

APLIKASI JARINGAN SYARAF TIRUAN B-SPLINE PADA SISTEM PENGATURAN SUHU CAIRAN

Istichori¹, Iwan Setiawan, ST. MT.², Wahyudi, ST. MT.²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia
E-mail: Istichori@yahoo.com

Abstrak

Dalam perancangan sistem kendali secara konvensional, parameter-parameter kendali dihitung berdasarkan parameter plant. Secara praktis seringkali parameter tersebut tidak diketahui, sehingga perancangan sistem kendali harus diawali dengan pengidentifikasian plant yang akan dikendalikan. Jaringan Syaraf Tiruan (JST) dibangun dengan tujuan untuk mengemulasikan (meniru) secara fungsional mekanisme kerja otak manusia dalam menyimpan, belajar, dan mengambil kembali pengetahuan yang tersimpan dalam sel syaraf atau neuron. Beberapa jenis jaringan syaraf tiruan dapat diaplikasikan pada sistem kendali. B-Spline adalah salah satu jenis jaringan syaraf tiruan yang dapat digunakan sebagai komponen pengendali plant yang parameter-parameternya tidak diketahui tanpa adanya proses identifikasi plant terlebih dahulu. Dalam hal ini jaringan syaraf tiruan B-Spline digunakan sebagai komponen pengendali suhu cairan dengan parameter yang tidak diketahui.

Pada tugas akhir ini dilakukan pengujian terhadap unjuk kerja jaringan syaraf tiruan B-Spline pada sistem pengaturan suhu cairan secara online. Parameter yang diteliti adalah pengaruh gangguan (disturbance), kemampuan mengikuti perubahan referensi, dan pengaruh besar gain proporsional terhadap dinamika keluaran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk nilai parameter yang sama yaitu nilai gain proporsional, nilai laju konvergensi, dan referensi suhu pada sistem pengaturan suhu cairan, fungsi basis orde 2 memiliki tanggapan respon dengan waktu penetapan yang lebih cepat dan lonjakan respon yang lebih kecil dibandingkan dengan fungsi basis B-Spline orde 1 dan orde 3. Semakin besar laju konvergensi dan gain proporsional yang diberikan semakin cepat waktu naik dan waktu penetapan respon keluaran.

Kata kunci : Jaringan syaraf tiruan B-Spline, Sistem pengaturan suhu cairan, Gain proporsional.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya dalam merancang suatu sistem kendali harus diketahui terlebih dahulu parameter-parameter dari sistem yang akan dikendalikan. Oleh karena itu, perlu adanya proses identifikasi terlebih dahulu dari sistem yang akan dikendalikan secara akurat. Tetapi pada kenyataannya seringkali parameter sistem tersebut sulit ditentukan, baik karena kompleksitas sistem maupun kondisi dinamik sistem (proses). Hal lain yang tak kalah penting adalah karakteristik dari gangguan (*disturbance*) yang bervariasi. Atas dasar hal ini maka diperlukan sebuah sistem kendali yang dapat mengantisipasi dan mengatasi kendala-kendala tersebut.

Sebuah pendekatan dalam pengendalian sistem yang parameter-parameternya tidak diketahui atau sulit untuk ditentukan dapat dilakukan dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan. Dengan jaringan syaraf tiruan maka parameter-parameter sistem dapat ditentukan tanpa adanya proses identifikasi terhadap sistem yang akan dikendalikan. B-Spline 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.

Pada tugas akhir ini dilakukan perancangan *plant* sistem pengaturan suhu cairan dan perancangan serta pengujian terhadap jaringan syaraf tiruan B-Spline pada *plant* pengaturan suhu cairan. Sistem ini diimplementasikan dengan menggunakan PC (*Personal Computer*) dengan program bantu Borland Delphi 6.0. Disamping respon sistem, parameter lain yang juga diteliti adalah pengaruh gangguan (*disturbance*), kemampuan mengikuti perubahan referensi, pengaruh besar laju konvergensi dan pengaruh besar *gain* proporsional terhadap respon sistem.

1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah mengaplikasikan jaringan syaraf tiruan B-Spline pada sistem pengaturan suhu cairan secara *online*.

1.3 Pembatasan Masalah

1. Sistem pengaturan suhu diaplikasikan untuk mengatur suhu cairan yaitu air dan hanya untuk proses pemanasan.

2. Plant yang dikontrol adalah plant pengatur suhu cairan dengan pengontrol gelombang penuh tegangan AC satu fasa, dan digunakan triac sebagai komponen pengatur tegangan.
3. Volume air dalam tabung sebesar 11,6 liter.
4. Debit air yang masuk dalam tabung sama dengan debit air yang keluar dalam tabung yaitu sebesar 14,7 cm³/detik.
5. Pemanas yang digunakan ada 3 buah dengan daya masing-masing 350 watt.
6. Jaringan syaraf tiruan yang diuji adalah jaringan syaraf tiruan B-Spline dengan orde fungsi basis 1, 2, dan 3.
7. Pengendalian dengan jaringan syaraf tiruan B-spline ini tidak dibandingkan dengan metode lain.
8. Algoritma yang digunakan untuk pembaharuan bobot adalah algoritma LMS.
9. Range pengaturan yang diperbolehkan adalah 30° C sampai dengan 45° C.
10. Suhu air yang dikendalikan dianggap merata didalam tangki penampung I.
11. Suhu yang dijadikan referensi untuk perhitungan pada komputer adalah suhu hasil pembacaan pada sensor suhu LM35.
12. Pengujian unjuk kerja dilakukan melalui pengujian pengaruh nilai *gain* proporsional, pengujian pengaruh nilai laju konvergensi, pengujian pengaruh bobot pembelajaran, pengujian referensi naik, dan pengujian gangguan terhadap respon sistem.
13. Penentuan batasan nilai *gain* proporsional dan laju konvergensi yang digunakan pada pengujian dilakukan secara empiris.
14. Pembuatan program bantu menggunakan Borland Delphi 6.0, dan interface melalui komunikasi serial, ADC 0804 dan DAC 0808.
15. Mikrokontroler at89s51 hanya digunakan sebagai pengatur aliran data untuk komunikasi serial.

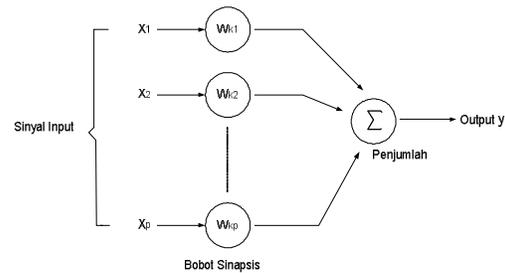
II. DASAR TEORI

2.1 Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan merupakan salah satu representasi buatan dari otak manusia yang selalu mencoba mensimulasikan proses menyimpan, belajar, dan mengambil kembali pengetahuan yang tersimpan dalam sel syaraf atau *neuron* pada otak manusia tersebut. Jaringan syaraf tiruan ini pada dasarnya adalah fungsi pemetaan masukan keluaran sistem yang bebas model matematis atau dikenal dengan istilah *estimator* bebas model. Sistem ini memetakan kondisi ke aksi, dalam hal ini sistem-sistem dinamis yang dimodelkan tidak diekspresikan secara matematis menggunakan fungsi alih tetapi direpresentasikan dengan

menggunakan kotak fungsional yang mengestimasi fungsi-fungsi dari data pelatihan.^[11]

Seperi halnya otak manusia, jaringan syaraf tiruan juga terdiri dari beberapa *neuron* dimana tiap-tiap *neuron* dengan *neuron* yang lainnya saling berhubungan. *Neuron* tersebut akan memproses tiap informasi yang diterima kemudian dimodelkan dalam suatu bentuk model *neuron*.^[6] Model dari *neuron* diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Model *neuron*.

Pada jaringan syaraf tiruan, setiap *neuron* akan dikumpulkan dalam lapisan-lapisan (*layers*) yang disebut dengan lapisan *neuron* (*neuron layers*). Setiap *neuron* pada suatu lapisan *neuron* akan dihubungkan dengan *neuron* pada suatu lapisan *neuron* yang lainnya. Hubungan antar *neuron* tersebut diasosiasikan dengan suatu nilai bobot (*w*) tertentu. Nilai bobot ini akan menentukan derajat pengaruh dari sebuah *neuron* ke *neuron* lainnya. Pengaruh dari *neuron* ke *neuron* lainnya merupakan hasil kali antara nilai keluaran dari suatu *neuron* dengan nilai bobot (*w*) yang menghubungkan *neuron* tadi.^[6]

Jaringan syaraf tiruan memiliki kemampuan untuk belajar terhadap suatu kondisi lingkungan dan meningkatkan performansinya melalui pembelajaran. Proses pembelajaran jaringan dilakukan melalui proses iterasi terhadap nilai bobot dan idealnya jaringan menjadi adaptif setelah proses pembelajaran.^[3]

2.2 Algoritma Least Mean Square (LMS)^[3]

Algoritma LMS merupakan salah satu algoritma yang digunakan untuk pembelajaran atau *update* bobot jaringan. Algoritma ini banyak digunakan karena kesederhanaan prosesnya dan kemudahan dalam komputasi. Algoritma LMS akan meminimalkan fungsi rata-rata kuadrat *error*.¹ Secara matematis algoritma yang digunakan untuk pembelajaran bobot jaringan dituliskan sebagai berikut :

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

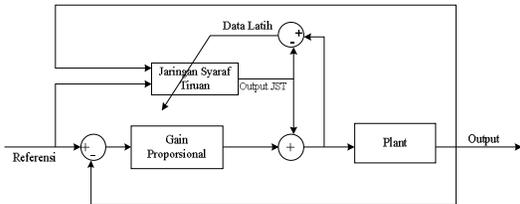
dengan :

- $w(k+1)$ = Bobot pada cacah ke $k+1$
- $w(k)$ = Bobot pada cacah ke k
- η = Laju konvergensi ($0 < \eta < 1$)
- $x(k)$ = Masukan yang diboboti

- $d(k)$ = Keluaran yang diinginkan
- $y(k)$ = Keluaran aktual
- $d(k)-y(k)$ = Sinyal *error* yang merupakan data latih

2.3 Struktur Kendali Fixed Stabilizing Controller

Fixed Stabilizing Controller merupakan salah satu arsitektur kendali adaptif. Arsitektur kendali ini diusulkan oleh Kraft G pada tahun 1990. Arsitektur kendali *fixed stabilizing controller* diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Blok Diagram kendali dengan skema *fixed stabilizing controller*.^[4]

Blok diagram *fixed stabilizing controller* merupakan blok diagram sistem kontrol adaptif langsung dengan keluaran kontroler umpan balik penstabil digunakan untuk melatih model *inverse*.^[1] Tujuan dari pembelajaran model *inverse* adalah memformulasikan sebuah pengendali, sehingga blok diagram kontrol *plant* secara keseluruhan memiliki fungsi alih satuan. Blok diagram kontrol *fixed stabilizing controller* memiliki dua buah kalang, kalang pertama adalah kalang umpan balik penstabil dan kalang kedua adalah kalang pembelajaran model *inverse*. Pembelajaran model *inverse* dapat dilakukan menggunakan jaringan syaraf tiruan dan sebagai kontrol umpan balik penstabil dapat digunakan *gain* proporsional.

2.4 Jaringan Syaraf Tiruan B-Spline

B-Spline adalah salah satu jenis jaringan syaraf tiruan (JST) yang dapat digolongkan dalam kelas AMN (*Associative Memory Network*) yang dapat menyimpan informasi secara lokal. Hal ini menyebabkan laju pembelajaran berlangsung relatif lebih cepat dan secara efisien dapat digunakan sebagai komponen pengendali plant secara *on line*. Seperti halnya jaringan syaraf tiruan jenis AMN lainnya, keluaran jaringan B-Spline merupakan kombinasi bobot-bobot adaptif dari jumlah fungsi basis yang diaktifkan oleh masukan tertentu.

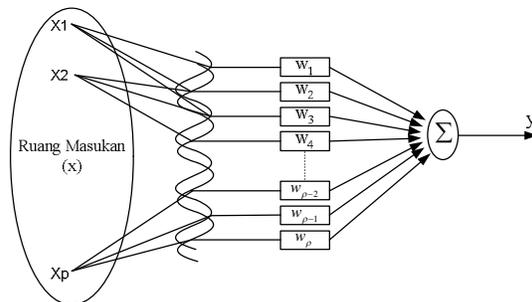
Secara historis B-spline telah digunakan secara umum sebagai algoritma pencocokan fungsi (*surface fitting*) didalam bidang visualisasi grafis selama 20 tahun belakangan ini. Penggunaan pertama B-spline pertama kali digunakan pada tahun 1972 oleh Cox (1972) dan DeBoor (1972). Ketika B-Spline digunakan sebagai model set data

terdapat kemungkinan memodifikasi data secara lokal, dan juga perubahan yang terjadi secara bersamaan pada respon jaringan lokal. Hal ini menjadi salah satu kemampuan yang menjadikan B-spline menarik untuk model adaptif dan kontrol.

B-spline telah digunakan pada beberapa bidang yang berbeda dalam riset robotik. Penerapannya adalah pada pembangkitan lintasan (jalan) dimana kehalusan lintasan yang dihasilkan. Penggunaan lainnya adalah algoritma pemarkiran mobil secara otomatis, kompensasi non-linier robotik, dan pemodelan aktuator robotik. Kemampuan utama algoritma B-spline adalah nilai outputnya yang halus yang disebabkan oleh bentuk fungsi basis. Keluaran dari fungsi basis secara otomatis ditentukan oleh algoritmanya.^[1]

2.4.1 Struktur B-Spline Standar

Jumlah fungsi basis yang memberi kontribusi pada keluaran B-Spline adalah konstan yaitu sebanyak p . Dalam hal ini ada kaitan langsung antara jumlah fungsi basis yang diaktifkan oleh masukan tertentu dengan orde fungsi basis B-Spline yang dipilih. Struktur jaringan syaraf B-Spline untuk masukan x dan keluaran skalar y diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram blok jaringan syaraf tiruan B-Spline.

Untuk masukan x dan keluaran skalar y seperti diperoleh keluaran B-Spline yaitu :

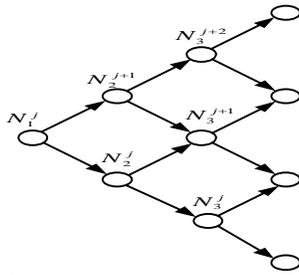
$$y(x) = \sum_{i=1}^p N_i(x)w_{ji}(x) \dots\dots\dots(2)$$

dengan :

- $w_{ji}(x)$ = nilai bobot ke-I dengan indeks bobot ke-j
- $N_i(x)$ = keluaran fungsi basis ke-i
- $y(x)$ = keluaran jaringan syaraf B-Spline

2.4.2 Univariate Basis Function

Keluaran fungsi basis dapat dihitung dengan menggunakan hubungan *recurrence*. Hubungan *recurrence* tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hubungan recurrence.

Keluaran fungsi basis yang diaktifkan oleh masukan tertentu (x) dapat dihitung dengan menggunakan hubungan recurrence dibawah ini :

$$N_k^j(x) = \left(\frac{x - \lambda_{j-k}}{\lambda_{j-1} - \lambda_{j-k}} \right) N_{k-1}^{j-1}(x) + \left(\frac{\lambda_j - x}{\lambda_j - \lambda_{j-k+1}} \right) N_{k-1}^j(x) \dots (3)$$

$$N_1^j(x) = 1 \text{ jika } x \in I_j = (\lambda_{j-1}, \lambda_j) \\ = 0, \text{ lainnya}$$

dengan :

λ_j = knot (posisi) ke-j dan $I_j = (\lambda_{j-1}, \lambda_j)$ adalah interval ke-j

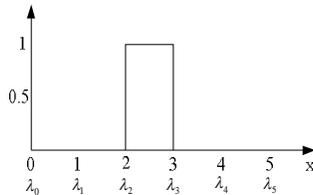
k = orde fungsi basis

N = keluaran fungsi basis^[1]

Orde fungsi basis adalah tingkatan dalam hubungan recurrence pada jaringan syaraf B-Spline yang menentukan banyaknya jumlah fungsi basis yang diaktifkan oleh masukan tertentu. Orde 1 yaitu tingkatan pertama dalam hubungan recurrence dengan nilai k=1, sehingga jumlah fungsi basis yang diaktifkan untuk orde 1 hanya N_1^j . Orde 2 yaitu tingkatan kedua dalam hubungan recurrence dengan nilai k=2, sehingga fungsi basis yang diaktifkan adalah N_1^j , N_2^j , dan N_2^{j+1} . Orde 3 adalah tingkatan ketiga dalam hubungan recurrence dengan nilai k=3, sehingga fungsi basis yang diaktifkan adalah N_1^j , N_2^j , N_2^{j+1} , N_3^j , N_3^{j+1} , dan N_3^{j+2} .

2.4.2.1 Fungsi Basis Orde 1

Fungsi basis orde 1 dapat diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 5 Fungsi basis orde 1.

Jika N_1^j adalah fungsi basis ke-j dan I_j adalah interval ke-j yaitu $(\lambda_{j-1}, \lambda_j)$, maka keluaran fungsi basis orde 1 untuk masukan x adalah :

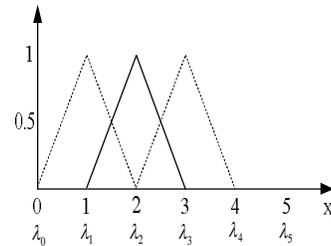
$$N_1^j(x) = 1 \text{ jika } x \in I_j = (\lambda_{j-1}, \lambda_j) \dots \dots \dots (4) \\ = 0, \text{ lainnya}$$

Secara matematis persamaan (4) dapat diimplementasikan oleh fungsi berikut :

$$j = [x] \\ N(j) = 1$$

2.4.2.2 Fungsi Basis Orde 2

Fungsi basis orde 2 dapat diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Fungsi basis orde 2.

Keluaran fungsi basis orde 2 untuk masukan x adalah :

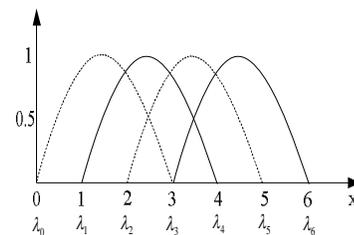
$$N_2^j(x) = \left(\frac{x - \lambda_{j-2}}{\lambda_{j-1} - \lambda_{j-2}} \right) N_1^{j-1}(x) + \left(\frac{\lambda_j - x}{\lambda_j - \lambda_{j-1}} \right) N_1^j(x) \dots \dots (5)$$

dalam hal ini $N_1^{j-1}(x)$ dan $N_1^j(x)$ dihitung dengan menggunakan fungsi basis orde 1 berikut :

$$N_1^j(x) = 1 \text{ jika } x \in I_j = (\lambda_{j-1}, \lambda_j) \\ = 0, \text{ lainnya}$$

2.4.2.3 Fungsi Basis Orde 3

Fungsi basis orde 3 dapat diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Fungsi basis orde 3.

Keluaran fungsi basis orde 3 untuk masukan x adalah :

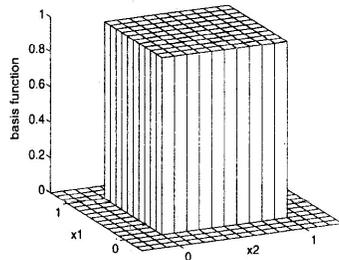
$$N_3^j(x) = \left(\frac{x - \lambda_{j-3}}{\lambda_{j-1} - \lambda_{j-3}} \right) N_2^{j-2}(x) + \left(\frac{\lambda_j - x}{\lambda_j - \lambda_{j-2}} \right) N_2^j(x) \dots \dots (6)$$

dalam hal ini $N_2^{j-2}(x)$ dan $N_2^j(x)$ dihitung dengan menggunakan fungsi basis orde 2 berikut :

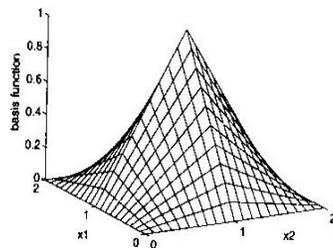
$$N_2^j(x) = \left(\frac{x - \lambda_{j-2}}{\lambda_{j-1} - \lambda_{j-2}} \right) N_1^{j-1}(x) + \left(\frac{\lambda_j - x}{\lambda_j - \lambda_{j-1}} \right) N_1^j(x)$$

2.4.3 Fungsi Basis Dua Dimensi^[1]

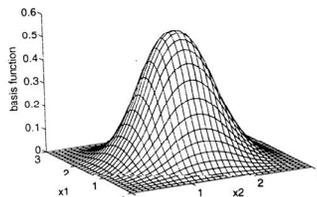
Fungsi basis dua dimensi merupakan penggambaran hubungan antara nilai fungsi basis referensi dan nilai fungsi basis output *plant*. Nilai fungsi basis dua dimensi ini digunakan untuk mencari letak nilai interval dan nilai fungsi yang baru setelah penggabungan nilai masukan yaitu dari masukan referensi dan masukan output *plant*. Nilai interval ini yang akan mengaktifkan letak interval bobot fungsi basis mana yang akan diaktifkan.



Gambar 8 Fungsi basis dua dimensi B-spline orde 1.



Gambar 9 Fungsi basis dua dimensi B-spline orde 2.



Gambar 10 Fungsi basis dua dimensi B-spline orde 3.

III. PERANCANGAN

3.1 Perancangan Kontrol Jaringan Syaraf Tiruan B-Spline

Perancangan kontrol jaringan syaraf tiruan B-Spline dilakukan untuk memberikan batasan terhadap besarnya parameter kontroller yang digunakan. Parameter kontroller tersebut meliputi gain proporsional, laju konvergensi, dan orde B-spline. Perancangan juga diperlukan untuk menyusun algoritma kontrol B-spline yang akan diimplementasikan pada komputer.

3.1.1 Penentuan Besar Gain Proporsional

Pada struktur kendali *fixed stabilising controller* digunakan *gain* proporsional sebagai kontrol umpan balik penstabil. Penentuan besar *gain* proporsional pada pengendalian ini dilakukan secara

empiris. Besar maksimum *gain* proporsional dibatasi oleh tegangan maksimum DAC yang digunakan. Pada pengujian ini besar tegangan maksimum DAC yang digunakan (DAC 0808) adalah 5 volt, maka pada kondisi awal dimana nilai *error* maksimum sinyal kendali proporsional diusahakan tidak melebihi 5 volt.

Pada kondisi awal (air belum dipanaskan), suhu yang terbaca oleh ADC adalah ± 28 °C dan hasil pembacaan ADC pada kondisi awal adalah $\pm 2,8$ volt. Pada suhu referensi maksimum yang diperbolehkan (45 °C), tegangan yang dikirimkan ke DAC adalah sebesar 4,5 volt. Besarnya sinyal *error* adalah $4,5\text{volt} - 2,8\text{volt} = 1,7$ volt. Agar tidak melampaui batas maksimum DAC maka besarnya *gain* maksimum yang boleh diberikan adalah sebesar $5/1,7=2,94$.

3.1.2 Penentuan Besar Laju Konvergensi

Besarnya laju konvergensi yang dipilih akan menentukan kecepatan konvergensi bobot-bobot pembelajaran. Jika laju konvergensi yang dipilih relatif kecil, maka kecepatan pembelajaran akan berjalan secara lambat, sedangkan jika laju konvergensi yang dipilih relatif besar, maka dimungkinkan terjadinya *over corrected* pada bobot-bobot yang diperbaharui. Pemilihan besarnya laju konvergensi yang digunakan pada pengontrolan dilakukan secara empiris. Jangkauan nilai laju konvergensi adalah $0 < \text{laju konvergensi} < 1$.

3.1.3 Penentuan Jangkauan Nilai Masukan

Pada struktur kendali *fixed stabilising controller* memiliki 2 buah masukan yaitu masukan pertama adalah referensi dan masukan kedua adalah keluaran suhu dari *plant*. Pada tugas akhir ini, jangkauan nilai suhu referensi yang diperbolehkan adalah batas bawah sebesar 30 °C dan batas atas sebesar 45 °C. Pengesetan batas bawah dilakukan atas pertimbangan bahwa pada kondisi awal (air belum dipanaskan) suhu air dibawah 30 °C dan pengesetan batas atas berdasarkan pertimbangan bahwa suhu air maksimal dalam *plant* adalah ± 48 °C, nilai ini didapatkan pada pengukuran kalang terbuka dengan tegangan kontrol maksimum yaitu 5 volt. Sedangkan pengesetan nilai suhu dari *plant* dibatasi dari 0 °C sampai dengan 50 °C. Hal ini dilakukan berdasarkan pertimbangan bahwa suhu air maksimal dalam *plant* adalah ± 48 °C.

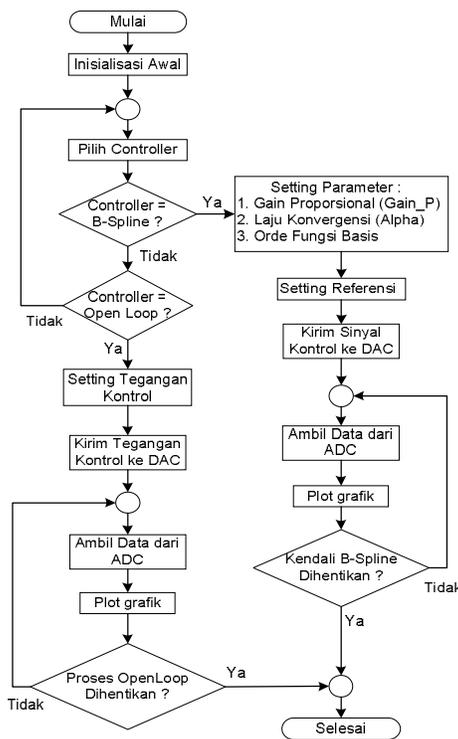
3.1.4 Normalisasi Jangkauan Nilai Masukan

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 sampai 5. Normalisasi jangkauan nilai masukan kedua (keluaran suhu dari *plant*) dibatasi oleh keluaran ADC yang digunakan. Pada tugas akhir ini, ADC yang digunakan 8 bit (ADC 0804) sehingga keluaran ADC adalah 0 sampai 255 dinormalisasi dalam fungsi basis pada jangkauan 0 sampai 5.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Perangkat lunak yang digunakan adalah bahasa pemrograman Borland Delphi versi 6.0. Perangkat lunak ini berfungsi untuk mengaplikasikan algoritma kontrol B-Spline dan untuk memonitoring kondisi suhu *plant* yang dikontrol. Diagram alir program utama diperlihatkan pada Gambar 11.



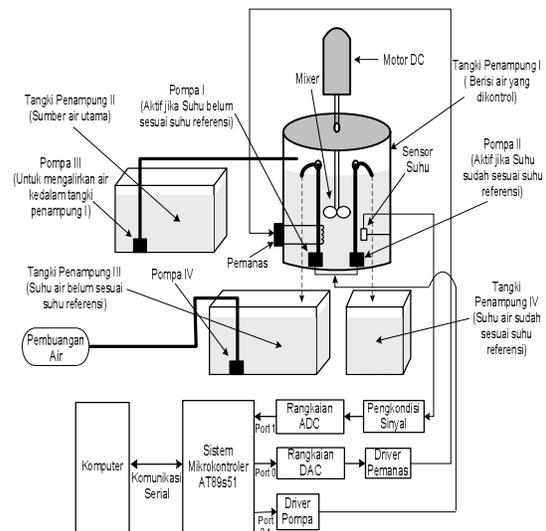
Gambar 11 Diagram alir program utama.

Proses inisialisasi meliputi inisialisasi port serial (*portNumber, baudrate, databits, stopbits, parity, flow control*), inisialisasi bobot awal jaringan, dan inisialisasi variabel.

3.3 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)

Perangkat keras dirancang untuk membentuk sistem pengaturan suhu yaitu suhu air yang mengalir keluar dari tangki penampung I. Tangki penampung I yang digunakan adalah sebuah tabung tahan panas dengan diameter atas 30 cm,

diameter bawah 25 cm, dan tinggi 26 cm. Tangki penampung I berisi air yang suhunya dikendalikan. Volume air yang dikendalikan dalam tangki penampung I sebesar 11,6 liter. Besarnya debit air yang masuk sama dengan debit air yang keluar pada tangki penampung I yaitu sebesar 14,7 cm³/detik. Pada tangki penampung I terdapat pengaduk (*mixer*) yang berfungsi untuk mengaduk air dalam tangki penampung I sedemikian sehingga suhu dapat dianggap tersebar secara merata pada air. Sebagai *mixer* digunakan motor DC yang dilengkapi dengan kipas pada ujung putarannya. Tangki penampung I juga dilengkapi dengan tiga buah pemanas yang berfungsi untuk menaikkan suhu air yang terdapat didalamnya. Tiga buah pemanas yang digunakan yaitu pemanas listrik (*heater*) dengan daya masing-masing yaitu 350 watt dimana pengoperasiannya dikendalikan oleh *driver* pemanas. Selain itu, pada tangki penampung I juga terdapat dua buah pompa yaitu pompa I dan pompa II. Pompa I berfungsi untuk mengalirkan air yang terdapat dalam tangki penampung I jika suhu air dalam tangki belum sesuai dengan suhu referensi, sedangkan pompa II berfungsi untuk mengalirkan air yang terdapat pada tangki penampung I jika suhu air dalam tangki sesuai dengan suhu referensi. Pengoperasian pompa I dan pompa II dikendalikan oleh *driver* pompa. Tangki penampung II berfungsi sebagai sumber air utama untuk dimasukkan kedalam tangki penampung I dengan menggunakan pompa III. Tangki penampung III berfungsi untuk menampung air yang keluar dari pompa I dan didalamnya terdapat sebuah pompa (pompa IV) yang berfungsi untuk membuang air dalam tangki tersebut, sedangkan tangki penampung IV berfungsi untuk menampung air yang keluar dari pompa II. Blok diagram perancangan perangkat keras secara keseluruhan dapat diperlihatkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Blok diagram perancangan perangkat keras.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Hasil pengujian secara kalang terbuka diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 13 Respon transien suhu air dengan pengujian kalang terbuka.

Hasil pengujian yang dilakukan dengan mengirimkan tegangan kontrol ke DAC sebesar 5 volt, menunjukkan bahwa suhu air dalam *plant* akan stabil pada suhu 48,2 °C. Konstanta waktu sistem (T) adalah besarnya waktu yang dibutuhkan oleh respon untuk mencapai suhu keluaran sebesar 0,632 dari keluaran suhu stabilnya atau sekitar $(0,632 \times (48,23 \text{ } ^\circ\text{C} - 28,39 \text{ } ^\circ\text{C})) + 28,23 \text{ } ^\circ\text{C} = 40,76 \text{ } ^\circ\text{C}$. Hasil akuisisi data menunjukkan bahwa untuk mencapai suhu 40,76 °C dibutuhkan waktu sebesar 26,25 menit, sehingga konstanta waktu sistem *plant* suhu cairan yang dikendalikan adalah sebesar 26,25 menit.

4.1 Pengaruh Gain Proporsional terhadap Transien Suhu Cairan

Besar nilai *gain* proporsional yang dipilih relatif berbeda sedangkan nilai laju konvergensinya tetap. Pada pengujian ini dipilih suhu referensi 35 °C dengan laju konvergensi tetap yaitu 0,05 dan variasi *gain* proporsionalnya adalah 0,3 dan 1. Hal ini dilakukan agar hasilnya dapat dibandingkan secara langsung.

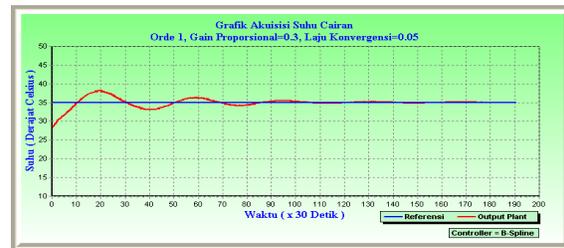
4.1.1 Pengaruh Nilai Gain Proporsional pada B-Spline Orde 1

Hasil pengujian pengaruh nilai *gain* proporsional pada B-Spline orde 1 diperlihatkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.



(a). Bobot awal nol.

Gambar 14 Respon transien kontrol B-Spline orde 1 untuk referensi 35 °C, *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.



(b). Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 14 Respon transien kontrol B-Spline orde 1 untuk referensi 35 °C, *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05 (lanjutan).



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 15 Respon transien kontrol B-Spline orde 1 untuk referensi 35 °C, *gain* proporsional 1 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk B-Spline orde 1 nilai *gain* proporsional berpengaruh terhadap waktu naik dan waktu penetapan respon. Semakin besar nilai *gain* proporsional akan mempercepat waktu naik tetapi menyebabkan respon transien sistem mengalami osilasi yang cenderung tidak menuju waktu penetapan. Data parameter unjuk kerja pada pengujian ini diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data parameter unjuk kerja sistem dengan kontrol B-Spline orde 1 pada referensi 35 °C terhadap perubahan *gain* proporsional.

| Parameter Unjuk Kerja | Laju konvergensi = 0,05 <i>Gain</i> Proporsional = 0,3 | | Laju konvergensi = 0,05 <i>Gain</i> Proporsional = 1 | |
|-----------------------|---|---------------------|---|---------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan |
| Waktu penetapan (jam) | 1,34 | 1,27 | 1,55 | 1,74 |
| Lonjakan transien (%) | 48,48 | 45,45 | 58,62 | 62,96 |
| Waktu naik (menit) | 7,9 | 4,18 | 3,9 | 3,8 |

4.1.2 Pengaruh Nilai Gain Proporsional pada B-Spline Orde 2

Hasil pengujian pengaruh nilai *gain* proporsional pada B-Spline orde 2 diperlihatkan pada Gambar 17 dan Gambar 18.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 17 Respon transien kontrol B-Spline orde 2 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 18 Respon transien kontrol B-Spline orde 2 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 1 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk B-Spline orde 2 nilai *gain* proporsional berpengaruh terhadap waktu naik dan waktu penetapan respon. Semakin besar *gain* proporsional yang dipilih, waktu naik dan waktu penetapan respon semakin cepat. Data parameter unjuk kerja pada pengujian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Data parameter unjuk kerja sistem dengan kontrol B-Spline orde 2 pada referensi 35 °C terhadap perubahan *gain* proporsional.

| Parameter Unjuk Kerja | Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | | Laju konvergensi =0,05 Gain Proporsional = 1 | |
|-------------------------|--|-------------------|---|-------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latih | Bobot awal nol | Bobot hasil latih |
| Waktu penetapan (menit) | 30,34 | 25,38 | 15,06 | 18,14 |
| Lonjakan transien (%) | - | 10,18 | 10,35 | 18,29 |
| Waktu naik (menit) | 9,48 | 3,81 | 7,23 | 3,4 |

4.1.3 Pengaruh Nilai *Gain* Proporsional pada B-Spline Orde 3

Hasil pengujian pengaruh nilai *gain* proporsional pada B-Spline orde 3 diperlihatkan pada Gambar 19 dan Gambar 20.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 19 Respon transien kontrol B-Spline orde 3 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 20 Respon transien kontrol B-Spline orde 3 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 1 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk B-Spline orde 3 nilai *gain* proporsional berpengaruh terhadap waktu naik dan waktu penetapan respon. Semakin besar *gain* proporsional yang dipilih, waktu naik dan waktu penetapan respon semakin cepat. Data parameter unjuk kerja pada pengujian ini diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Data parameter unjuk kerja sistem dengan kontrol B-Spline orde 3 pada referensi 35 °C terhadap perubahan gain proporsional.

| Parameter Unjuk Kerja | Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | | Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 1 | |
|-------------------------|--|---------------------|--|---------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan |
| Waktu penetapan (menit) | 33,65 | 22,99 | 22,08 | 13,86 |
| Lonjakan transien (%) | 11 | 21,93 | 20,53 | 32,14 |
| Waktu naik (menit) | 8,41 | 4,63 | 8,25 | 4,7 |

4.2 Pengaruh Nilai Laju Konvergensi terhadap Transien Suhu Cairan

Untuk menunjukkan pengaruh langsung pemilihan nilai laju konvergensi terhadap dinamika suhu cairan yang dikontrol, dipilih 2 buah nilai laju konvergensi yang relatif berbeda, dengan besar gain proporsional yang sama untuk masing-masing orde fungsi basis. Pada pengujian ini dipilih besar gain proporsional sebesar 0,3 dan referensi suhu 35 °C. Variasi nilai laju konvergensi yang digunakan adalah 0,05 dan 0,3.

4.2.1 Pengaruh Nilai Laju Konvergensi pada B-Spline Orde 1

Hasil pengujian pengaruh nilai laju konvergensi pada B-Spline orde 1 diperlihatkan pada Gambar 21 dan Gambar 22.



(a) Bobot awal nol.



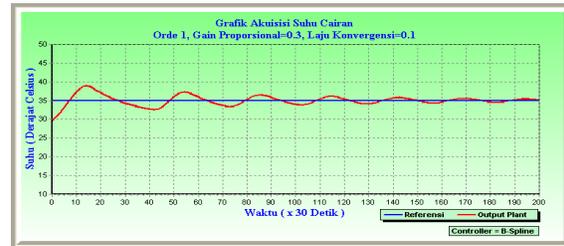
(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 21 Respon transien kontrol B-Spline orde 1 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.



(a) Bobot awal nol.

Gambar 22 Respon transien kontrol B-Spline orde 1 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,1.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 22 Respon transien kontrol B-Spline orde 1 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,1 (lanjutan).

Nilai laju konvergensi berpengaruh terhadap waktu naik dan waktu penetapan respon. Semakin besar nilai laju konvergensi yang dipilih untuk B-Spline orde 1 akan mempercepat waktu naik tetapi menyebabkan respon transien sistem mengalami osilasi yang cenderung tidak menuju waktu penetapan. Data parameter unjuk kerja pada pengujian ini diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Data parameter unjuk kerja sistem dengan kontrol B-Spline orde 1 pada referensi 35 °C terhadap perubahan laju konvergensi.

| Parameter Unjuk Kerja | Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | | Laju konvergensi = 0,1 Gain Proporsional = 0,3 | |
|-----------------------|--|---------------------|---|---------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan |
| Waktu penetapan (jam) | 1,34 | 1,27 | 1,85 | 2,41 |
| Lonjakan transien (%) | 48,48 | 45,45 | 56,73 | 77,30 |
| Waktu naik (menit) | 7,9 | 4,18 | 5,28 | 2,68 |

4.2.2 Pengaruh Nilai Laju Konvergensi pada B-Spline Orde 2

Hasil pengujian pengaruh nilai laju konvergensi pada B-Spline orde 2 diperlihatkan pada Gambar 23 dan Gambar 24.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 23 Respon transien kontrol B-Spline orde 2 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 24 Respon transien kontrol B-Spline orde 2 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,1.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk B-Spline orde 2 nilai laju konvergensi berpengaruh terhadap waktu naik dan waktu penetapan respon. Semakin besar laju konvergensi yang dipilih, waktu naik dan waktu penetapan respon semakin cepat karena proses pembelajaran menjadi relatif cepat tetapi dengan nilai laju konvergensi yang besar akan mengakibatkan lonjakan yang besar pada respon transien sistem. Lonjakan yang besar disebabkan oleh adanya koreksi yang berlebih pada bobot jaringan (*over corrected*). Sinyal kontrol yang diberikan ke *plant* mengalami kenaikan yang besar akibat keluaran jaringan B-Spline mengalami kenaikan yang besar. Data parameter unjuk kerja pada pengujian ini diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Data parameter unjuk kerja sistem dengan kontrol B-Spline orde 2 pada referensi 35 °C terhadap perubahan laju konvergensi.

| Parameter Unjuk Kerja | Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | | Laju konvergensi = 0,1 Gain Proporsional = 0,3 | |
|-------------------------|--|-------------------|---|-------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latih | Bobot awal nol | Bobot hasil latih |
| Waktu penetapan (menit) | 30,34 | 25,38 | 21,34 | 24,25 |
| Lonjakan transien (%) | - | 10,18 | 4,14 | 22,24 |
| Waktu naik (menit) | 9,48 | 3,81 | 4,6 | 2,45 |

4.2.3 Pengaruh Nilai Laju Konvergensi pada B-Spline Orde 3

Hasil pengujian pengaruh nilai laju konvergensi pada B-Spline orde 3 diperlihatkan pada Gambar 25 dan Gambar 26.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 25 Respon transien kontrol B-Spline orde 3 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 26 Respon transien kontrol B-Spline orde 3 untuk referensi 35 °C, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,1.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk B-Spline orde 3 nilai laju konvergensi berpengaruh terhadap waktu naik dan waktu penetapan respon. Semakin besar laju konvergensi yang dipilih, waktu naik dan waktu penetapan respon semakin cepat karena proses pembelajaran menjadi relatif cepat tetapi dengan nilai laju konvergensi yang besar akan mengakibatkan lonjakan yang besar pada respon transien sistem. Lonjakan yang besar disebabkan oleh adanya koreksi yang berlebih pada bobot jaringan (*over corrected*). Sinyal kontrol yang diberikan ke *plant* mengalami kenaikan yang besar akibat keluaran jaringan B-Spline mengalami kenaikan yang besar. Data parameter unjuk kerja pada pengujian ini diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Data parameter unjuk kerja sistem dengan kontrol B-Spline orde 3 pada referensi 35 °C terhadap perubahan laju konvergensi.

| Parameter Unjuk Kerja | Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | | Laju konvergensi = 0,1 Gain Proporsional =0,3 | |
|-------------------------|--|---------------------|--|---------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan | Bobot awal nol | Bobot hasil latihan |
| Waktu penetapan (menit) | 33,65 | 22,99 | 28,41 | 25,22 |
| Lonjakan transien (%) | 11 | 21,93 | 19,33 | 34,51 |
| Waktu naik (menit) | 8,41 | 4,63 | 4,92 | 3 |

4.3 Pengujian Referensi Naik

Pengujian referensi naik dilakukan untuk mengetahui kemampuan jaringan dalam mengikuti perubahan referensi yang berubah naik pada beberapa tahap. Perubahan referensi dilakukan setelah respon mencapai keadaan tunak. Pada pengujian ini dilakukan perubahan suhu referensi dari 35 °C, 40 °C, dan 45 °C. Pada pengujian ini dipilih nilai *gain* proporsional 0,3 dan nilai laju konvergensi 0,05 karena dari hasil *trial and error* diperoleh bahwa dengan nilai *gain* proporsional dan nilai laju konvergensi tersebut jaringan memiliki respon yang optimal.

4.3.1 Pengujian Referensi Naik untuk B-Spline Orde 1

Hasil pengujian referensi naik untuk B-Spline orde 1 diperlihatkan pada Gambar 27.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 27 Pengujian referensi naik untuk kontrol B-Spline orde 1, *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada saat digunakan bobot awal jaringan nol, ketika

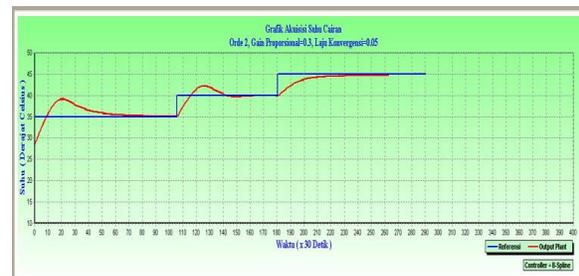
referensi dinaikkan jaringan mampu mengikuti perubahan referensi naik. Dengan menggunakan bobot hasil pelatihan, respon suhu memiliki waktu naik yang lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan bobot awal nol. Tetapi respon suhu mengalami lonjakan yang besar terutama pada respon awal yaitu saat referensi 35 °C. Pada saat bobot hasil pelatihan digunakan, maka jaringan menggunakan bobot terakhir yang disimpannya yaitu bobot untuk referensi terakhir yang diberikan yaitu 45 °C sehingga sinyal kontrol yang berasal dari keluaran jaringan B-Spline cukup besar.

4.3.2 Pengujian Referensi Naik untuk B-Spline Orde 2

Hasil pengujian referensi naik untuk B-Spline orde 2 diperlihatkan pada Gambar 28.



(a) Bobot awal nol.



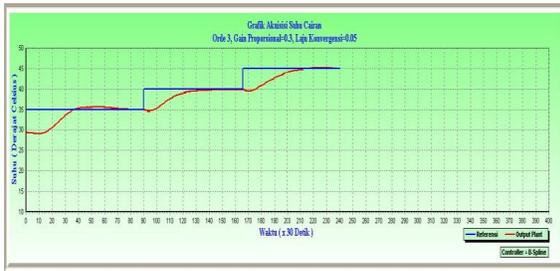
(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 28 Pengujian referensi naik untuk kontrol B-Spline orde 2, *gain* proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.

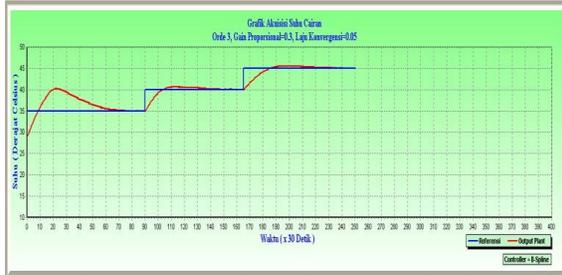
Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada saat digunakan bobot awal jaringan nol, ketika referensi dinaikkan jaringan mampu mengikuti perubahan referensi naik. Dengan menggunakan bobot hasil pelatihan, respon suhu mengalami lonjakan yang besar terutama pada respon awal saat referensi 35 °C. Pada saat bobot hasil pelatihan digunakan, maka jaringan menggunakan bobot terakhir yang disimpannya yaitu bobot untuk referensi terakhir yang diberikan yaitu 45 °C sehingga sinyal kontrol yang berasal dari keluaran jaringan B-Spline cukup besar.

4.3.3 Pengujian Referensi Naik untuk B-Spline Orde 3

Hasil pengujian referensi naik untuk B-Spline orde 3 diperlihatkan pada Gambar 29.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 29 Pengujian referensi naik untuk kontrol B-Spline orde 3, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada saat digunakan bobot awal jaringan nol, ketika referensi dinaikkan jaringan mampu mengikuti perubahan referensi naik. Dengan menggunakan bobot hasil pelatihan, respon suhu mengalami lonjakan yang besar terutama pada respon awal saat referensi 35 °C. Pada saat bobot hasil pelatihan digunakan, maka jaringan menggunakan bobot terakhir yang disimpannya yaitu bobot untuk referensi terakhir yang diberikan yaitu 45 °C sehingga sinyal kontrol yang berasal dari keluaran jaringan B-Spline cukup besar.

4.4 Pengujian Gangguan

Pengujian gangguan dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja kontrol B-Spline jika adanya gangguan pada sistem. Pada pengujian ini, sistem diberi gangguan berupa air es dengan volume sebesar 1,5 liter. Air es tersebut dimasukkan langsung kedalam tangki penampung I (tangki yang berisi air yang dikendalikan suhunya) sehingga volume air dalam tangki penampung I meningkat. Oleh karena itu, volume dalam tangki penampung I dikembalikan seperti kondisi awal yaitu sebesar 11,6 liter. Gangguan diberikan pada referensi suhu 35 °C setelah respon suhu mencapai kestabilan.

4.4.1 Pengujian Gangguan untuk B-Spline Orde 1

Hasil pengujian gangguan untuk B-Spline orde 1 diperlihatkan pada Gambar 30.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 30 Pengujian gangguan untuk kontrol B-Spline orde 1, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk kontrol B-Spline orde 1 dengan gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05 pada referensi suhu 35 °C dan bobot awal nol ketika diberikan gangguan, respon suhu mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 3,5 °C dan membutuhkan waktu sekitar 1,34 jam untuk mengatasi gangguan tersebut.

Penggunaan bobot hasil pelatihan hanya sedikit berpengaruh terhadap respon sistem. Ketika diberi gangguan, respon suhu mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 3,7 °C dan waktu untuk mengatasi gangguan menjadi lebih cepat dibandingkan dengan bobot awal nol yaitu sebesar 1,05 jam. Data parameter unjuk kerja untuk pengujian gangguan diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Data parameter unjuk kerja jaringan B-Spline orde 1 terhadap pengujian gangguan

| Parameter Unjuk Kerja | Referensi suhu 35 °C Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | |
|--------------------------------------|--|-------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latih |
| Lonjakan suhu maksimum (°C) | 3,5 | 3,7 |
| Waktu untuk mengatasi gangguan (jam) | 1,34 | 1,05 |

4.4.2 Pengujian Gangguan untuk B-Spline Orde 2

Hasil pengujian gangguan untuk B-Spline orde 2 diperlihatkan pada Gambar 31.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 31 Pengujian gangguan untuk kontrol B-Spline orde2, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk kontrol B-Spline orde 2 dengan gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05 pada referensi suhu 35 °C dan bobot awal nol ketika diberikan gangguan, respon suhu mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 3,3 °C dan membutuhkan waktu sekitar 28,48 menit untuk mengatasi gangguan tersebut.

Penggunaan bobot hasil pelatihan hanya sedikit berpengaruh terhadap respon sistem. Ketika diberi gangguan, respon suhu mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 2,7 °C dan waktu untuk mengatasi gangguan menjadi lebih cepat dibandingkn dengan bobot awal nol yaitu sebesar 26,02 menit. Data parameter unjuk kerja untuk pengujian gangguan diperlihatkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Data parameter unjuk kerja jaringan B-Spline orde 2 terhadap pengujian gangguan

| Parameter Unjuk Kerja | Referensi suhu 35 °C Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | |
|--|--|-------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latih |
| Lonjakan suhu maksimum (°C) | 3,3 | 2,7 |
| Waktu untuk mengatasi gangguan (menit) | 28,48 | 26,02 |

4.4.3 Pengujian Gangguan untuk B-Spline Orde 3

Hasil pengujian gangguan untuk B-Spline orde 3 diperlihatkan pada Gambar 32.



(a) Bobot awal nol.



(b) Bobot hasil satu kali pelatihan.

Gambar 32 Pengujian gangguan untuk kontrol B-Spline orde3, gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk kontrol B-Spline orde 3 dengan gain proporsional 0,3 dan laju konvergensi 0,05 pada referensi suhu 35 °C dan bobot awal nol ketika diberikan gangguan, respon suhu mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 3,3 °C dan membutuhkan waktu sekitar 20,93 menit untuk mengatasi gangguan tersebut.

Penggunaan bobot hasil pelatihan hanya sedikit berpengaruh terhadap respon sistem. Ketika diberi gangguan, respon suhu mengalami penurunan suhu maksimum sebesar 3,1 °C dan waktu untuk mengatasi gangguan menjadi lebih cepat dibandingkn dengan bobot awal nol yaitu sebesar 19,47 menit. Data parameter unjuk kerja untuk pengujian gangguan diperlihatkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Data parameter unjuk kerja jaringan B-Spline orde 3 terhadap pengujian gangguan

| Parameter Unjuk Kerja | Referensi suhu 35 °C Laju konvergensi = 0,05 Gain Proporsional = 0,3 | |
|--|--|-------------------|
| | Bobot awal nol | Bobot hasil latih |
| Lonjakan suhu maksimum (°C) | 3,3 | 3,1 |
| Waktu untuk mengatasi gangguan (menit) | 20,93t | 19,47 |

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Kestabilan respon keluaran suhu cairan akan sangat tergantung terhadap pemilihan parameter-parameter kendali B-Spline, yaitu besarnya nilai laju konvergensi, besarnya nilai gain proporsional dan pemilihan orde fungsi basis.
2. Dari hasil *trial and error* pemilihan acak gain proporsional sebesar 0,3 dan laju konvergensi

- sebesar 0,05 memberikan kondisi tanggapan respon dengan lonjakan kecil dan waktu penetapan yang cepat pada jaringan syaraf B-Spline.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk nilai parameter yang sama yaitu nilai gain proporsional, nilai laju konvergensi, dan referensi suhu pada sistem pengaturan suhu cairan, fungsi basis orde 2 memiliki tanggapan respon dengan waktu penetapan yang lebih cepat dan lonjakan respon yang lebih kecil dibandingkan dengan fungsi basis B-Spline orde 1 dan orde 3.
 4. Fungsi basis orde 1 memiliki tanggapan respon yang beresilasi sehingga waktu penetapannya sangat lama. Pada fungsi basis orde 1, sebaiknya menggunakan laju konvergensi yang lebih kecil dari 0,05 untuk mengurangi osilasi yang terjadi.
 5. Pemilihan laju konvergensi yang relatif lebih besar dari 0,05 akan menyebabkan keluaran transien mengalami lonjakan tetapi lebih cepat mencapai sistem stabil dibandingkan dengan nilai laju konvergensi yang lebih kecil dari 0,05.
 6. Pemilihan gain proporsional yang relatif lebih besar dari 0,3 akan menyebabkan keluaran transien lebih cepat mencapai stabil dibandingkan dengan pemilihan gain proporsional yang lebih kecil dari 0,3, tetapi semakin besar nilai gain proporsional maka tanggapan respon akan semakin besar mengalami lonjakan.
 7. Penggunaan nilai bobot akan menentukan besarnya keluaran sinyal kontrol yang akan dikirim ke *plant* yaitu sesuai dengan nilai bobot yang terakhir disimpan oleh jaringan syaraf B-Spline.

5.2 Saran

1. Pengendalian suhu cairan dapat dikembangkan dengan menggunakan kendali yang berbeda misalnya Jaringan Syaraf Tiruan RBF, Jaringan Syaraf Tiruan CMAC atau yang lainnya.
2. Perlu adanya penelitian dengan menggunakan orde fungsi basis B-spline yang lebih dari orde 3 untuk memperoleh tanggapan respon yang memiliki waktu penetapan yang lebih cepat dan tanpa adanya lonjakan.
3. Perlu adanya penelitian dengan menggunakan struktur kendali selain *fixed stabilising controller* seperti *Internal Model Control* (IMC).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Brown, Martin and Harris, *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*, Prentice Hall Inc, 1994.
- [2]. Coughlin, Robert and Federick Driscoll, *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linier*, Jakarta : Erlangga.
- [3]. Haykin, Simon, *Neural Networks- A Comprehensive Foundation*, Macmillan Colege-Publishing Company Inc, 1994.
- [4]. Kraft, Gordon, L and David, P, Campagna, A *Comparison Between CMAC Neural Network Control and Two Traditional Adaptive Control Systems*, IEEE Paper 3.13, 1990.
- [5]. Kung, S, Y, *Digital Neural Networks*, Prentice Hall International Editions, 1993.
- [6]. Kusumadewi, Sri, *Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)*, Graha Ilmu, 2003.
- [7]. Malvino, Prinsip-Prinsip Elektronika, Jakarta : Erlangga, 1996.
- [8]. Muhammad H Rashid, *Elektronika Daya : Rangkaian, Devais, dan Aplikasinya*, Jakarta : PT Prehallindo, 1999.
- [9]. Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik*, Jilid 1, Jakarta : Erlangga, 1995.
- [10]. Putra, Agfianto Eko, *Belajar Mikrokontroler AT89C51/52/53 (Teori dan Aplikasi)*, Yogyakarta : Gava Media, 2002.
- [11]. Setiawan, Iwan. *Pengendalian Kecepatan Putar Motor DC dengan Jaringan Syaraf Tiruan CMAC secara On-line*. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada Yogyakarta, 2003.
- [12]. ..., <http://pdf.alldatasheet.com:80/datasheet-pdf/view/8866/NSC/LM35/datasheet.pdf>.
- [13]. ..., http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2487.pdf.

BIOGRAFI



Istichori lahir di kota Tangerang, Banten beberapa tahun silam. Saat ini sedang berusaha menyelesaikan pendidikan strata satu di Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro pada konsentrasi Kontrol.
Email: Istichori@yahoo.com

Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

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

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