

APLIKASI JARINGAN SYARAF TIRUAN RBF PADA SISTEM KONTROL VALVE UNTUK PENGENDALIAN TINGGI MUKA AIR

Wahyudi, Hariyanto, Iwan Setiawan

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia
e-mail: wahyudi@elektro.ft.undip.ac.id

ABSTRAKSI

Jaringan syaraf tiruan dapat digunakan untuk mengendalikan plant yang parameter-parameternya tidak diketahui. Setiap jaringan syaraf tiruan memiliki kecepatan untuk beradaptasi yang berbeda-beda tergantung pada struktur jaringan dan algoritma yang digunakan. RBF (Radial Basis Function) merupakan salah satu jenis jaringan syaraf tiruan yang dapat digunakan sebagai pengendali plant secara on-line. Pengendalian ketinggian dilakukan dengan mengatur pembukaan valve pengisian pada bak penampung. Pengujian dilakukan pada pengaruh nilai gain proporsional, laju konvergensi, jumlah fungsi basis, pengujian referensi naik, referensi turun dan pemberian gangguan. Hasil pengujian jaringan syaraf RBF menunjukkan semakin besar laju konvergensi dan gain proporsional yang diberikan, semakin cepat waktu naik dan waktu penetapannya. RBF memiliki respon yang cukup baik pada pengujian perubahan referensi dan pemberian gangguan.

Kata kunci: Jaringan Syaraf Tiruan RBF, Ketinggian Air.

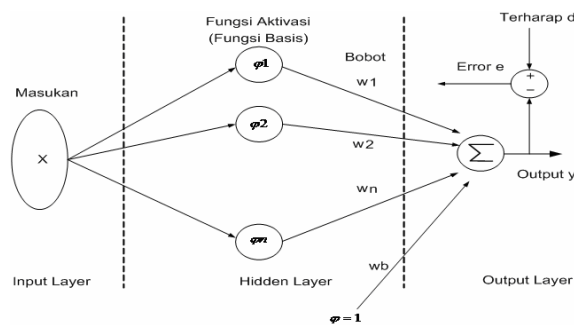
1. PENDAHULUAN

Sebuah pendekatan dalam pengendalian sistem yang parameter-parameternya tidak diketahui atau sulit untuk ditentukan dapat dilakukan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan. RBF merupakan salah satu jenis jaringan syaraf tiruan yang dapat digunakan sebagai komponen pengendali sistem yang parameter-parameternya tidak diketahui atau sulit ditentukan tanpa adanya proses identifikasi terlebih dahulu. Pengujian dilakukan terhadap unjuk kerja jaringan syaraf tiruan RBF pada pengendalian ketinggian air, dengan mengatur pembukaan valve secara on-line. Pengujian dilakukan melalui pengujian pengaruh laju konvergensi, gain proporsional, fungsi basis dan pemberian gangguan (pembukaan valve keluaran). Struktur pengendalian yang digunakan adalah *Fixed Stabilising Controller*. Unit pengendalian yang digunakan untuk mengimplementasikan algoritma kendali dengan jaringan syaraf tiruan RBF adalah PC (*Personal Computer*).

2. JARINGAN SYARAF TIRUAN RBF

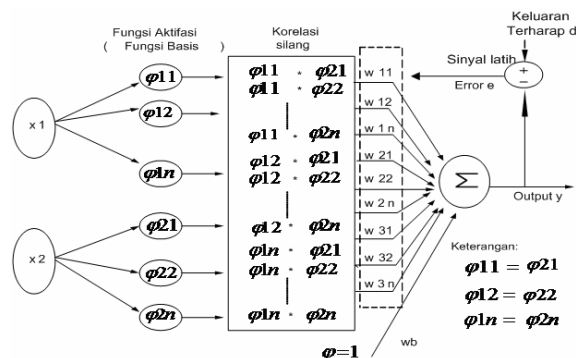
RBF (ϕ) merupakan fungsi dimana keluarannya simetris terhadap *center* c tertentu atau dinyatakan sebagai $\phi_c = \phi \|x - c\|$, dimana $\| \cdot \|$ merupakan vektor normal. Jaringan syaraf yang dibentuk dengan menggunakan fungsi basis berupa fungsi *basis radial* dinamakan Jaringan Syaraf RBF.

Jaringan RBF terdiri atas 3 layer yaitu *layer input*, *hidden layer* (unit tersembunyi) dan *layer output*.^[6] Masing-masing unit tersembunyi merupakan fungsi aktivasi yang berupa fungsi *basis radial*. Fungsi *basis radial* ini diasosiasikan oleh lebar dan posisi *center* dari fungsi basis tersebut. Struktur dasar jaringan RBF ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur dasar jaringan syaraf RBF.

Setiap input dari jaringan syaraf tiruan RBF ini akan mengaktifkan semua fungsi basis pada *hidden layer*. Setiap unit dari *hidden layer* merupakan fungsi aktivasi tertentu yang disebut sebagai fungsi basis. 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. Untuk jaringan RBF dengan 2 masukan, proses pemetaannya ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Operasi jaringan syaraf RBF dengan 2 masukan.

Setiap masukan akan mengaktifkan setiap fungsi *basis* pada jaringannya sendiri. Misalkan pada operasi masukan $[x_1 \ x_2]$. Masukan x_1 akan mengaktifkan fungsi *basis* pada jaringan RBF pertama, sehingga masukan x_1 akan mengaktifkan fungsi *basis* ϕ_{11} , ϕ_{12} sampai dengan ϕ_{1n} . Masukan x_2 akan mengaktifkan setiap fungsi *basis* pada jaringan RBF kedua, sehingga masukan x_2 akan mengaktifkan fungsi *basis* ϕ_{21} , ϕ_{22} sampai dengan ϕ_{2n} . Langkah selanjutnya adalah melakukan korelasi silang antara setiap fungsi *basis* pada jaringan pertama dengan setiap keluaran fungsi *basis* pada jaringan kedua. Masing-masing hasil korelasi silang antar fungsi *basis* ini kemudian diboboti dengan bobot tertentu yaitu w_{11} , w_{12} sampai dengan w_{nn} . Keluaran jaringan RBF dihitung dengan menjumlahkan seluruh hasil perkalian antara keluaran tiap fungsi *basis* dengan bobotnya sendiri ditambah dengan bobot bias (w_b). Fungsi *basis* pada jaringan RBF identik dengan dengan fungsi *gaussian* yang diformulasikan sebagai berikut[2]:

$$\phi_j = e^{-\frac{\|x-c_j\|^2}{2\sigma_j^2}} \quad (1)$$

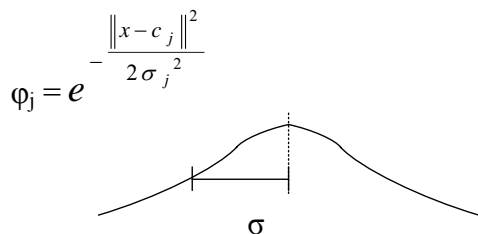
dimana:

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
Representasi grafis fungsi *gaussian* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Fungsi *gaussian*.

Pada setiap jaringan RBF biasanya digunakan lebih dari 1 buah fungsi *basis*. Tiap-tiap fungsi *basis* mempunyai 1 *center* dan 1 bobot tertentu. Untuk n buah masukan pada jaringan syaraf RBF, maka diperlukan bobot memori yang digunakan pada satu jaringan adalah sebesar (jumlah fungsi *basis*)ⁿ + 1. Satu merupakan bobot bias (w_b) dari jaringan syaraf RBF. Berdasarkan rumus fungsi *gaussian* pada persamaan 1 dan struktur dasar jaringan RBF, dapat diusulkan beberapa strategi pembelajaran pada jaringan RBF sebagai berikut[6]:

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

Strategi pembelajaran jaringan yang digunakan adalah pembelajaran bobot keluaran tiap fungsi *basis*.

Algoritma pelatihan jaringan syaraf tiruan RBF secara iteratif adalah sebagai berikut:

- Langkah 1 : Menentukan jumlah fungsi *basis* yang akan digunakan.
- Langkah 2 : Menentukan *center* tiap fungsi *basis*.
- Langkah 3 : Menyediakan bobot sebanyak (fungsi *basis*)ⁿ + 1, dimana n adalah jumlah masukan RBF..
- Langkah 4 : Inisialisasi bobot, $w = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$ dan set laju konvergensi yang digunakan ($0 < \eta < 1$).
- Langkah 5 : Untuk sinyal latih kerjakan langkah 6 s.d selesai.
- Langkah 6 : Hitung keluaran tiap fungsi *basis*.
- Langkah 7 : Hitung keluaran jaringan RBF.
- Langkah 8 : Hitung kesalahan (*error*) antara keluaran terharap (d) dengan keluaran RBF (y), $error = d - y$.
- Langkah 9 : *Update* bobot-bobot tiap fungsi *basis* dan bobot *basis* dengan metoda LMS.

Algoritma LMS merupakan salah satu algoritma yang digunakan untuk pembelajaran atau pembaharuan bobot jaringan syaraf. Algoritma LMS mempunyai komputasi sederhana dengan melakukan proses untuk mengoreksi bobot-bobot jaringan yang akhirnya akan meminimalkan fungsi rata-rata kuadrat *error*. Secara matematis algoritma LMS untuk pembaharuan bobot jaringan syaraf dituliskan sebagai berikut:

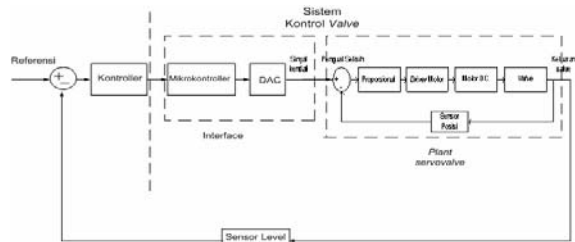
$$w(k+1) = w(k) + \alpha \cdot [d(k) - y(k)] \cdot x(k) \quad (2)$$

dimana:

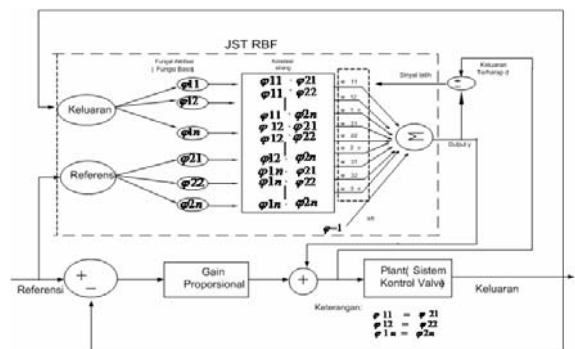
- $w(k+1)$: Bobot pada cacah ke $k+1$
- $w(k)$: Bobot pada cacah ke k
- α : Laju konvergensi ($0 < \alpha < 1$)
- $x(k)$: Masukan yang diboboti
- $d(k)$: Keluaran yang diinginkan
- $y(k)$: Keluaran aktual
- $d(k) - y(k)$: Sinyal *error* yang merupakan data latih

3. PERANCANGAN

Perancangan kendali jaringan syaraf tiruan RBF dilakukan untuk menentukan besarnya parameter kendali yang digunakan, yang meliputi *gain* proporsional, laju konvergensi dan jumlah fungsi *basis*. Jaringan syaraf tiruan RBF yang digunakan untuk mengendalikan ketinggian air ditulis dengan menggunakan bahasa pemrograman Visual C++ dan dijalankan pada sebuah komputer. Program ini dihubungkan dengan mikrontroler dengan komunikasi serial. Sistem kendali secara keseluruhan diperlihatkan pada diagram blok pada Gambar 4 dan kendali RBF ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Diagram blok sistem secara keseluruhan.



Gambar 5. Diagram blok jaringan syaraf RBF.

Penentuan besarnya *gain* proporsional secara praktis dibatasi oleh jangkauan sinyal kendali maksimum. Diusahakan sinyal kendali proporsional pada saat awal tidak melebihi 15 volt, karena tegangan keluaran maksimum DAC adalah 15 volt. Pada sistem pengendalian ini besarnya sinyal kendali proporsional sebanding dengan *error*. Pengendalian ketinggian air dibatasi antara ketinggian 14,3 cm sampai dengan 45 cm, sehingga mempunyai jangkauan pengendalian sebesar 30,7 cm. Sinyal *error* maksimum yang mungkin terjadi adalah sebesar 30,7 yang memberikan sinyal kendali sebesar 15 volt. Secara praktis besarnya *gain* proporsional yang diperbolehkan sebesar 1.

Besarnya laju konvergensi akan menentukan kecepatan pembaharuan bobot. Jika laju konvergensi yang dipilih relatif kecil, maka laju pembelajaran akan berjalan lambat, sebaliknya bila laju konvergensi yang dipilih terlalu besar akan menyebabkan koreksi yang berlebihan pada bobot-bobot yang diperbaharui. Pemilihan besarnya laju konvergensi yang digunakan pada pengendalian dilakukan secara empiris dan tidak boleh terlalu besar karena hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem keluaran *plant* pengendalian tinggi muka cairan pada keadaan tunaknya dengan *range* antara 0,2 sampai dengan 1.

Besarnya jangkauan nilai masukan secara langsung akan mempengaruhi besarnya memori (lokasi alamat bobot) yang harus disediakan. Semakin besar jangkauan nilai masukan maka semakin banyak memori yang harus disediakan. Jangkauan nilai masukan pertama (referensi) dinormalisasi dalam fungsi basis pada jangkauan 0–15. Normalisasi jangkauan nilai masukan kedua (keluaran *plant*) dibatasi oleh data yang dikirimkan

oleh mikrokontroler ke komputer melalui komunikasi serial, yaitu 8 bit, sehingga data sensor adalah 0–55 dinormalisasi dalam fungsi basis pada jangkauan 0–15, sesuai dengan besarnya sinyal kendali yang dikirimkan lewat DAC.

Keluaran dari sensor dinormalisasi dalam masukan jaringan RBF pada dalam jangkauan 0–15. Secara teoritis jumlah fungsi *basis* yang dipilih bebas, namun dengan adanya normalisasi tersebut diperlukan batasan jumlah maksimum fungsi *basis* yang digunakan. Jika jumlah fungsi *basis* yang dipilih terlalu banyak maka lebar fungsi *basis* yang terjadi akan menjadi sangat sempit, sehingga tiap *center* jaringan RBF menjadi berimpitan. Jumlah fungsi *basis* maksimal ditentukan sebesar 15. *Deviasi* yang menentukan kelengkungan dari tiap fungsi *basis* ditentukan dengan persamaan:

$$Deviasi (\sigma) = c[1]/3,05$$

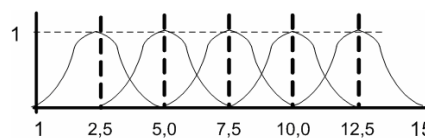
Misalkan, jika jumlah fungsi *basis* yang dipilih adalah 5, maka nilai *center* tiap fungsi *basis* adalah:

$$\begin{aligned} c[1] &= (15/(5+1)) * 1 = 2,5 \\ c[2] &= (15/(5+1)) * 2 = 5,0 \\ c[3] &= (15/(5+1)) * 3 = 7,5 \\ c[4] &= (15/(5+1)) * 4 = 10,0 \\ c[5] &= (15/(5+1)) * 5 = 12,5 \end{aligned}$$

Deviasi dari masing–masing fungsi *basis* yang terbentuk dihitung sebagai berikut:

$$Deviasi (\sigma) = 2,5 / 3,05 = 0,819$$

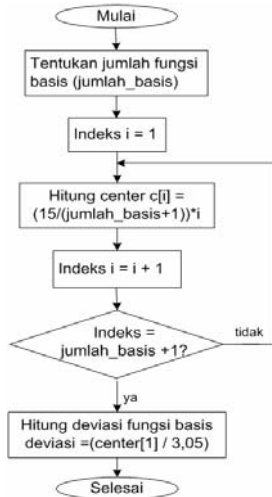
Secara grafis jaringan syaraf RBF yang dibentuk oleh 5 fungsi *basis* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik jaringan RBF dengan 4 fungsi *basis*.

Pada jaringan RBF, 1 fungsi *basis* mempunyai 1 bobot sehingga jumlah memori yang dibutuhkan untuk menyimpan bobot adalah sebanyak fungsi *basis* yang digunakan +1. Tambahan 1 memori adalah untuk menyimpan bobot *basis*.

Tahap pertama yang perlu dilakukan pada perancangan algoritma kontrol jaringan syaraf RBF adalah merancang jaringan RBF yang akan digunakan. Untuk membentuk jaringan RBF diperlukan lebih dari 1 fungsi *basis*. Dengan masukan ternormalisasi antara 0–15 dan jumlah fungsi *basis* maksimal yang diperbolehkan adalah 15, proses perancangan jaringan RBF yang akan digunakan ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 7. Proses perancangan jaringan RBF meliputi penentuan jumlah fungsi *basis* yang digunakan, perhitungan *center* tiap fungsi *basis* dan penentuan *deviasi* masing–masing fungsi *basis*.

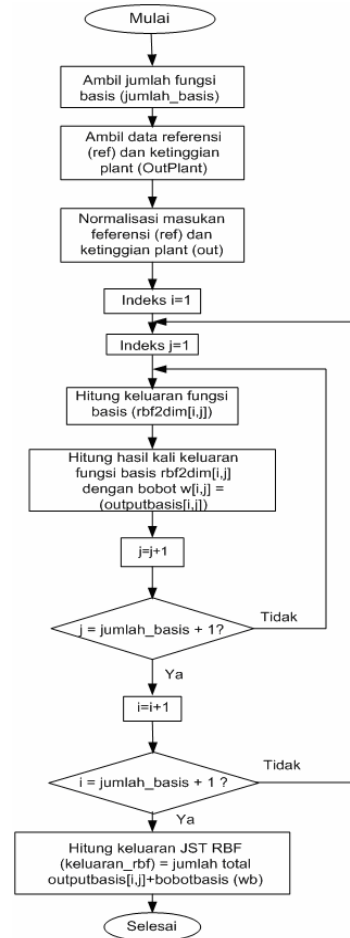


Gambar 7. Diagram alir perancangan jaringan RBF yang digunakan.

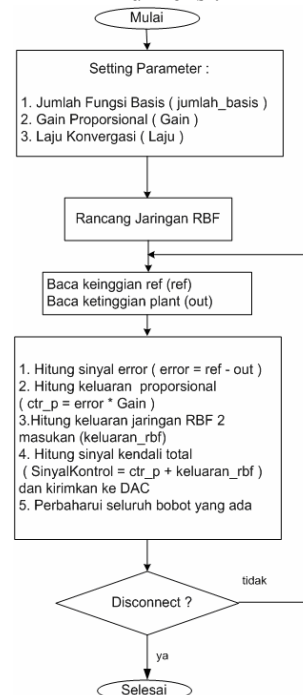
Langkah berikutnya adalah menghitung keluaran jaringan RBF dengan masukan yang diberikan yaitu ketinggian referensi dan ketinggian *plant*. Algoritma untuk menghitung keluaran jaringan RBF 2 masukan ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 8. Proses perhitungan keluaran jaringan RBF 2 dimensi diawali dengan proses pembacaan data masukan yang berupa ketinggian referensi (referensi) dan ketinggian *plant* (*output*). Kedua masukan tersebut kemudian dinormalisasi pada range 0-15. Keluaran fungsi *basis* yang diaktifkan oleh 2 masukan dihitung dengan mengalikan keluaran fungsi *basis* akibat masukan ketinggian referensi dan keluaran fungsi *basis* akibat ketinggian *plant* ($rbf2dim[i,j]$). Setiap keluaran fungsi *basis* dikalikan dengan bobotnya sendiri dan disimpan pada variabel $outputbasis[i,j]$. Proses terakhir adalah menjumlahkan seluruh hasil kali keluaran tiap fungsi *basis* dengan bobotnya sendiri kemudian ditambahkan dengan bobot *basis* (*wb*). Keluaran jaringan syaraf 2 dimensi ini disimpan pada variabel keluaran_Rbf.

Aplikasi algoritma kontrol jaringan syaraf tiruan RBF secara keseluruhan ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 9. Proses kontrol diawali dengan *setting* parameter jaringan RBF yang meliputi jumlah fungsi *basis* yang digunakan, *gain* proporsional dan laju konvergensi jaringan. Berdasarkan data parameter yang telah ditentukan, kemudian dirancang jaringan RBF sesuai dengan algoritma yang sudah ditentukan. Sinyal *error* yang merupakan selisih antara ketinggian *plant* dan ketinggian referensi dalam level tegangan, digunakan untuk menghitung keluaran proporsional (ctr_p). Di sisi lain, ketinggian *plant* dan ketinggian referensi digunakan sebagai masukan untuk jaringan syaraf. Sinyal kontrol yang dikirimkan ke *plant* adalah penjumlahan dari keluaran jaringan syaraf RBF dan keluaran proporsional (ctr_p). Proses selanjutnya adalah pembaharuan bobot jaringan

dengan menggunakan algoritma LMS menggunakan data latih berupa keluaran proporsional (ctr_p).



Gambar 8. Diagram alir perhitungan keluaran RBF 2 dimensi.

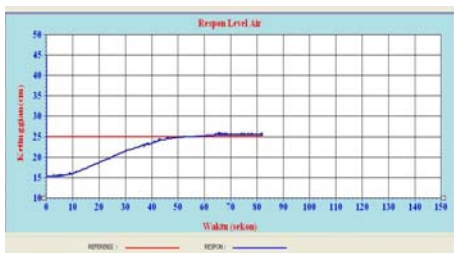


Gambar 9. Diagram alir algoritma kontrol RBF.

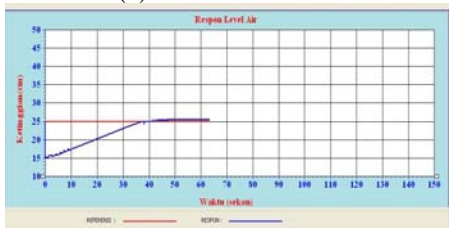
4. PENGUJIAN

Pengujian jaringan syaraf RBF dilakukan untuk mengetahui pengaruh masing-masing parameter jaringan syaraf RBF yaitu laju konvergensi, *gain* proporsional dan jumlah fungsi *basis* terhadap dinamika respon *plant* kendali ketinggian air. Pengujian juga dilakukan dengan gangguan pada sistem untuk menguji kestabilan system.

Hasil pengujian pengaruh nilai laju konvergensi pada jaringan RBF diperlihatkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.

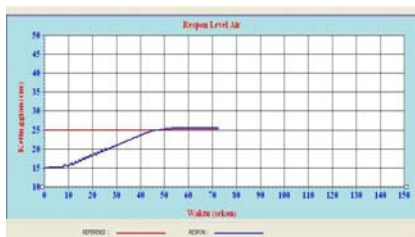


(a) Bobot awal nol.

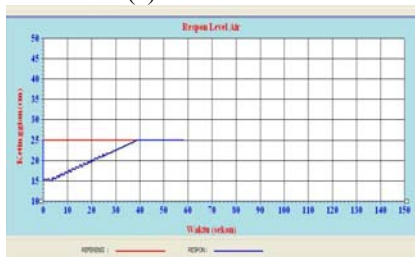


(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan.

Gambar 11. Respon transien kendali RBF untuk referensi 25 cm *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,3, jumlah fungsi *basis* 10.



(a) Bobot awal nol.



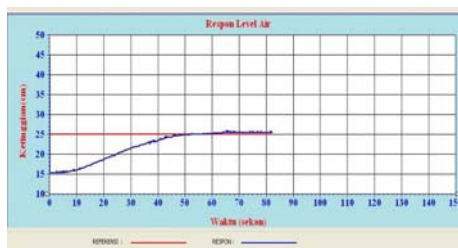
(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan.

Gambar 11. Respon transien kendali RBF untuk referensi 25 cm *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,8, jumlah fungsi *basis* 10.

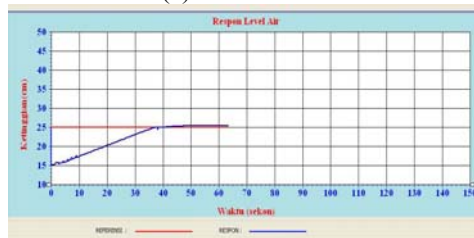
Hasil pengujian pengaruh nilai *gain* proporsional pada jaringan RBF diperlihatkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.

Tabel 1. Data parameter unjuk kerja sistem dengan kendali RBF pada referensi 25 cm (ketinggian awal 15 cm) terhadap perubahan laju konvergensi.

Parameter Unjuk Kerja	<i>Gain</i> Proporsional = 0,3 Laju konvergensi = 0,3 Jumlah fungsi <i>basis</i> = 10		<i>Gain</i> Proporsional = 0,3 Laju konvergensi = 0,8 Jumlah fungsi <i>basis</i> = 10	
	Bobot awal nol	Bobot hasil latihan	Bobot awal nol	Bobot hasil latihan
Waktu penetapan (detik)	64	48	54	38
Waktu naik (detik)	48	38	45	36

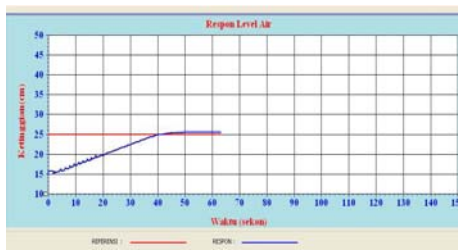


(a) Bobot awal nol.

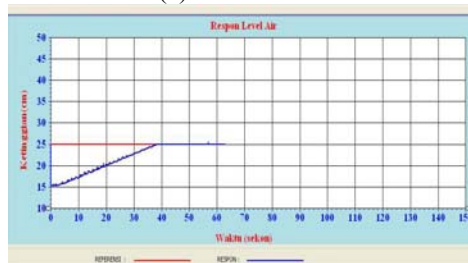


(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan.

Gambar 12. Respon transien kendali RBF untuk referensi 25 cm *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,3 dan jumlah fungsi *basis* 10.



(a) Bobot awal nol.



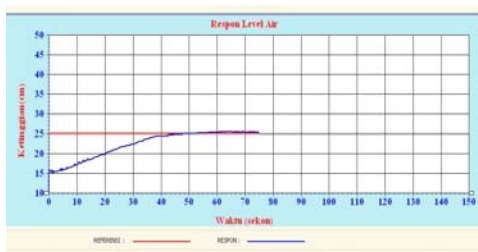
(b) Bobot hasil 2 kali pembelajaran.

Gambar 13. Respon transien kendali RBF referensi 25 cm *gain* proporsional 0,8 dan laju konvergensi 0,3 jumlah fungsi *basis* 10.

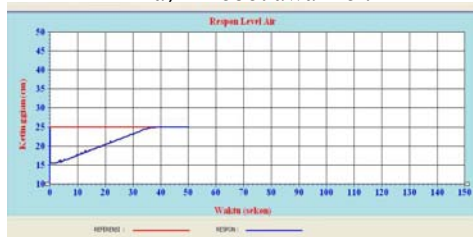
Tabel 2. Data parameter unjuk kerja sistem dengan kendali RBF pada referensi 25 cm (ketinggian awal 15 cm) terhadap perubahan *gain* proporsional.

Parameter Unjuk Kerja	Gain Proporsional = 0,3 Laju konvergensi = 0,3 Jumlah fungsi <i>basis</i> = 10		Gain Proporsional = 0,8 Laju konvergensi = 0,3 Jumlah fungsi <i>basis</i> = 10	
	Bobot awal nol	Bobot hasil latihan	Bobot awal nol	Bobot hasil latihan
Waktu penetapan (detik)	64	48	46	38
Waktu naik (detik)	48	38	38	36

Hasil pengujian pengaruh nilai jumlah fungsi *basis* pada RBF diperlihatkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.

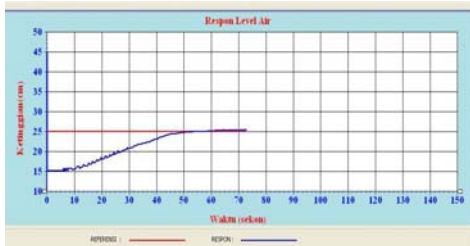


a) Bobot awal nol.

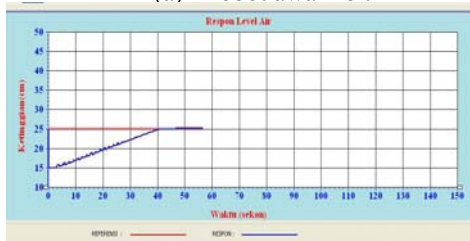


(b) Bobot hasil 2 kali pelatihan.

Gambar 14. Respon transien kendali RBF untuk referensi 25 cm *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,3 dan jumlah fungsi *basis* 5.



(a) Bobot awal nol.



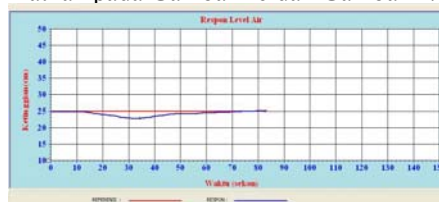
(b) Bobot hasil 2 kali pembelajaran.

Gambar 15. Respon transien kendali RBF referensi 25 cm *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,3 dan jumlah fungsi *basis* 14.

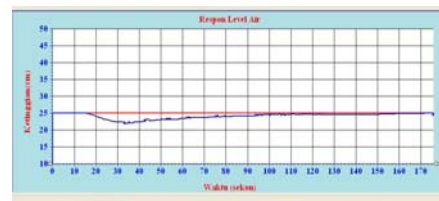
Tabel 3. Data parameter unjuk kerja sistem dengan kendali RBF pada referensi 25 cm (ketinggian awal 15 cm) terhadap perubahan jumlah fungsi *basis*.

Parameter Unjuk Kerja	Gain Proporsional = 0,3 Laju konvergensi = 0,3 Jumlah fungsi <i>basis</i> = 5		Gain Proporsional = 0,3 Laju konvergensi = 0,3 Jumlah fungsi <i>basis</i> = 14	
	Bobot awal nol	Bobot hasil latihan	Bobot awal nol	Bobot hasil latihan
Waktu penetapan (detik)	58	38	62	48
Waktu naik (detik)	42	35	48	38

Hasil pengujian gangguan untuk RBF diperlihatkan pada Gambar 16 dan Gambar 17.



Gambar 16. Pengujian kendali RBF *gain* proporsional 0,6 dan laju konvergensi 0,3, jumlah fungsi *basis* 10, referensi ketinggian 25 cm, gangguan pembukaan *valve* $\frac{1}{4}$ buka penuh pada detik ke-14.



Gambar 17. konvergensi 0,3, jumlah fungsi *basis* 10, referensi ketinggian 25 cm, gangguan pembukaan *valve* $\frac{1}{2}$ buka penuh pada detik ke-16.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan analisis yang dilakukan didapatkan hal-hal penting sebagai berikut:

- Respon transien keluaran ketinggian air sangat tergantung terhadap pemilihan parameter-parameter kendali jaringan RBF, yaitu besarnya laju konvergensi, *gain* proporsional dan Jumlah fungsi *basis*.
- Pemilihan laju konvergensi yang relatif lebih besar akan menyebabkan keluaran transien ketinggian air lebih cepat mencapai keadaan tunak (penetapan).
- Pemilihan *gain* proporsional yang relatif lebih besar akan menyebabkan keluaran transien ketinggian air lebih cepat mencapai keadaan tunak.
- Pemilihan jumlah fungsi *basis* yang relatif lebih besar akan menyebabkan keluaran transien ketinggian air relatif lebih lambat mencapai keadaan tunak.
- Pengaruh nilai bobot akan menentukan besarnya keluaran sinyal kontrol yang akan dikirim ke *plant* yaitu suatu dengan nilai bobot yang terakhir disimpan oleh jaringan syaraf RBF.

PUSTAKA

- [1] Agfianto Eko Putra, “Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/55 (teori dan aplikasi)”, Gava Media, Yogyakarta, 2002.
- [2] Brown, Martin and Harris, *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*, Prentice Hall Inc, 1994.
- [3] Coughlin, Robert and Federick Driscoll, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, Erlangga, Jakarta.
- [4] Haykin, Simon, “*Neural Networks- A Comprehensive Foundation*”, Macmillan Colege-Publishing Company Inc, 1994.
- [5] Kadir, Abdul, *Panduan Pemrograman Visual C++*, Andi Offset, Yogyakarta, 2004.
- [6]www.data2money.com/PDF/RBFpaper.pdf