANFIS^{[11],[19]}. Agar proses *training* ANFIS dapat berjalan dengan baik, ANFIS memerlukan data yang banyak sebagai data masukan dan target yang harus dicapai. Oleh karena itu, dilakukan perancangan kontroler PI untuk sistem dengan masukan sinyal *random*. Proses *tuning* dilakukan secara *trial and error*. Mula-mula menentukan kondisi awal kontroler dengan nilai konstanta P = 1 dan I = 1. Kemudian, menambahkan nilai konstanta P dan I secara bertahap. Penambahan nilai konstanta P dan I dihentikan jika penambahan nilai yang lebih tinggi menyebabkan respon sistem menjadi lebih buruk. Pemilihan nilai konstanta yang akan digunakan, ditentukan dari nilai IAE (*Integral Area Error*) yang paling kecil dengan menggunakan rangkaian *simulink* Gambar 6. Dari percobaan dengan 5 variasi konstanta, didapatkan hasil respon sistem dengan kontroler PI yang menghasilkan nilai IAE paling kecil. Kontroler PI yang akan digunakan sebagai “guru” untuk kontroler ANFIS memiliki nilai Kp=10 dan Ki=10 untuk *subsystem*

ketinggian air serta Kp=10 dan Ki=10 untuk *subsystem* temperatur uap.



Gambar 6 Rangkaian *simulink* untuk *tuning* PI

Data *training* adalah salah satu faktor penting untuk proses perancangan kontroler ANFIS, mulai dari menentukan parameter awal FIS maupun dalam proses pembelajaran untuk mendapatkan parameter akhir FIS. Data *training* diperoleh dari nilai-nilai masukan dan keluaran kontroler PI sebagai kontroler “guru”. Data yang diambil dari kontroler PI berupa data *error* dan *delta error* serta sinyal kontrol *u(k)* sebagai target keluaran karena data-data tersebut yang digunakan sebagai masukan dan keluaran FIS. Pengambilan data *training* menggunakan rangkaian *simulink* pada Gambar 7.



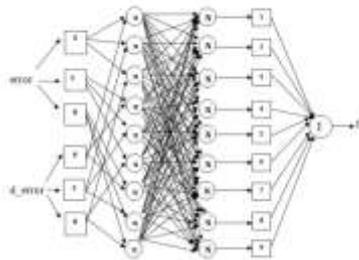
Gambar 7. Pengambilan data *training*

Perancangan kontroler ANFIS perlu dilakukan agar sistem *steam drum boiler* yang dikontrol dengan ANFIS dapat menghasilkan respon yang terbaik. Pada penelitian ini, perancangan ANFIS *Controller* dilakukan sebagai berikut:

- Arsitektur jaringan yang digunakan merupakan *Fuzzy Inference System* tipe *Sugeno*
- Tipe fungsi keanggotaan yang digunakan adalah tipe *generalized bell* untuk *subsystem* ketinggian air, serta tipe segitiga untuk *subsystem* temperatur uap.

- Jumlah fungsi keanggotaan masing-masing *input* tiap *subsystem* adalah 3 buah serta 9 buah fungsi keanggotaan *output*.
- Jumlah *rules* yang dibangkitkan berjumlah 9 buah.

Gambar 8 merupakan arsitektur jaringan ANFIS berdasarkan perancangan yang dilakukan yaitu terdiri dari 2 input (*error* dan *delta error*), masing-masing *input* memiliki 3 buah fungsi keanggotaan, 9 buah fungsi keanggotaan untuk *output*, serta 9 buah *rules*. Jaringan ANFIS ini merupakan model Sugeno orde-1 yang terdiri dari 5 layer.



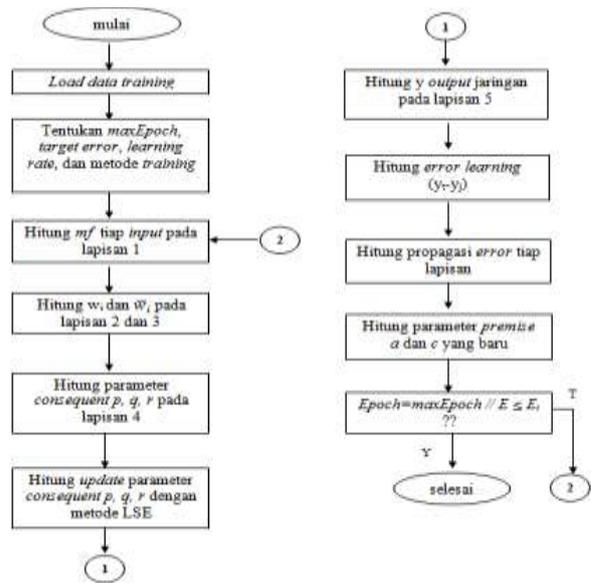
Gambar 8. Arsitektur jaringan dari perancangan ANFIS

Inisialisasi awal kontroler ANFIS bertujuan untuk menentukan nilai parameter awal dari fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* berdasarkan perancangan ANFIS yang telah ditentukan sebelumnya. Inisialisasi dilakukan dengan memanfaatkan FIS Editor GUI pada *Matlab* menggunakan *command genfis1* dengan menuliskan fungsi

```
>>init_level=genfis1(data,numMfs, inmfstype, outmfstype) atau
>>init_level=genfis1(data_level,3, 'gbellmf','linear') atau
>>init_level=genfis1(data_temp,3, 'trimf','linear')
```

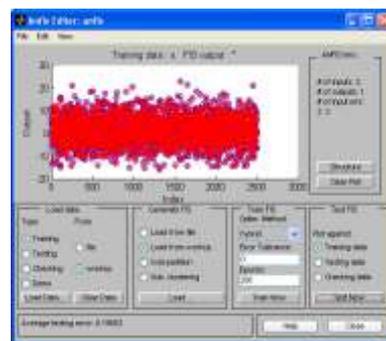
sesuai perancangan yang diinginkan.

Setelah proses inisialisasi awal, dilakukan proses pembelajaran/ *training* pada nilai-nilai awal dengan menggunakan data *training* tiap *subsystem* yang telah diperoleh. Proses *training* ANFIS ditampilkan melalui *flowchart* pada Gambar 9.



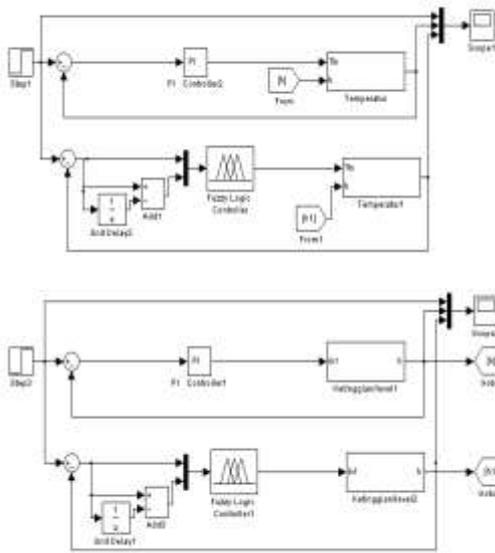
Gambar 9. Flowchart proses training ANFIS

Proses pembelajaran dimulai dengan me-load data *training* dari *workspace*, kemudian membangkitkan *file fuzzy* .fis hasil inisialisasi awal dengan me-load from file. Proses *training* FIS dilakukan dengan memilih algoritma pembelajaran *hybrid*, lalu menentukan target *learning error* serta jumlah iterasi/ *epoch* yang diinginkan. Setelah target *error* ataupun jumlah iterasi terpenuhi, proses *training* akan berhenti. Hasil dari proses *training* serta nilai *average testing error* dapat ditampilkan seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. Tampilan GUI ANFIS

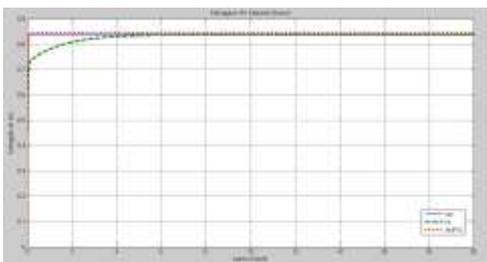
Setelah proses pembelajaran selesai, didapatkan *file* FIS baru dengan nilai parameter-parameter yang telah di-update berdasarkan hasil pembelajaran. FIS akhir hasil *training* kemudian digunakan untuk proses aplikasi sebagai kontroler pada sistem *steam drum boiler*. Gambar 11 merupakan rangkaian *simulink* yang merupakan rangkaian sistem dengan kontroler PI dan ANFIS.



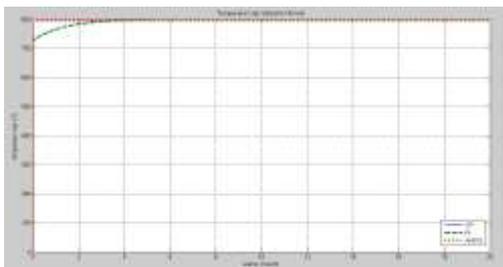
Gambar 11. Rangkaian sistem dengan kontroler tanpa gangguan

3.2.1 Pengujian Kontroler 3.2.1 Pengujian terhadap Setpoint Normal

Pengujian terhadap *setpoint* normal dilakukan dengan memberikan masukan berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* sebesar 0,8375 m untuk *subsystem* ketinggian air dan 800°F untuk *subsystem* temperatur uap. Respon sistem terhadap pengujian *setpoint* normal untuk setiap *subsystem* ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Respon *subsystem* ketinggian air *steam drum boiler* SP=0,8375 m



Gambar 13. Respon *subsystem* temperatur uap *steam drum boiler* SP=800°F

Respon tiap-tiap *subsystem* dengan pengujian *setpoint* normal dirangkum dalam Tabel 2.

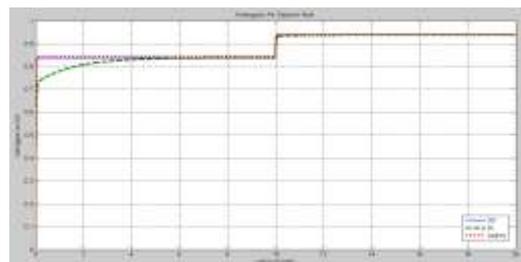
Tabel 2. Perbandingan waktu konstan (τ) respon tiap *subsystem* pengujian *setpoint* normal

Ketinggian air	Pengendali PI	τ (menit) = 4	IAE= 0,1303
	ANFIS	τ (menit) = 0,2	IAE= 0,0310
Temperatur uap	Pengendali PI	τ (menit) = 4	IAE = 80,00
	ANFIS	τ (menit) = 0,1	IAE= 10,834

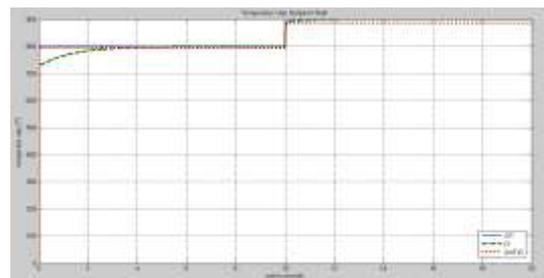
Dari Tabel 2, dapat diketahui bahwa respon *subsystem* ketinggian air dengan ANFIS mencapai waktu konstan (τ) lebih cepat dibanding kontroler PI. Pada *subsystem* temperatur uap, ANFIS juga mencapai waktu konstan yang lebih cepat. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada *subsystem* ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler ANFIS lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler PI. Pada *subsystem* temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler ANFIS juga lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler PI. Oleh karena itu, pengujian pada *setpoint* normal dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler ANFIS menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler PI.

3.2.2 Pengujian terhadap Setpoint Naik

Pengujian terhadap *setpoint* naik dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* dinaikkan menjadi 0,9375 m untuk *subsystem* ketinggian air dan 900°F untuk *subsystem* temperatur uap. Respon sistem yang dihasilkan ditampilkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14. Respon *subsystem* ketinggian air *steam drum boiler* SP=0,9375 m



Gambar 15. Respon *subsystem* temperatur uap *steam drum boiler* SP=900°F

Respon tiap-tiap *subsystem* dengan pengujian *setpoint* naik dirangkum dalam Tabel 3.

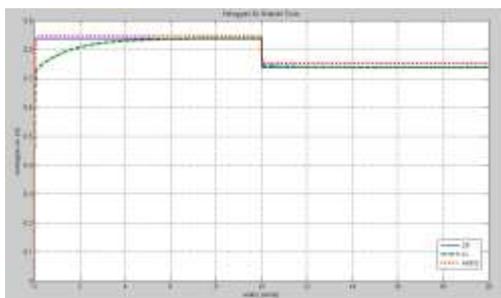
Tabel 3. Perbandingan waktu konstan (τ) respon tiap *subsystem* pengujian *setpoint* naik

Ketinggian air	Pengendali PI	τ (menit) = 0,1	IAE= 0,1969
	ANFIS	τ (menit) = 0,1	IAE= 0,1383
Temperatur uap	Pengendali PI	τ (menit) = 1	IAE= 112,49
	ANFIS	τ (menit) = 0,1	IAE= 103,89

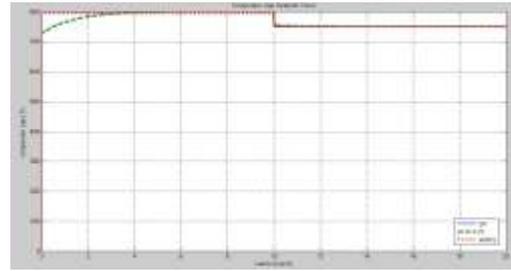
Dari Tabel 3, dapat diketahui bahwa respon *subsystem* ketinggian air dengan ANFIS mencapai waktu konstan (τ) yang sama dengan kontroler PI. Pada *subsystem* temperatur uap, ANFIS mencapai waktu konstan yang lebih cepat dibanding kontroler. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada *subsystem* ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler ANFIS lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler PI. Pada *subsystem* temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler ANFIS juga lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler PI. Oleh karena itu, pengujian terhadap kenaikan *setpoint* dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler ANFIS menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler PI meskipun terjadi perubahan *setpoint* yang dinaikkan.

3.2.3 Pengujian terhadap *Setpoint* Turun

Pengujian terhadap *setpoint* turun dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* diturunkan menjadi 0,7375 m untuk *subsystem* ketinggian air dan 750°F untuk *subsystem* temperatur uap. Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Respon *subsystem* ketinggian air *steam drum boiler* SP=0,7375 m



Gambar 17. Respon *subsystem* temperatur uap *steam drum boiler* SP=750°F

Respon tiap-tiap *subsystem* dengan pengujian *setpoint* turun dirangkum dalam Tabel 4.

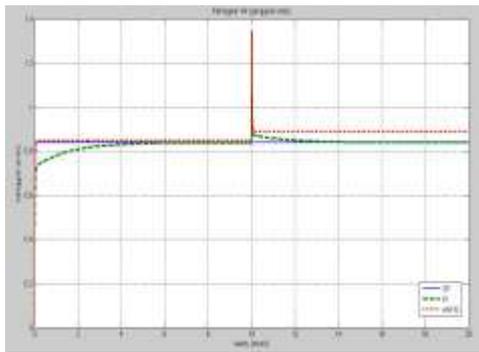
Tabel 4. Perbandingan waktu konstan (τ) respon tiap *subsystem* pengujian *setpoint* turun

Ketinggian air	Pengendali PI	τ (menit) = 0,5	IAE=0,1383
	ANFIS	τ (menit) = 0,2	IAE=0,1303
Temperatur uap	Pengendali PI	τ (menit) = 0,1	IAE = 84,98
	ANFIS	τ (menit) = 0,1	IAE= 47,69

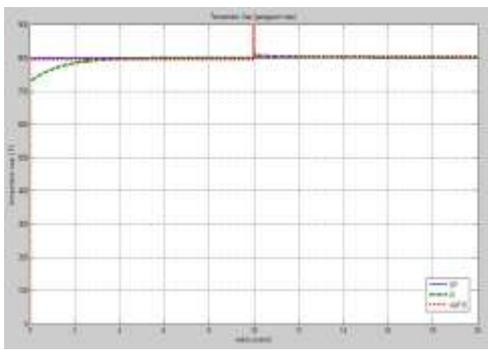
Dari Tabel 4, dapat diketahui bahwa respon *subsystem* ketinggian air dengan ANFIS mencapai waktu konstan (τ) lebih cepat dibanding kontroler PI. Pada *subsystem* temperatur uap, ANFIS mencapai waktu konstan yang sama dengan kontroler PI. Jika dilihat dari nilai *Integral Area Error* (IAE) pada *subsystem* ketinggian air, nilai IAE dengan kontroler ANFIS lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler PI. Pada *subsystem* temperatur uap, nilai IAE dengan kontroler ANFIS lebih kecil dibanding IAE dengan kontroler PI. Oleh karena itu, pengujian terhadap penurunan *setpoint* dapat dikatakan bahwa sistem *steam drum boiler* dengan kontroler ANFIS menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan sistem dengan kontroler PI meskipun terjadi perubahan *setpoint* yang diturunkan.

3.2.4 Pengujian terhadap Gangguan

Pengujian terhadap gangguan dilakukan dengan memberikan masukan sistem berupa sinyal *step* dengan nilai *setpoint* normal tetapi menambahkan gangguan berupa sinyal *step* pada menit ke-10. Didapatkan hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18. Respon subsystem ketinggian air steam drum boiler dengan gangguan



Gambar 19. Respon subsystem temperatur uap steam drum boiler dengan gangguan

Respon setiap subsystem dengan pengujian dengan gangguan sinyal step dirangkum dalam Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan waktu konstan (τ) respon tiap subsystem pengujian dengan gangguan

Ketinggian air	Pengendali PI	τ (menit) = 0,2	IAE=0,1779
	ANFIS	τ (menit) = 0,2	IAE=0,4584
Temperatur uap	Pengendali PI	τ (menit) = 0,5	IAE = 89,98
	ANFIS	τ (menit) = 0,1	IAE=93,808

Dari Tabel 5, dapat diketahui bahwa pemberian gangguan pada subsystem ketinggian air, respon dengan kontroler PI dapat mencapai *setpoint* kembali setelah merespon gangguan tersebut tetapi sistem dengan kontroler ANFIS tidak dapat kembali menuju *setpoint*. Dapat diketahui bahwa waktu pemulihan kedua kontroler sama pada subsystem ketinggian air dan waktu pemulihan ANFIS lebih cepat dibanding kontroler PI pada subsystem temperatur uap. Jika dilihat dari nilai IAE pada kedua subsystem, kontroler PI memiliki nilai IAE yang lebih kecil dibandingkan nilai IAE kontroler ANFIS. Respon sistem dengan ANFIS yang tidak dapat kembali ke *setpoint* setelah merespon gangguan yang diberikan. Hal ini dapat terjadi karena pemilihan nilai parameter saat proses inialisasi awal yang kurang tepat ataupun proses pembelajaran yang kurang baik.

4. Kesimpulan

Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui performa kontroler dengan perubahan *setpoint* maupun pemberian gangguan telah dilakukan. Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa perubahan *setpoint* yang terjadi pada sistem tidak mempengaruhi performa kontroler ANFIS. Pada pengujian terhadap gangguan, kontroler ANFIS tidak dapat kembali pada tepat pada *setpoint* yang telah ditentukan setelah merespon gangguan yang diberikan. Hal tersebut dapat terjadi karena pemilihan fungsi keanggotaan fuzzy yang kurang tepat, penentuan nilai parameter-parameter saat proses inialisasi awal kurang tepat ataupun proses pembelajaran yang kurang baik. Untuk penelitian selanjutnya, dapat digunakan algoritma genetika pada proses inialisasi awal ANFIS agar didapatkan parameter awal yang optimal sehingga proses pembelajaran pun dapat dilakukan dengan lebih optimal.

Referensi

- [1] Abadi, Imam, dkk., *Aplikasi Metode Neuro-Fuzzy pada Sistem Pengendalian Antisurge Kompresor*, Skripsi S-1, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2006.
- [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] Dewanto R.A, dkk., *Identifikasi Dinamika Sistem Menggunakan Neuro-Fuzzy*, Skripsi S-1, STIMIK-DCI, Tasikmalaya, 2005.
- [4] Erwanda, Doni Kusuma, dkk., *Pengendalian Temperatur pada Economizer Unit Boiler Menggunakan Fuzzy Gain Scheduling PID Controller di PT. Petrokimia Gresik*. Skripsi S-1, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2011.
- [5] Fuller, Robert., *Neural Fuzzy System. Donner Visiting professor Abo Akademi Universit.* Abo, 1995.
- [6] 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.
- [7] Hermawan, Arief., *Jaringan Syaraf Tiruan Teori dan Aplikasi*, Penerbit Andi. Yogyakarta, 2006.
- [8] Jamaludin, A.N., *Estimasi Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Steam Drum Boiler*, Skripsi S-1, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2011.
- [9] Jang, J-S, dkk., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [10] J. Savkovic-Stevanovic., "A Neural- Fuzzy System for Ethanol Recovery Distillation Control", *Bulletin of the Chemists and Technologists of Macedonia*, **24**, 87-92, 2005.
- [11] Kasabov, Nik. *Envolving Neuro-Fuzzy Inference Systems*. 2002.
- [12] Kusumadewi, Sri., *Artificial Intelligence (Teknik & Aplikasinya)*, Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2003.
- [13] Kusumadewi, Sri., *Neuro-Fuzzy Integrasi Jaringan Syaraf dan Sistem Fuzzy*, Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.

- [14] Kusumadewi, Sri dan Sri Hartati, *Neuro-Fuzzy Integrasi Sistem Fuzzy & Jaringan Syaraf Edisi2*, Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2010.
- [15] Kuswadi, Son., *Kendali Cerdas Teori dan Aplikasi Praktisnya*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2007.
- [16] Mizumoto, Masaharu dan Shi, Yan., *A New Approach of Neuro-Fuzzy Learning Algorithm*, 1997.
- [17] Nurnberger, A., Rudolf Kruse. *Neuro-Fuzzy Technique under MATLAB/ SIMULINK Applied to a Real Plant*, University of Magdeburg Faculty of Computer Science. Germany
- [18] Puspitaningrum, Diah, *Pengantar Jaringan Syaraf Tiruan*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
- [19] Ruslim, *Model Kontrol Prediksi Berbasis ANFIS pada Heat Exchanger*, Tesis S-2, Universitas Borneo, Tarakan, 2010.
- [20] Setiawan, Iwan, *Kontrol PID Untuk Proses Industri*, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [21] Stephanopoulos, G., *Chemical Process Control An Introduction to Theory and Practice*, Prentice-Hall, Inc., Englewoods Cliff, New Jersey, 2002.
- [22] Wahyudi, Novan, *Simulasi Sistem Pengontrol pH Nira pada Proses Pembuatan Gula Menggunakan Metode ANFIS*, Skripsi S-1, Universitas Gunadarma, Bandung.
- [23] Widodo, Prabowo P., Rahmadya T.H., *Penerapan Soft-Computing dengan Matlab*, Penerbit Rekayasa Sains, Bandung, 2012.