

# PERANCANGAN KONTROLER JARINGAN SYARAF TIRUAN B-SPLINE BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA16 SEBAGAI KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS* DC (BLDC)

Lidya Widaningrum<sup>\*</sup>, Budi Setiyono, and Munawar Agus Riyadi

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*</sup>E-mail: [lidyawidaningrum@gmail.com](mailto:lidyawidaningrum@gmail.com)

## Abstrak

Motor Brushless DC (BLDC) merupakan salah satu jenis motor listrik dengan struktur yang sederhana, kehandalan yang tinggi, perawatan yang mudah dan efisiensi tinggi namun membutuhkan proses yang kompleks untuk mengendalikannya secara konvensional, oleh karena itu diperlukan sistem kontrol cerdas untuk mengendalikannya. Pada penelitian ini, digunakan sistem kontrol jaringan syaraf tiruan B-spline berbasis mikrokontroler ATmega16 untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC. B-spline merupakan jaringan syaraf tiruan tipe Associative Memory Networks (AMN) yang dapat digunakan untuk mengendalikan plant secara real-time. Pengujian pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan jaringan syaraf tiruan B-spline orde 1, orde 2, dan orde 3. Pengujian dilakukan pada pengaruh gain proporsional, laju konvergensi, dan bobot pembelajaran terhadap respon transien kecepatan motor BLDC. Hasil pengujian dengan kecepatan referensi 1000 RPM menunjukkan nilai gain proposional paling baik untuk sistem B-spline orde 1 adalah 0,04, orde 2 adalah 0,04 dan orde 3 adalah 0,2 sedangkan nilai laju konvergensi paling baik untuk B-spline orde 1, orde 2 dan orde 3 adalah 0,2. Hasil pengujian dengan kecepatan referensi naik dari 1500 RPM hingga 2500 RPM dan kecepatan referensi turun dari 2500 RPM hingga 1500 RPM menunjukkan bahwa pemberian bobot awal pembelajaran berupa bobot hasil latih dapat mempercepat respon sistem

*Kata kunci: motor Brushless DC (BLDC), jaringan syaraf tiruan B-spline, mikrokontroler ATmega16, respon transien*

## Abstract

Brushless DC motor is one type of electric motors with a simple structure, high reliability, easy maintenance and high efficiency but requires a complex process to be controlled with conventional method, therefore an intelligent control system needed to control the BLDC motor. In this final project, a B-spline neural network control system based on ATmega16 microcontroller was used to control the speed of BLDC. B-spline is a type of Associative Memory Network (AMN) neural network which can be used to control the real-time plant. The test of BLDC motor speed control use first, second and third order of B-spline neural network's basis function. The test is performed to understand the effect of proportional gain, convergence rate, and learning weights to the transient response of BLDC motor speed. The test result with a constant reference speed (1000 RPM) shows that the best proportional gain for the first order is 0,04, second order is 0,04 and third order is 0,2 while the best convergence rate for all order is 0,6. The result with increased (1500 RPM – 2500 RPM) and decreased reference speed (2500 RPM – 1500 RPM) shows that the training results learning weights can improved the system performance.

*Keywords: Brushless DC motor (BLDC), B-spline neural network, Atmega16 microcontroller, transient response*

## 1. Pendahuluan

Motor BLDC (*Brushless* DC) merupakan motor listrik dengan struktur yang sederhana, kehandalan yang tinggi dan perawatan yang mudah dengan kelebihan motor DC seperti efisiensi tinggi, tidak ada kerugian eksitasi dan bila dibandingkan dengan motor listrik lainnya, motor BLDC telah menunjukkan kinerja yang lebih baik sebagai aktuator[1]. Perancangan pengendali motor BLDC secara

konvensional melibatkan proses yang kompleks dan membutuhkan model matematis akurat yang sulit ditemukan karena sifat dari motor BLDC yang *nonlinear* atau berubah sepanjang waktu[2]. Berdasarkan hal tersebut, beberapa solusi kontrol *modern* seperti sistem kontrol cerdas ditawarkan dalam merancang pengendali atau kontroler kecepatan motor BLDC. B-spline adalah salah satu sistem kontrol cerdas jaringan syaraf tiruan tipe *Associative Memory Networks* (AMN) yang cocok untuk

mengendalikan sistem dengan parameter yang sulit ditemukan secara *real-time*[3]. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan implementasi sistem pengendali kecepatan motor BLDC berbasis jaringan syaraf tiruan B-spline ke dalam mikrokontroler ATmega16. Jaringan syaraf tiruan B-spline menggunakan arsitektur kendali adaptif *Fixed Stabilizing Controller* dan algoritma *Least Mean Square* (LMS) untuk proses pembelajarannya. Algoritma LMS dipilih karena mempunyai komputasi sederhana dalam melakukan proses iterasi untuk mengkoreksi bobot-bobot jaringan.

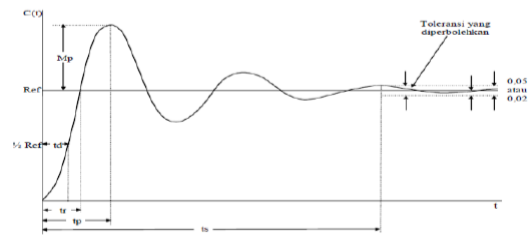
## 2. Metode

### 2.1. Karakteristik Kontrol

Umumnya karakteristik performansi sistem kontrol yang diinginkan dinyatakan dalam bentuk besaran waktu. Seringkali, karakteristik performansi sistem kendali dinyatakan dalam bentuk respon transien terhadap masukan tangga satuan karena mudah dibangkitkan dan cukup radikal.

Respon transien sistem kontrol praktis sering menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan tunak. Dalam menentukan karakteristik respon transien sistem kontrol terhadap masukan tangga satuan, umumnya dicari parameter yang memiliki spesifikasi seperti Gambar 1[4]:

- Waktu tunda ( $td$ ), adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai setengah harga naik yang pertama kali.
- Waktu naik ( $tr$ ), adalah waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10 sampai 90%, 5 sampai 95%, atau 0 sampai 100% dari harga akhirnya. Untuk sistem B-spline orde kedua redaman kurang, biasanya digunakan waktu 0 – 100%. Untuk sistem redaman lebih, biasanya digunakan waktu naik 10 – 90%.
- Waktu puncak ( $tp$ ), adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
- (Persen) lewatan maksimum ( $Mp$ ), adalah harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur 1. Jika harga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewatan maksimum.
- Waktu penetapan ( $ts$ ), adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan presentase mutlak dari harga akhir (biasanya 5% atau 2%).



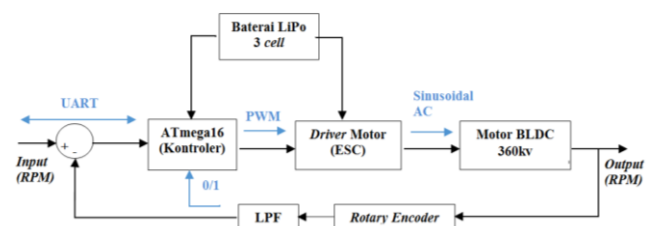
Gambar 1 Ilustrasi karakteristik kontrol

## 2.2. Perancangan Sistem

### 2.2.1. Gambaran umum sistem

Secara umum sistem pengendalian kecepatan motor BLDC yang dibuat pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 terlihat bahwa komponen utama yang dikendalikan adalah sebuah motor BLDC 360kv. Motor BLDC 14 *pole* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kecepatan rendah sehingga memudahkan dalam pembacaan kecepatan aktual motor. Kecepatan aktual motor BLDC (RPM) diperoleh dari hasil pembacaan kecepatan oleh sensor *rotary encoder* yang telah dilewati *Low-pass filter* (LPF). Sensor *rotary encoder* yang digunakan dalam penelitian ini adalah modul *encoder* FC-03 sedangkan LPF yang digunakan mempunyai frekuensi *cut-off* sebesar 72KHz. LPF digunakan karena adanya *noise* sebesar 4,882 MHz pada pembacaan kecepatan aktual motor dengan modul *encoder* FC-03.

Pada penelitian ini pengendalian kecepatan motor BLDC menggunakan kontroler jaringan syaraf tiruan B-spline yang akan ditanamkan pada mikrokontroler ATmega16. Mikrokontroler ATmega16 membutuhkan data *input* berupa kecepatan referensi atau *setpoint*, beberapa parameter kontroler, dan kecepatan aktual motor agar kontroler dapat bekerja. Data input tersebut didapat melalui media komunikasi serial UART yang menghubungkan mikrokontroler dengan program *interface* pada komputer. Setelah itu mikrokontroler akan melakukan proses pengontrolan yang menghasilkan sinyal PWM untuk dijadikan masukan pada *driver* motor BLDC yang dalam penelitian ini berupa *Electronic Speed Controller* (ESC). Lalu ESC akan menghasilkan gelombang sinusoidal AC yang dibutuhkan motor BLDC agar dapat berputar.



Gambar 2 Diagram blok perancangan sistem

2.2.2. Perancangan Kontroler Jaringan Syaraf Tiruan B-spline

B-spline adalah salah satu jenis jaringan syaraf tiruan yang dapat digolongkan dalam kelas AMN (Associative Memory Network) yang dapat menyimpan informasi secara lokal. Hal ini menyebabkan laju pembelajaran berlangsung relative lebih cepat dan secara efisien dapat digunakan sebagai komponen pengendali plant secara real-time. Keluaran B-spline merupakan kombinasi bobot-bobot adaptif dari jumlah fungsi basis yang diaktifkan oleh masukan tertentu. Jumlah fungsi basis yang memberi kontribusi pada keluaran Bspline adalah konstan yaitu sebanyak  $\rho$ . Struktur jaringan syaraf B-spline untuk masukan x dan keluaran y yang dapat dihitung menggunakan persamaan 1[5] dan diperlihatkan pada Gambar 3[3].

$$y(k) = \sum_{i=1}^{\rho} a_i(k)w_i(k) \tag{1}$$

Keterangan :

$w_i(k)$  = nilai bobot ke-i pada saat k

$a_i(k)$  = keluaran fungsi basis ke-i

$y(k)$  = keluaran jaringan syaraf pada saat k

Keluaran fungsi basis dapat dihitung dengan menggunakan hubungan recurrence. Hubungan recurrence tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 4. Keluaran fungsi basis yang diaktifkan oleh masukan tertentu (x) dapat dihitung dengan menggunakan hubungan recurrence seperti persamaan 2[5]

$$N_k^j(x) = \left( \frac{x-\lambda_{j-k}}{\lambda_{j-1}-\lambda_{j-k}} \right) N_{k-1}^{j-1}(x) + \left( \frac{\lambda_j-x}{\lambda_j-\lambda_{j-k+1}} \right) N_{k-1}^j(x) \tag{2}$$

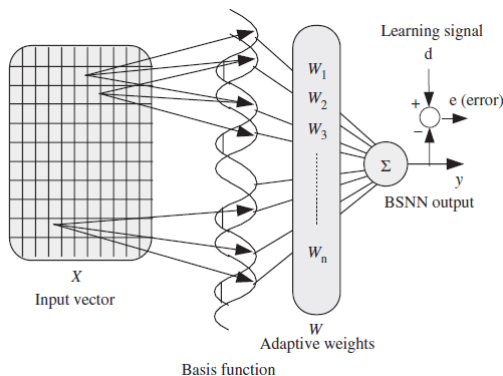
Keterangan :

$\lambda_j$ = knot (posisi) ke-j

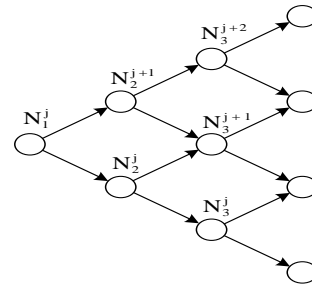
$I_j = (\lambda_{j-1}, \lambda_j)$  adalah interval ke-j

k = orde fungsi basis

N = keluaran fungsi basis



Gambar 3. Struktur jaringan syaraf tiruan B-spline



Gambar 4. Hubungan recurrence fungsi basis

Fungsi basis untuk orde 1 yang ditunjukkan oleh Gambar 5. Misal  $N_1^j$  adalah fungsi basis ke-j dan  $I_j$  adalah interval ke-j ( $\lambda_{j-1}, \lambda_j$ ) seperti terlihat pada Gambar 5, maka keluaran fungsi basis orde 1 untuk masukan x dapat dihitung menggunakan persamaan 3. Secara matematis persamaan diatas dapat diimplementasikan oleh persamaan 4.

$$N_1^j = 1 \text{ jika } x \text{ adalah } I_j (\lambda_{j-1}, \lambda_j) \\ = 0, \text{ lainnya} \tag{3}$$

$$j = \lceil x \rceil \tag{4}$$

$$N_1^j(x) = 1 \tag{4}$$

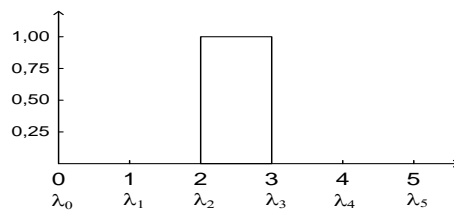
Keterangan :  $\lceil \cdot \rceil$  = fungsi ceil (pembulatan ke atas)

Fungsi basis untuk orde 2 ditunjukkan oleh Gambar 6. Keluaran fungsi basis orde 2 untuk masukan x ditunjukkan oleh persamaan 5.

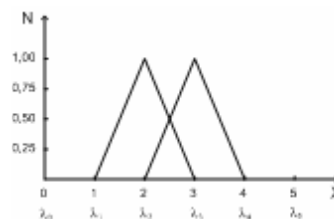
$$N_2^j(x) = \left( \frac{x-\lambda_{j-2}}{\lambda_{j-1}-\lambda_{j-2}} \right) N_1^{j-1}(x) + \left( \frac{\lambda_j-x}{\lambda_j-\lambda_{j-1}} \right) N_1^j(x) \tag{5}$$

Fungsi basis untuk orde 3 ditunjukkan oleh Gambar 7. Keluaran fungsi basis orde 3 untuk masukan x ditunjukkan oleh persamaan 6.

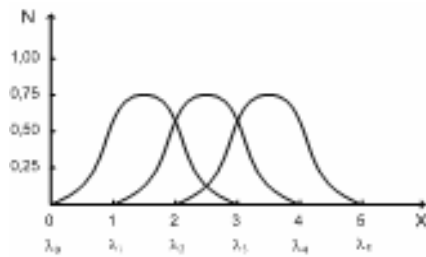
$$N_3^j(x) = \left( \frac{x-\lambda_{j-3}}{\lambda_{j-1}-\lambda_{j-3}} \right) N_2^{j-1}(x) + \left( \frac{\lambda_j-x}{\lambda_j-\lambda_{j-2}} \right) N_2^j(x) \tag{6}$$



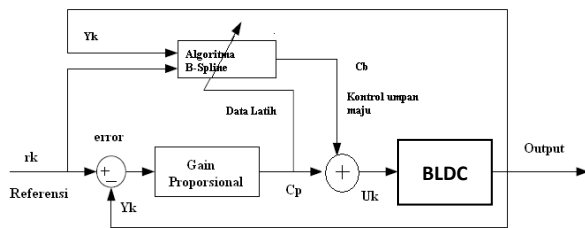
Gambar 5. Fungsi basis orde 1



Gambar 6. Fungsi basis orde 2



Gambar 7. Fungsi basis orde 3



Gambar 8. Diagram pengendalian plant dengan B-spline

Algoritma pengendalian jaringan syaraf tiruan *B-spline* secara *real-time* ditunjukkan oleh Gambar 8 yang dapat ditulis sebagai berikut:

1. Menentukan parameter kontroler seperti orde B-spline, *gain* proporsional (KP) dan laju konvergensi
2. Membaca kecepatan referensi dan kecepatan aktual motor
3. Menghitung fungsi basis 2 dimensi
4. Menghitung *error* sistem dengan persamaan 7.  
 $error = setpoint - Kecepatan aktual (RPM)$  (7)
5. Menghitung keluaran kontrol proporsional dengan persamaan 8.  
 $P = KP \times error$  (8)
6. Menghitung keluaran B-spline
7. Menghitung sinyal kendali total dengan persamaan 9  
 $Kontrol = P + Keluaran B - Spline$  (9)
8. Melakukan *update* bobot dengan metode LMS.
9. Kembali ke langkah 4 untuk sinyal latih

Proses pembelajaran jaringan syaraf tiruan B-spline menggunakan metode *Least Mean Square* (LMS) yang ditunjukkan pada persamaan 10[6] untuk memperbaharui bobot-bobot adaptif secara iteratif.

$$w(k + 1) = w(k) + \alpha * [d(k) - y(k)] * x(k) \quad (10)$$

Keterangan :

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

### 3 Hasil dan Analisis

Pengujian dilakukan dengan menggunakan metode bobot awal nol dan bobot awal hasil latih untuk mengetahui pengaruh masing-masing parameter jaringan syaraf *B-spline* (*gain* proporsional, laju konvergensi) terhadap respon transien kecepatan motor BLDC. Pengujian juga dilakukan dengan memberikan kecepatan referensi naik dan kecepatan referensi turun untuk mengetahui pengaruh pemberian bobot awal hasil latih pada proses pembelajaran.

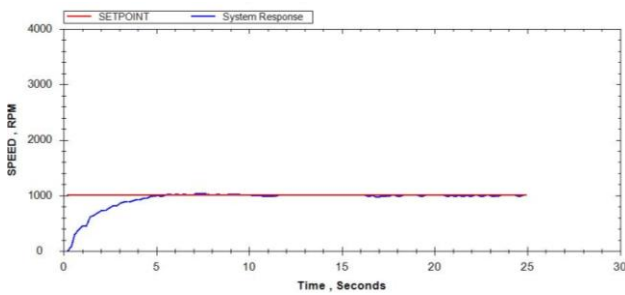
#### 3.1. Pengujian Nilai *Gain* Proporsional

Sinyal keluaran B-spline merupakan fungsi dari sinyal keluaran *gain* proporsional. Keluaran *gain* proporsional digunakan sebagai data latih jaringan syaraf B-spline, sehingga nilai *gain* proporsional yang dipilih akan mempengaruhi keluaran B-spline.

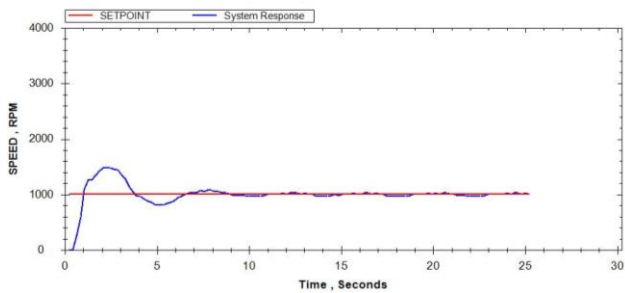
Pengujian dilakukan pada nilai kecepatan referensi 1000 RPM dengan memberikan nilai laju konvergensi tetap ( $\alpha = 0,5$ ) dan nilai *gain* proporsional yang berbeda yaitu 0,04, 0,12 dan 0,2. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh nilai *gain* proporsional pada sistem B-spline orde 1, orde 2, dan orde 3.

Hasil pengujian nilai *gain* proporsional yang dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan bahwa penambahan nilai *gain* proporsional akan mempercepat waktu naik (*tr*) dan menambah nilai lewatan maksimum (*Mp*). Hal tersebut dapat dilihat pada hasil pengujian *gain* proporsional sistem B-spline orde 1, B-spline orde 2, dan B-spline orde 3.

Hasil pengujian *gain* proporsional B-spline orde 1 yang dapat dilihat pada Tabel 1 menunjukkan bahwa pada sistem B-spline orde 1 dengan bobot awal hasil latih dan nilai *gain* proporsional 0,04 memiliki respon transien yang paling baik dengan waktu penetapan (*ts*) 4,67 detik. Hasil pengujian nilai *gain* proporsional sistem B-spline orde 2 yang dapat dilihat pada Tabel 2 menunjukkan bahwa bahwa nilai *gain* proporsional yang paling baik untuk sistem B-spline orde 2 adalah 0,04 dengan waktu penetapan (*ts*) 4,67 detik. Sedangkan hasil pengujian nilai *gain* proporsional sistem B-spline orde 3 yang dapat dilihat pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai *gain* proporsional yang paling baik untuk sistem B-spline orde 3 adalah 0,2. Pada Tabel 3 terlihat bahwa penambahan nilai *gain* proporsional pada sistem B-spline orde 3 tidak menambah nilai *Mp*, hal ini dikarenakan respon sistem B-spline orde 3 memiliki karakteristik dengan nilai redaman yang lebih besar daripada sistem B-spline orde 1 dan sistem B-spline orde 2.



Gambar 9. Respon sistem B-spline orde 1 dengan gain 0,04



Gambar 10. Respon sistem B-spline orde 1 dengan gain 0,2

Tabel 1. Hasil pengujian gain proporsional sistem B-spline orde 1

KP ( $\alpha=0,5$ )	Bobot Awal	Parameter Respon Transien			
		$t_r$ (detik)	$t_s$ (detik)	$M_p$ (%)	$ess$ (%)
0,04	Nol	5,72	5,72	-	3,56
	Hasil Latih	4,67	4,67	-	1,42
0,12	Nol	1,94	9,05	22,15	3,56
	Hasil Latih	1,83	8,53	24,29	3,56
0,2	Nol	1,69	9,61	45,72	3,56
	Hasil Latih	0,84	8,56	47,87	3,56

Tabel 2. Hasil pengujian gain proporsional sistem B-spline orde 2

KP ( $\alpha=0,5$ )	Bobot Awal	Parameter Respon Transien			
		$t_r$ (detik)	$t_s$ (detik)	$M_p$ (%)	$ess$ (%)
0,04	Nol	5,55	5,55	-	3,56
	Hasil Latih	4,67	4,67	-	3,56
0,12	Nol	2,3	8,59	24,29	3,56
	Hasil Latih	1,83	8,12	22,15	3,56
0,2	Nol	1,67	13,25	45,72	3,56
	Hasil Latih	1,22	11,58	52,15	3,56

Tabel 3 Hasil pengujian gain proporsional sistem B-spline orde 3

KP ( $\alpha=0,5$ )	Bobot Awal	Parameter Respon Transien			
		$t_r$ (detik)	$t_s$ (detik)	$M_p$ (%)	$ess$ (%)
0,04	Nol	52,97	52,97	-	3,56
	Hasil Latih	50,37	50,37	-	1,42
0,12	Nol	13,2	13,2	-	1,42
	Hasil Latih	12,19	12,19	-	1,42
0,2	Nol	4,22	4,22	-	1,42
	Hasil Latih	3,86	3,86	-	1,42

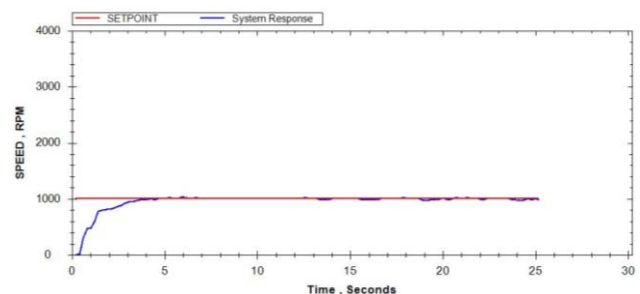
### 3.2. Pengujian Nilai Laju Konvergensi

Nilai laju konvergensi menentukan kecepatan sistem dalam melakukan pembaharuan bobot pada sistem jaringan syaraf tiruan B-spline. Nilai laju konvergensi yang terlalu tinggi akan menyebabkan sistem *overshoot*, sehingga perlu dilakukan pengujian untuk melihat batasan nilai laju konvergensi yang akan digunakan.

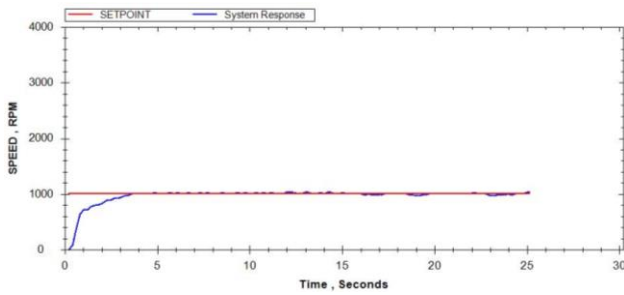
Pengujian dilakukan pada nilai kecepatan referensi 1000 RPM dengan memberikan nilai laju konvergensi yang berbeda yaitu 0,5, 0,6 dan 0,7. Pengujian dilakukan dengan menggunakan nilai *gain* proporsional 0,04 untuk sistem B-spline orde 1, 0,04 untuk sistem B-spline orde 2 dan 0,2 untuk sistem B-spline orde 3.

Hasil pengujian nilai laju konvergensi yang dapat dilihat pada Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13 menunjukkan bahwa penambahan nilai laju konvergensi akan mempercepat waktu naik ( $t_r$ ) dan waktu penetapan ( $t_s$ ), namun nilai laju konvergensi yang terlalu besar akan mengakibatkan sistem mengalami *overshoot*. Hal tersebut dapat dilihat pada hasil pengujian *gain* proporsional sistem B-spline orde 1, B-spline orde 2, dan B-spline orde 3.

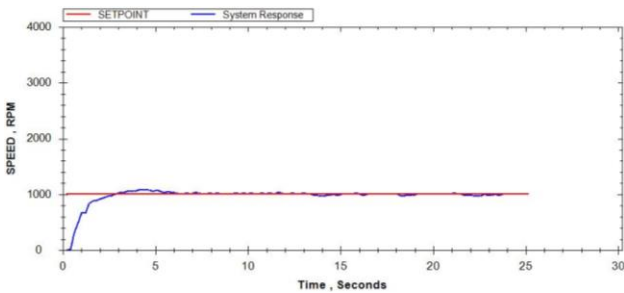
Hasil pengujian nilai laju konvergensi B-spline orde 1 yang dapat dilihat pada Tabel 4 menunjukkan bahwa pada sistem B-spline orde 1 dengan bobot awal hasil latih dan *gain* proporsional 0,04, nilai laju konvergensi 0,6 memiliki respon transien yang paling baik dengan waktu penetapan ( $t_s$ ) 3,86 detik. Hasil pengujian nilai laju konvergensi sistem B-spline orde 2 yang dapat dilihat pada Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai laju konvergensi yang baik untuk sistem B-spline orde 2 dengan bobot awal hasil latih dan *gain* proporsional 0,04 adalah 0,6 dengan waktu penetapan ( $t_s$ ) 3,86 detik. Hasil pengujian nilai laju konvergensi sistem B-spline orde 3 yang dapat dilihat pada Tabel 6 menunjukkan bahwa nilai laju konvergensi yang paling baik untuk sistem B-spline orde 3 dengan bobot awal hasil latih dan *gain* proporsional 0,2 adalah 0,6.



Gambar 11. Respon sistem B-spline orde 3 dengan  $\alpha$  0,5



Gambar 12. Respon sistem B-spline orde 3 dengan  $\alpha$  0,6



Gambar 13. Respon sistem B-spline orde 3 dengan  $\alpha$  0,7

Tabel 4. Hasil pengujian laju konvergensi sistem B-spline orde 1

A (KP=0,04)	Bobot Awal	Parameter Respon Transien			
		tr (detik)	ts (detik)	Mp (%)	ess (%)
0,5	Nol	5,52	5,52	-	3,56
	Hasil Latih	5,28	5,28	-	3,56
0,6	Nol	4,91	4,91	-	2,86
	Hasil Latih	3,86	3,86	-	1,42
0,7	Nol	4,06	6,7	7,15	3,56
	Hasil Latih	3,25	5,69	7,15	3,56

Tabel 5. Hasil pengujian laju konvergensi sistem B-spline orde 2

$\alpha$ (KP=0,04)	Bobot Awal	Parameter Respon Transien			
		tr (detik)	ts (detik)	Mp (%)	ess (%)
0,5	Nol	6,2	6,2	-	3,56
	Hasil Latih	5,28	5,28	-	3,56
0,6	Nol	4,89	4,89	-	2,86
	Hasil Latih	3,86	3,86	-	2,86
0,7	Nol	3,77	7,62	7,15	2,86
	Hasil Latih	3,25	6,3	7,15	3,56

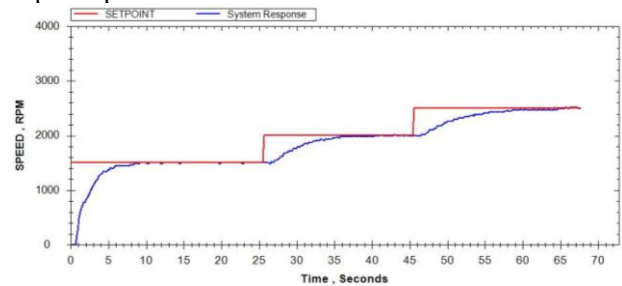
Tabel 6. Hasil pengujian laju konvergensi sistem B-spline orde 3

$\alpha$ (KP=0,2)	Bobot Awal	Parameter Respon Transien			
		tr (detik)	ts (detik)	Mp (%)	ess (%)
0,5	Nol	4,69	4,69	-	0,72
	Hasil Latih	3,66	4,69	-	1,42
0,6	Nol	4,52	4,52	-	0,72
	Hasil Latih	3,45	3,45	-	0,72
0,7	Nol	3,58	5,81	7,15	0,72
	Hasil Latih	2,64	5,48	7,15	3,56

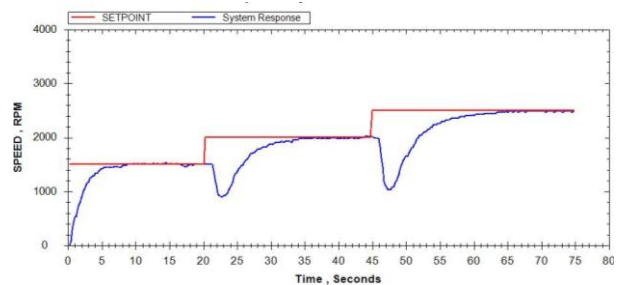
### 3.3. Pengujian Nilai Kecepatan Referensi Naik

Pengujian nilai kecepatan referensi naik dilakukan dengan menambah nilai kecepatan referensi. Kecepatan referensi akan ditambah ketika sistem telah mencapai kondisi tunak atau *steady state*. Kecepatan referensi yang akan diberikan mulai dari 1500 RPM yang akan dinaikkan menuju 2000 RPM dan kemudian akan dinaikkan lagi menuju kecepatan 2500 RPM. Pengujian dilakukan pada sistem B-spline orde 1, 2 dan 3 menggunakan metode pelatihan bobot awal nol dan metode bobot awal hasil latih. Pada pengujian referensi naik digunakan toleransi pembacaan respon transien sebesar 2%. Pada pengujian referensi naik sistem B-spline orde 1 digunakan nilai *gain* proporsional 0,04 dan laju konvergensi 0,6. Pada pengujian referensi naik sistem B-spline orde 2 digunakan nilai *gain* proporsional 0,04 dan laju konvergensi 0,6. Pada pengujian referensi naik sistem B-spline orde 3 digunakan nilai *gain* proporsional 0,2 dan laju konvergensi 0,6.

Hasil pengujian kecepatan referensi naik yang dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15 menunjukkan bahwa penggunaan bobot awal hasil latih pada pengujian nilai kecepatan referensi naik dapat meningkatkan unjuk kerja sistem. Hal ini dapat dilihat pada hasil pengujian referensi naik sistem B-spline yang ditunjukkan pada Tabel 7. Pada Tabel 7 terlihat bahwa peningkatan unjuk kerja sistem ditunjukkan oleh waktu penetapan (*ts*) sistem. Pada pengujian referensi naik, sistem B-spline orde 1, 2, 3 mengalami penurunan unjuk kerja sistem di tiap kecepatan referensi baru.



Gambar 14. Respon pengujian nilai kecepatan referensi naik sistem B-spline orde 1 dengan bobot awal nol



Gambar 15. Respon pengujian nilai kecepatan referensi naik sistem B-spline orde 1 dengan bobot awal hasil latih



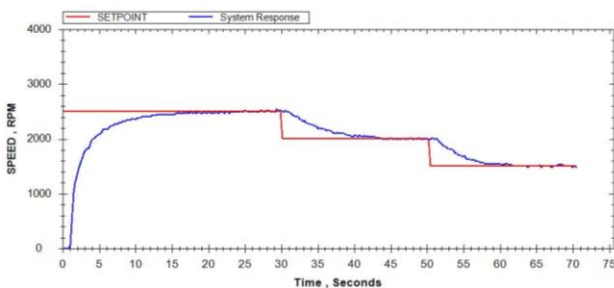
Tabel 7. Hasil pengujian nilai kecepatan referensi naik

Orde	Bobot Awal	Waktu Penetapan (detik)		
		1500 RPM	2000 RPM	2500 RPM
1	Nol	8,61	10,56	13,2
	Hasil Latih	8,33	14,22	18,62
2	Nol	8,61	10,72	13,61
	Hasil Latih	8,33	17,26	26,8
3	Nol	7,39	9,34	10,33
	Hasil Latih	7,11	10,33	15,42

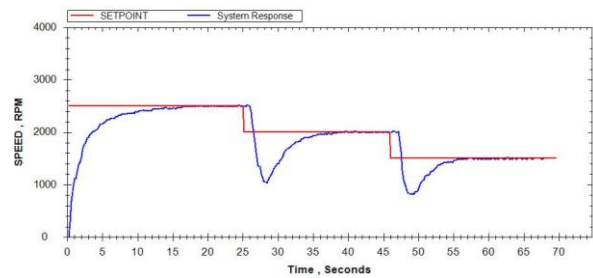
### 3.4. Pengujian Nilai Kecepatan Referensi Turun

Pengujian referensi turun dilakukan dengan memberikan nilai kecepatan referensi baru pada sistem. Kecepatan referensi akan dikurangi ketika sistem telah mencapai kondisi tunak atau *steady state*. Kecepatan referensi yang akan diberikan mulai dari 2500 RPM yang akan dikurangi menuju 2000 RPM dan kemudian akan dikurangi lagi menuju kecepatan 1500 RPM. Pengujian dilakukan pada sistem dengan orde 1, 2 dan 3 menggunakan metode pelatihan bobot awal nol dan metode bobot awal hasil latih. Pada pengujian referensi turun digunakan toleransi pembacaan tanggapan sebesar 2%. Pada pengujian referensi naik sistem B-spline orde 1 digunakan nilai *gain* proporsional 0,04 dan laju konvergensi 0,6. Pada pengujian referensi naik sistem B-spline orde 2 digunakan nilai *gain* proporsional 0,04 dan laju konvergensi 0,6. Pada pengujian referensi naik sistem B-spline orde 3 digunakan nilai *gain* proporsional 0,2 dan laju konvergensi 0,6.

Hasil pengujian kecepatan referensi turun yang dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17 menunjukkan bahwa penggunaan bobot awal hasil latih pada pengujian nilai kecepatan referensi turun dapat meningkatkan unjuk kerja sistem. Hal ini dapat dilihat pada hasil pengujian referensi turun sistem B-spline yang ditunjukkan pada Tabel 8. Pada Tabel 8 terlihat bahwa peningkatan unjuk kerja sistem ditunjukkan oleh waktu penetapan (*ts*) sistem. Pada pengujian referensi turun, sistem B-spline orde 1, 2, 3 mengalami peningkatan unjuk kerja sistem di tiap kecepatan referensi baru.



Gambar 16. Respon pengujian nilai kecepatan referensi turun sistem B-spline orde 3 dengan bobot awal nol



Gambar 17. Respon pengujian nilai kecepatan referensi turun sistem B-spline orde 3 dengan bobot awal hasil latih

Tabel 8. Hasil pengujian nilai kecepatan referensi turun

Orde	Bobot Awal	Waktu Penetapan (detik)		
		2500 RPM	2000 RPM	1500 RPM
1	Nol	18,3	13,61	12,74
	Hasil Latih	18,28	16,66	12,12
2	Nol	19,11	13,98	11,98
	Hasil Latih	18,89	22,95	25,73
3	Nol	16,09	11,98	10,97
	Hasil Latih	15,64	12,8	9,55

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh uji coba yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa respon transien pengontrolan kecepatan motor BLDC dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan B-spline bergantung pada pemilihan parameter kontroler seperti orde fungsi basis, *gain* proporsional dan laju konvergensi. Sistem B-spline orde 3 dengan nilai *gain* proporsional dan laju konvergensi yang tepat dapat menghasilkan respon transien yang lebih baik daripada sistem B-spline orde 2 dan orde 1. Pada penelitian ini dengan kecepatan referensi 1000 RPM didapatkan nilai *gain* proporsional yang baik untuk sistem B-spline orde 1 adalah 0,04, sistem B-spline orde 2 adalah 0,04 dan sistem B-spline orde 3 adalah 0,2 sedangkan nilai laju konvergensi yang baik untuk B-spline orde 1, 2 dan 3 adalah 0,6. Penggunaan bobot awal berupa bobot hasil latih dapat meningkatkan unjuk kerja sistem, tetapi penggunaan bobot latih berikutnya kurang menunjukkan peningkatan.

## Referensi

- [1]. Z. Li, "CMAC Neural Networks Based Combining Control for BLDC Motor," *IEEE Xplore*, 2009.
- [2]. N. Leena and R. Shanmugasundaram, "Artificial neural network controller for improved performance of brushless DC motor," *IEEE Xplore*, 2014.
- [3]. I. Setiawan, H. Miyauchi, and S. Member, "Adaptive B-Spline Neural Network-Based Vector Control for a Grid Side Converter in Wind Turbine-DFIG Systems," 2015.
- [4]. K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Fifth Edit. United State of America: Pretience Hall, 2010.
- [5]. M. Brown and C. Harris, *Neurofuzzy Adaptive Modelling And Control*. Hertfordshire: Pretince Hall International (UK) Limited, 1994.
- [6]. S. Haykin, *Neural Networks- A Comprehensive Foundation*. Macmillan Colege-Publishing Company Inc, 1994.