

Perbandingan Unjuk Kerja Jaringan Syaraf Tiruan CMAC (*Cerebellar Model Articulation Controller*) dan RBF (*Radial Basis Function*) pada Pengendalian *Plant* Suhu secara *On – Line*

Amin Fauzan¹, Iwan Setiawan, ST. MT.², Wahyudi, ST. MT.²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia
E-mail: : ftundip@semarang.wasantara.net.id

Abstrak

Sebuah pendekatan dalam pengendalian *plant* yang parameter-parameternya tidak diketahui dapat dilakukan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan. Tidak semua jenis jaringan syaraf tiruan cocok untuk mengendalikan *plant* secara *on-line*. Setiap jaringan syaraf tiruan memiliki kecepatan beradaptasi atau konvergensi yang berbeda – beda, tergantung pada struktur jaringan dan algoritma pembelajaran yang digunakan. Pemilihan jenis jaringan syaraf tiruan untuk mengendalikan *plant* secara *on-line* dapat dilakukan dengan mengetahui unjuk kerja masing-masing jaringan pada pengendalian secara *on-line*.

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian terhadap unjuk kerja jaringan syaraf CMAC dan RBF untuk mengendalikan *plant* suhu secara *on-line*. Pengujian terhadap unjuk kerja kedua jaringan syaraf dilakukan dengan pengujian pengaruh bobot pembelajaran terhadap respon sistem, pengujian referensi naik, pengujian referensi turun dan pemberian gangguan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa aplikasi jaringan syaraf CMAC pada *plant* suhu menunjukkan unjuk kerja yang lebih baik daripada jaringan syaraf RBF. Jaringan syaraf tiruan CMAC memiliki laju pembelajaran yang lebih cepat dan mampu mengatasi pengaruh gangguan lebih cepat.

Kata kunci : Jaringan Syaraf Tiruan, CMAC, RBF, *Plant* Suhu

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam perancangan sistem kontrol konvensional, parameter-parameter kontrol dihitung berdasarkan parameter *plant*. Secara praktis, parameter *plant* tersebut tidak diketahui, sehingga perancangan sistem kontrol harus diawali dengan proses *identifikasi plant* yang akan dikontrol. Untuk suatu *plant* yang kompleks, proses untuk mendapatkan parameter *plant* merupakan proses yang sulit dan memakan banyak waktu. Jaringan syaraf tiruan dapat digunakan sebagai salah satu alternatif pada pengendalian *plant* yang parameternya tidak diketahui. Meskipun begitu, tidak semua jaringan syaraf tiruan cocok untuk diaplikasikan pada pengendalian *plant* secara *on-line*.

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian terhadap unjuk kerja jaringan syaraf CMAC dan RBF pada pengendalian *plant* suhu secara *on-line*. Struktur pengendalian yang digunakan adalah *Fixed Stabilizing Controller*. Pengujian terhadap unjuk kerja kedua jaringan dilakukan dengan pengujian pengaruh bobot pembelajaran sistem, pengujian referensi naik, pengujian referensi turun dan pemberian gangguan terhadap respon

1.2 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah membandingkan unjuk kerja jaringan syaraf CMAC

dan RBF pada pengendalian *plant* suhu secara *on-line*.

1.3 Batasan Masalah

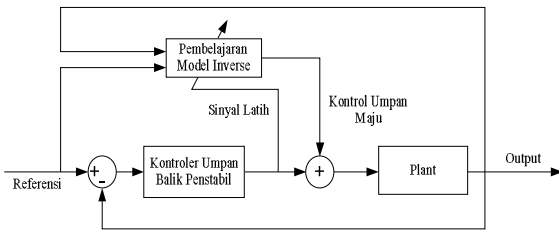
Dalam pembuatan tugas akhir ini penulis membatasi permasalahan sebagai berikut :

1. Algoritma yang digunakan untuk pembaharuan bobot adalah algoritma *LMS*.
2. *Range* pengaturan yang diperbolehkan adalah 33 °C sampai dengan 100 °C.
3. Pengujian unjuk kerja dilakukan dengan pemilihan gain proporsional dan laju konvergensi secara acak dan pemilihan parameter jaringan berupa generalisasi dan jumlah fungsi basis secara *trial and error* sehingga diperoleh kondisi optimal untuk masing – masing jaringan.
4. Perbandingan unjuk kerja dilakukan melalui pengujian pengaruh bobot pembelajaran, pengujian referensi naik, pengujian referensi turun dan pengaruh gangguan terhadap respon sistem.
5. Penentuan batasan nilai gain proporsional dan laju konvergensi yang digunakan pada pengujian dilakukan secara empiris.
6. Parameter yang dijadikan ukuran unjuk kerja jaringan adalah waktu penetapan dan lonjakan maksimum respon yang dihasilkan.
7. Mikrokontroler AT89s51 hanya digunakan sebagai pengatur aliran data untuk komunikasi serial dan tidak membahas arsitektur mikrokontroler secara detail.

1) Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro UNDIP
2) Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro UNDIP

II. DASAR TEORI

2.1 Struktur Kendali *Fixed Stabilising Controller*



Gambar 1 Diagram blok pengendalian *Fixed stabilising controller*

Fixed Stabilising Controller merupakan salah satu arsitektur kendali sistem adaptif. Arsitektur ini diusulkan oleh Kraft G.(1990). Untuk pembelajaran model *inverse* dapat digunakan jaringan syaraf tiruan dan sebagai umpan balik penstabil digunakan gain proporsional.

2.2 Algoritma *Least Mean Square (LMS)*

Algoritma LMS merupakan salah satu algoritma yang digunakan untuk pembelajaran atau *update* bobot jaringan. Secara matematis algoritma LMS dituliskan sebagai berikut :

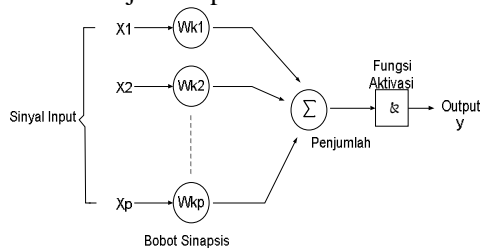
$$w(n+1) = w(n) + \eta \cdot [d(n) - y(n)] \cdot x(n) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

- $w(n+1)$: Bobot pada cacah ke $n+1$
- $w(n)$: Bobot pada cacah ke n
- η : Laju konvergensi ($0 < \eta < 1$)
- $x(n)$: Masukan yang diboboti
- $d(n)$: Keluaran yang diinginkan
- $y(n)$: Keluaran aktual
- $d(n) - y(n)$: Sinyal *error* yang merupakan data latih

2.3 Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan dibentuk dengan meniru kerja dari *neuron* dalam merespon *stimulus* yang diberikan kepadanya yang kemudian di modelkan dalam suatu bentuk model *neuron*. *Neuron* adalah unit pemroses informasi yang penting dalam operasi jaringan syaraf. Model dari *neuron* ini ditunjukkan pada Gambar 2.



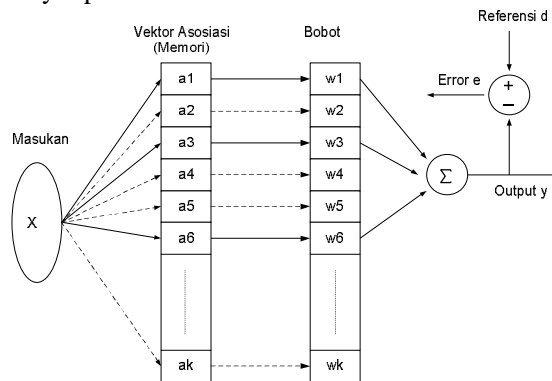
Gambar 2 Model *neuron*

Jaringan syaraf tiruan ini pada dasarnya adalah fungsi pemetaan masukan keluaran sistem yang bebas model matematis atau dikenal dengan istilah *estimator* bebas model.

Salah satu hal yang penting dalam jaringan syaraf tiruan ini adalah kemampuan jaringan untuk belajar dari lingkungan dan meningkatkan performansinya melalui pembelajaran. Proses pembelajaran jaringan dilakukan melalui proses iterasi terhadap bobot sinapsis. Idelalnya jaringan menjadi adaptif terhadap perubahan setelah proses ini.

2.4 Jaringan Syaraf CMAC

CMAC (*Cerebellar model articulation controller*) adalah salah satu jenis jaringan syaraf tiruan yang berusaha meniru pola kerja *cerebellum* (otak belakang) manusia. Ditinjau dari jenis arsitektur atau strukturnya, CMAC dapat dimasukkan ke suatu kelas yang dinamakan AMN (*Associative Memory Network*). Jenis jaringan ini menyimpan informasi secara lokal.



Gambar 3 Model jaringan syaraf tiruan CMAC standar

Operasi CMAC ini dapat direpresentasikan kedalam dua buah pemetaan, $f: x \rightarrow a$ dan $g: a \rightarrow y$, dengan x adalah vektor ruang masukan berdimensi n , a adalah vektor asosiasi (memori konseptual) berdimensi m sedangkan y adalah keluaran berdimensi satu.

Dalam CMAC fungsi $f(x)$ memetakan setiap titik ruang masukan x kedalam sebuah vektor asosiasi A_p (sel-sel asosiasi yang aktif untuk sebuah titik ruang masukan tertentu), sedangkan $y=g(A_p)$ besarnya tergantung pada nilai bobot w yang mungkin nilainya berubah selama proses pembelajaran (*learning*), dan dapat dirumuskan :

$$y = g(A_p) = \sum_{i=1}^p W_{pi}$$

Dalam perancangan CMAC, langkah awal yang harus dilakukan adalah menentukan jangkauan nilai ruang masukan, nilai tersebut selanjutnya dikuantisasi. Setelah nilai kuantisasi masukan didapat maka langkah selanjutnya adalah

memetakan nilai-nilai terkuantisasi ini pada sel-sel asosiasi CMAC berdasarkan parameter generalisasi lokal yang diinginkan.

Salah satu permasalahan utama pada CMAC adalah pemetaan titik ruang masukan pada vektor asosiasi A_p . Permasalahan pemetaan ini secara langsung akan menentukan unjuk kerja kecepatan pengaktifan alamat sel-sel asosiasi CMAC. Dalam hal ini diperlukan sebuah algoritma yang secara efisien dapat secara langsung memetakan titik-titik ruang masukan pada sel-sel asosiasi tertentu (generator alamat). Algoritma pemetaan pada CMAC ini dikenal sebagai generator alamat. Untuk kasus ruang masukan n dimensi, perumusan geometris generator alamat dapat dituliskan sebagai berikut :

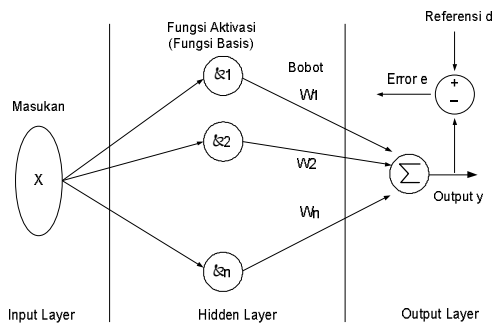
$$A_p(q,l) = 1 + \left\lceil \frac{q_1 - l - d_1 + 2}{\rho} \right\rceil + (l-1) \prod_{k=1}^n \left(\left\lceil \frac{s_k - 1}{\rho} \right\rceil + 1 \right) + \sum_{i=2}^n \left(\left\lceil \frac{q_i - l - d_i + 2}{\rho} \right\rceil \prod_{j=1}^{i-1} \left(\left\lceil \frac{s_j - 1}{\rho} \right\rceil + 1 \right) \right)$$

2.5 Jaringan Syaraf RBF (Radial Basis Function Neural Network)

Radial basis function (RBF), ϕ adalah fungsi dimana keluarannya simetris terhadap center μ_c atau dinyatakan sebagai $\phi_c = \phi \|x - \mu_c\|$ dimana $\| \cdot \|$ merupakan vektor normal. Jaringan syaraf yang dibentuk dengan menggunakan fungsi aktivasi berupa fungsi basis radial dinamakan Jaringan Syaraf RBF (Radial Basis Function Neural Network).

Jaringan RBF terdiri atas 3 layer yaitu layer input, hidden layer / kernel layer (unit tersembunyi) dan layer output. Masing – masing unit tersembunyi merepresentasikan merupakan fungsi aktivasi yang berupa fungsi basis radial yang diasosiasikan oleh lebar dan posisi center dari fungsi basis tersebut.

Topologi jaringan RBF ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Struktur jaringan syaraf RBF

Jaringan syaraf RBF berbeda dengan jaringan syaraf CMAC. Setiap input dari jaringan ini akan mengaktifkan semua fungsi aktivasi pada

hidden layer. Setiap unit dari hidden layer merupakan fungsi aktivasi tertentu yang disebut sebagai fungsi basis. Di dalam hidden layer terdapat sejumlah fungsi basis yang sejenis. Setiap fungsi basis akan menghasilkan sebuah keluaran dengan bobot tertentu. Output jaringan ini merupakan jumlah dari seluruh output fungsi basis dikalikan dengan bobot masing – masing.

Pada jaringan RBF fungsi aktivasi ini identik dengan dengan Fungsi Gaussian yang diformulasikan sebagai berikut :

$$\phi_j = e^{-\frac{\|x - c_j\|^2}{2\sigma_j^2}}$$

Dimana :

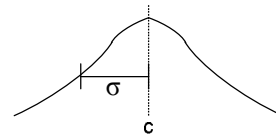
c_j = Center fungsi gaussian ke - j

σ_j = Lebar fungsi gaussian ke - j

x = Masukan fungsi basis

ϕ_j = Keluaran fungsi basis ke-j oleh masukan x

Secara grafis fungsi ini ditunjukkan pada Gambar 5.



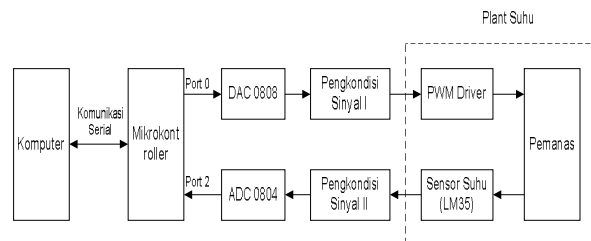
Gambar 5 Representasi grafis fungsi gaussian

Berdasarkan rumus fungsi gaussian dan topologi jaringan diatas dapat di usulkan beberapa strategi pembelajaran pada jaringan RBF ini antara lain :

1. Jumlah fungsi basis
2. Posisi center pada fungsi basis
3. Lebar dari fungsi basis
4. Bobot keluaran setiap fungsi basis

Pada penelitian ini strategi pembelajaran yang digunakan adalah pembaharuan bobot keluaran tiap fungsi basis.

III. PERANCANGAN



Gambar 6 Diagram blok sistem pengatur suhu

Secara umum sistem pengatur suhu yang akan dibuat ditunjukkan oleh diagram pada Gambar 6. Rangkaian DAC 0808 berfungsi untuk mengubah data digital berupa masukan referensi suhu dari komputer menjadi data analog berupa tegangan. Pengkondisi sinyal I berfungsi untuk mengubah level tegangan keluaran DAC 0808 dari 0 – 5 Volt menjadi level tegangan -5 – 5 Volt. Level tegangan ini digunakan sebagai masukan *driver* PWM. Pengkondisi sinyal II berfungsi untuk menguatkan tegangan keluaran sensor suhu LM35. Batas maksimal keluaran sensor adalah 1.5 V pada suhu 150 °, sedangkan referensi ADC adalah 5 Volt sehingga diperlukan penguatan sebesar $5 / 1.5 = 3.33$ kali. Rangkaian ADC 0804 digunakan untuk mengubah besaran analog dari pengkondisi sinyal II ke data digital sehingga dapat diolah di komputer. Mikrokontroler digunakan untuk mengatur aliran data dari ADC ke komputer atau dari komputer ke DAC. Komunikasi yang digunakan adalah komunikasi serial melalui RS 232. Mikrokontroler menerjemahkan perintah dari komputer apakah mengirim data ke DAC atau mengambil data dari ADC dan mengirimkannya ke komputer. *Plant* suhu didesain dengan menggunakan *driver* PWM untuk mengatur besarnya daya yang dialirkan ke pemanas. Untuk mengukur besarnya suhu yang terjadi digunakan sensor suhu LM35 yang mempunyai karakteristik keluaran $10 \text{ mV} / ^\circ \text{C}$. Komputer digunakan sebagai unit controller untuk mengaplikasikan algoritma jaringan syaraf tiruan CMAC dan RBF. Disamping itu, komputer juga digunakan untuk menampilkan grafik respon dan menyimpan data ke file untuk keperluan analisis.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Untuk membandingkan unjuk kerja jaringan syaraf CMAC dan jaringan syaraf RBF perlu diperhatikan hal – hal sebagai berikut :

1. Struktur pengendalian yang digunakan harus sama. Dalam hal ini struktur yang digunakan adalah *Fixed Stabilising Controller*.
2. Nilai gain proporsional dan laju konvergensi kedua jaringan harus sama.
3. Kedua jaringan harus berada pada kondisi optimal untuk nilai gain proporsional dan laju konvergensi yang dipilih.

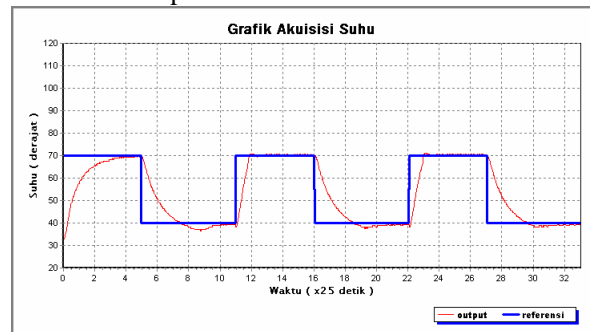
Karena kedua paramater jaringan yaitu gain proporsional dan laju konvergensi yang dipilih sama, maka kondisi optimal ini ditentukan oleh pemilihan parameter generalisasi pada jaringan CMAC dan jumlah fungsi basis yang digunakan pada jaringan RBF yang tepat. Pemilihan parameter generalisasi dan jumlah fungsi basis tersebut

dilakukan secara *trial and error* sehingga diperoleh respon sistem yang optimal.

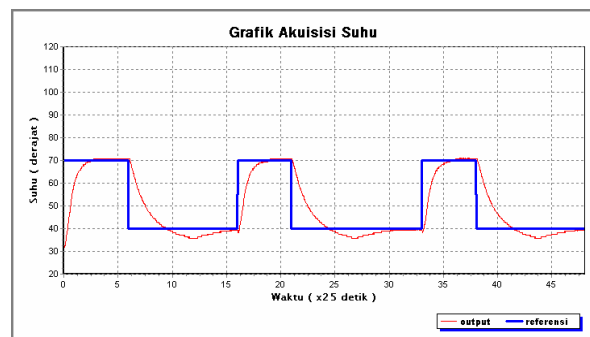
Pemilihan gain proporsional dan laju konvergensi kedua jaringan dilakukan secara acak namun dengan mempertimbangkan pengaruh masing – masing paramater tersebut terhadap transien respon suhu yang terjadi. Pada pengujian ini dipilih nilai laju konvergensi sebesar 0.1 dan gain proporsional sebesar 2. Dari hasil *trial and error* diperoleh bahwa untuk nilai laju konvergensi dan gain proporsional tersebut parameter generalisasi yang tepat adalah sebesar 25 sedangkan jumlah fungsi basis yang tepat adalah 7.

4.1 Pengujian Pengaruh Pembelajaran

Untuk menguji pengaruh bobot pembelajaran pada respon sistem dilakukan pengujian dengan cara mengubah referensi sistem pada 2 *setting* yang berbeda beberapa kali. Dari grafik respon akan diperoleh perbedaan respon kedua jaringan antara respon jaringan dengan bobot awal nol dan respon jaringan dengan menggunakan bobot hasil pelatihan. Pada pengujian ini referensi sistem diubah pada nilai 40 °C dan 70 °C.



Gambar 7 Pengujian untuk mengetahui pengaruh bobot pembelajaran terhadap transien suhu pada kontrol CMAC



Gambar 8 Pengujian untuk mengetahui pengaruh bobot pembelajaran terhadap transien suhu pada kontrol RBF

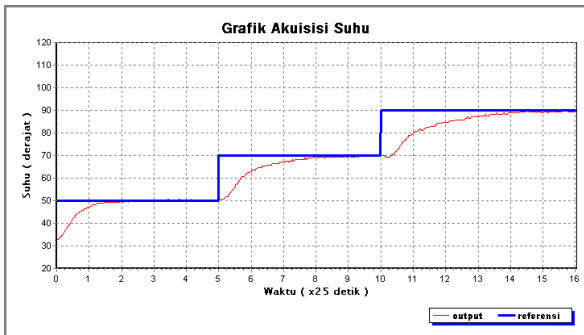
Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian ini adalah respon jaringan syaraf CMAC dengan menggunakan bobot pelatihan akan menjadi semakin baik, sedangkan pada jaringan syaraf RBF respon sistem akan relatif sama. Hal ini karena pada

jaringan CMAC ketika menerima referensi yang baru maka jaringan akan mengambil bobot – bobot tertentu sesuai dengan memori yang aktifkan akibat referensi baru tersebut, sedangkan pada jaringan RBF setiap masukan yang baru ia akan mengaktifkan seluruh fungsi basis yang berarti ketika ada referensi baru maka bobot yang digunakan adalah bobot hasil pelatihan terakhir.

4.2 Pengujian Referensi Naik

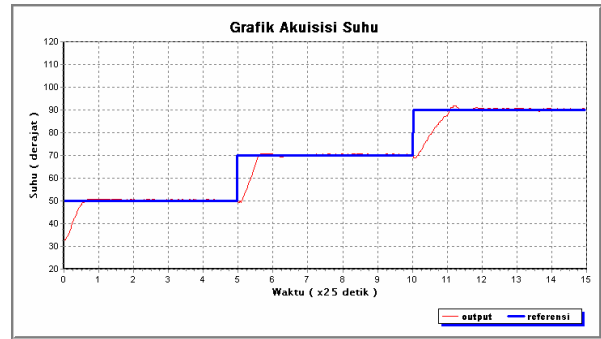
Untuk mengetahui kemampuan jaringan dalam mengikuti perubahan referensi naik dilakukan pengujian dengan memberikan referensi yang berubah naik pada beberapa tahap. Perubahan referensi dilakukan setelah respon mencapai keadaan tunak. Pada pengujian ini dilakukan perubahan referensi mulai dari 33 °C – 50 °C – 70°C dan 90 °C.

Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada saat digunakan bobot awal jaringan nol, ketika referensi dinaikkan kedua jaringan mampu mengikuti perubahan referensi naik. Dengan menggunakan bobot hasil pelatihan waktu penetapan tiap perubahan referensi pada jaringan syaraf CMAC akan semakin cepat, tetapi pada jaringan syaraf RBF penggunaan bobot hasil pelatihan hanya berpengaruh pada respon awal yaitu saat referensi 50 °C. Respon suhu mengalami lonjakan yang besar. Pada saat bobot hasil pelatihan digunakan, maka jaringan menggunakan bobot terakhir yang disimpannya yaitu bobot untuk referensi terakhir yang diberikan yaitu 90 °C. Sinyal kontrol yang berasal dari keluaran jaringan RBF cukup besar karena bobot awal yang digunakan adalah bobot untuk menghasilkan sinyal kontrol pada referensi 90 °C.



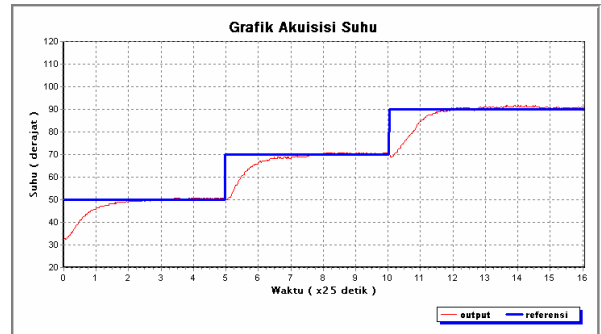
(a) Bobot awal

Gambar 9 Pengujian referensi naik jaringan syaraf CMAC

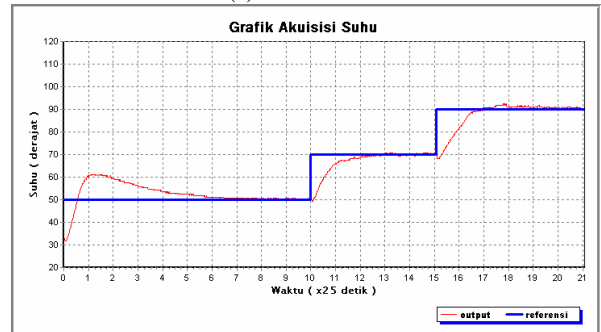


(b) Bobot hasil 2 x pelatihan

Gambar 9 Pengujian referensi naik jaringan syaraf CMAC (Lanjutan)



(a) Bobot awal



(b) Bobot hasil 2 x pelatihan

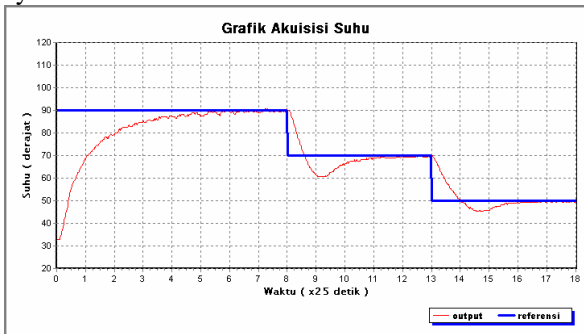
Gambar 10 Pengujian referensi naik jaringan syaraf RBF

4.3 Pengujian Referensi Turun

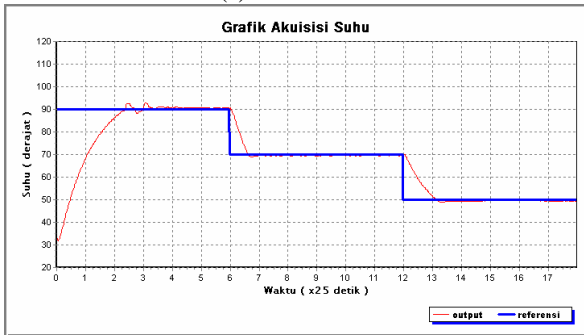
Untuk mengetahui kemampuan jaringan dalam mengikuti perubahan referensi turun dilakukan pengujian dengan memberikan referensi yang berubah turun pada beberapa tahap. Perubahan referensi dilakukan setelah respon mencapai keadaan tunak. Pada pengujian ini dilakukan perubahan referensi mulai dari 33 °C – 90 °C – 70°C dan 50 °C.

Hasil pengujian pada jaringan syaraf CMAC ditunjukkan pada Gambar 11 dan hasil pengujian pada jaringan syaraf RBF ditunjukkan pada Gambar 12. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada saat digunakan bobot awal nol, ketika referensi diturunkan kedua jaringan mampu mengikuti perubahan referensi turun. Pada jaringan

syaraf CMAC ketika mengikuti perubahan referensi turun, respon akan mengalami *undershoot* sedangkan pada jaringan syaraf RBF tidak mengalami *undershoot*. Dengan menggunakan bobot hasil pelatihan *undershoot* pada jaringan syaraf CMAC dapat dihilangkan sehingga jaringan mampu mengikuti perubahan referensi dengan baik, tetapi pada jaringan syaraf RBF penggunaan bobot hasil pelatihan hanya berpengaruh pada respon awal yaitu pada saat *setting* referensi 90 °C. Jika dibandingkan respon kedua jaringan setelah mengalami pelatihan, tampak bahwa respon jaringan syaraf CMAC mempunyai waktu penetapan yang lebih singkat daripada jaringan syaraf RBF.

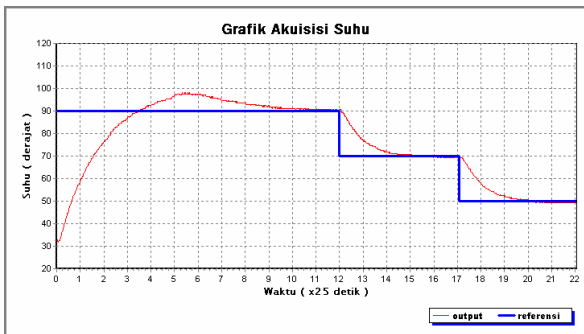


(a) Bobot awal



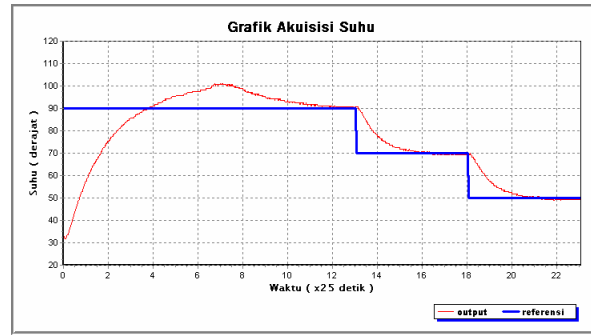
(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan

Gambar 11 Pengujian referensi naik jaringan syaraf CMAC



(a) Bobot awal

Gambar 12 Pengujian referensi naik jaringan syaraf RBF

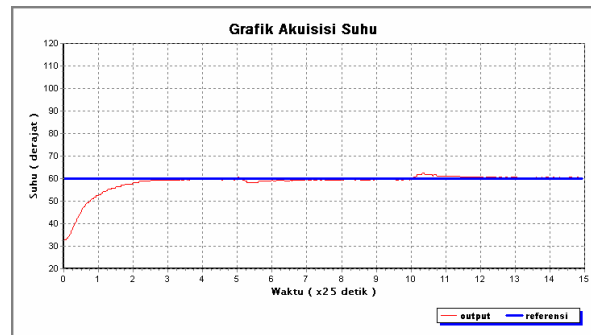


(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan

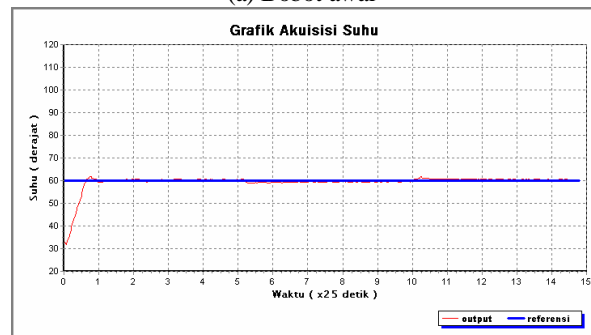
Gambar 12 Pengujian referensi naik jaringan syaraf RBF (Lanjutan)

4.4 Pengujian Gangguan

Untuk mengetahui unjuk kerja jaringan syaraf CMAC dan RBF dalam merespon gangguan dari luar, dilakukan pengujian dengan memberikan referensi suhu 60 °C. Setelah respon mencapai referensi yang diberikan diberikan gangguan dengan menyalakan kipas yang akan menyerap udara ke luar sehingga suhu *plant* akan turun. Gangguan dihilangkan setelah respon kembali ke keadaan referensi semula. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 13 dan Gambar 14.

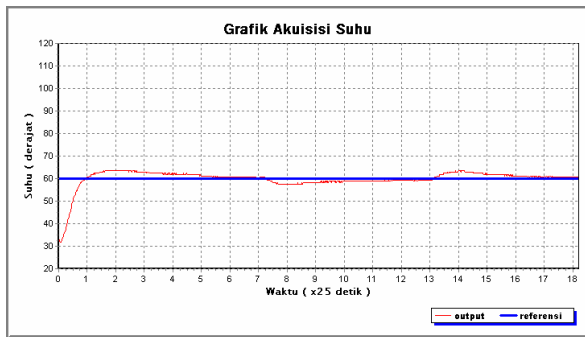


(a) Bobot awal

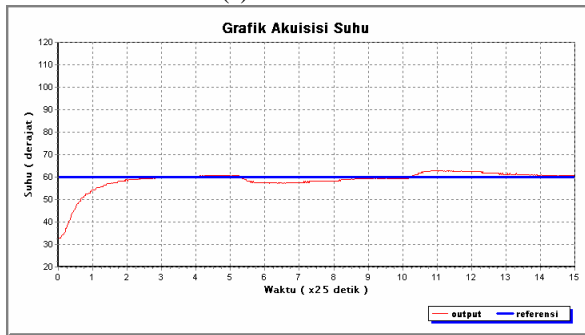


(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan

Gambar 13 Pengujian gangguan jaringan syaraf CMAC



(a) Bobot awal



(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan

Gambar 14 Pengujian gangguan jaringan syaraf RBF

Dari grafik respon diatas tampak bahwa pada referensi 60 °C ketika diberikan gangguan respon jaringan syaraf CMAC akan mengalami penurunan suhu maksimum sebesar sebesar 2 °C dan membutuhkan waktu sekitar 33 detik untuk mengatasi gangguan tersebut. Ketika gangguan dihilangkan respon akan mengalami kenaikan suhu maksimum sebesar 1 °C dan membutuhkan waktu sekitar 33 detik untuk mengatasi gangguan. Pada jaringan syaraf RBF ketika diberikan gangguan, respon sistem akan mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 3°C dan membutuhkan waktu sebesar 57 detik untuk mengatasi gangguan tersebut, sedangkan jika gangguan dihilangkan respon sistem akan mengalami lonjakan suhu maksimum sebesar 3 °C dan membutuhkan waktu sekitar 66 detik untuk kembali ke keadaan referensi.

Penggunaan bobot hasil pelatihan pada jaringan CMAC akan mengurangi penurunan suhu ketika diberikan gangguan dan mempercepat waktu untuk mengatasi gangguan tersebut yaitu menjadi sekitar 18 detik pada saat diberi gangguan dan 13 detik pada saat gangguan dihilangkan. Pada jaringan syaraf RBF penguanaan bobot hasil pelatihan ini tidak banyak berpengaruh terhadap respon sistem.

Tabel 1 Data unjuk kerja jaringan syaraf CMAC dan RBF terhadap pengujian gangguan.

Pengujian	Parameter Unjuk Kerja	Jaringan Syaraf CMAC		Jaringan Syaraf RBF	
		Bobot			
		Awal	Latih	Awal	Latih
Pemberian Gangguan	Waktu untuk mengatasi gangguan	33 detik	18 detik	57 detik	77 detik
	Lonjakan suhu maksimum	2 °C	1 °C	3 °C	3 °C
Penghilangan Gangguan	Waktu untuk mengatasi gangguan	33 detik	13 detik	66 detik	73 detik
	Lonjakan suhu maksimum	1 °C	1 °C	3 °C	4 °C

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis dapat disimpulkan hal – hal penting sebagai berikut :

1. Kestabilan respon keluaran suhu *plant* akan sangat tergantung terhadap pemilihan parameter-parameter kendali CMAC dan RBF , yaitu besarnya laju konvergensi, gain proporsional, besarnya parameter generalisasi dan serta jumlah fungsi basis yang digunakan.
2. Pemilihan laju konvergensi yang relatif lebih besar akan menyebabkan keluaran transien mengalami *overshoot*, *overshoot* akan semakin tinggi untuk laju konvergensi yang semakin besar. Hal yang sama terjadi pada pemilihan besarnya gain proporsional. Semakin besar gain, transien suhu *plant* akan mengalami *overshoot*.
3. Dari hasil *trial and error* pemilihan acak gain proporsional sebesar 2 dan laju konvergensi sebesar 0.1 memberikan kondisi optimal pada jaringan CMAC untuk generalisasi 25 dan pada jaringan syaraf RBF untuk jumlah fungsi basis 7.
4. Pada jaringan syaraf CMAC penggunaan bobot hasil pelatihan akan meningkatkan unjuk kerja sistem baik terhadap referensi tetap, perubahan referensi maupun gangguan. Pada jaringan syaraf RBF penggunaan bobot hasil pelatihan tidak banyak berpengaruh dalam memperbaiki unjuk kerja sistem.
5. Jaringan syaraf CMAC mempunyai unjuk kerja yang lebih baik dalam mengatasi gangguan karena penurunan suhu akibat pemberian gangguan dan lonjakan suhu akibat gangguan dihilangkan lebih kecil daripada jaringan RBF. Disamping itu, waktu

- yang dibutuhkan untuk mengatasi gangguan dan kembali pada referensi semula lebih cepat.
6. Secara keseluruhan jaringan syaraf CMAC mempunyai proses pembelajaran yang lebih cepat dibandingkan dengan jaringan syaraf RBF.

5.2 Saran

1. Untuk lebih memperbesar *range* pengaturan suhu sebaiknya digunakan peralatan *interface* yang mempunyai resolusi yang lebih besar.
2. Untuk meningkatkan proses pembelajaran, dimensi jaringan syaraf dapat dinaikkan dengan menambahkan masukan berupa perubahan suhu yang terjadi pada *plant*.
3. Untuk meningkatkan performansi sistem dapat ditambahkan pengaturan kecepatan kipas pendingin sehingga sistem mempunyai 2 output yaitu pemanas dan kecepatan kipas pendingin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Albus, *A New Approach to Manipulator Control : The Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)*, IEEE Journal.
- [2] Astrom, John and Bjorn Wittenmark, *Adaptive Control*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [3] Brown, Martin and Harris, *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*, Prentice Hall Inc, 1994.
- [4] Coughlin, Robert and Federick Driscoll, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, Jakarta : Erlangga.
- [5] Haykin, Simon, *Neural Networks- A Comprehensive Foundation*, Macmillan Colege-Publishing Company Inc, 1994.
- [6] Kraff, Gordon and David Campagna, *A Comparison Between CMAC Neural Network Control and Two Traditional Adaptive Control Systems*, Papers
- [7] Malvino, *Prinsip – Prinsip Elektronika*, Jakarta : Erlangga, 1996.
- [8] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Otomatik, Jilid 1*, Erlangga, Jakarta, 1991.
- [9] Setiawan, Iwan. *Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan Kendali CMAC secara On-line*. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada Yogyakarta.
- [10] Widrow and Lehr, *30 Years of Adaptive Neural Network : Perceptron, Madaline and Backpropagation*, IEEE Journal.
- [11]....., <http://www.princeton.edu/~kung/ele571/30supervised-BP.ppt>
- [12]....., <http://www.nada.kth.se/kurser/kth/2D1432/2004/rbf.pdf>
- [13]....., www2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/ai-repository/ai/areas/neural/systems/cmaccmac.txt
- [14]....., www.computing.surrey.ac.uk/courses/csm10/NeuralNetworks/RBFNetworks.ppt
- [15]....., www.data2money.com/PDF/RBFpaper.pdf
- [16]....., www.ece.unh.edu/robots/cmaccdemo.c
- [17]....., www.icaen.uiowa.edu/~comp/Public/NeuralN.pdf

BIOGRAFI



Amin Fauzan Lahir di kota kecil nan damai Purworejo Berirama. Saat ini sedang menempuh pendidikan tinggi di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro pada konsentrasi Kontrol. Bidang minat penelitian adalah komunikasi data dan monitoring proses, remote kontrol, dan kendali adaptif. Email: uzan_tech@yahoo.com

Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

**Wahyudi, ST. MT.
NIP. 132 086 662**

**Iwan Setiawan, ST.MT
NIP. 132 283 183**

