

Desain Kendali Cerdas pada Turbin Angin

I Nyoman Kusuma Wardana
Program Studi Sistem Komputer
STMIK STIKOM Bali
Denpasar, Indonesia
kusumawardana@stikom-bali.ac.id

Abstrak—Turbin angin yang dipasang dengan konfigurasi *variable-speed* dianggap mampu memperbaiki kinerja dari turbin *fixed-speed*. Dengan menggunakan konfigurasi *variable-speed*, turbin dapat beradaptasi secara kontinu untuk bekerja pada efisiensi aerodinamik tertinggi. Salah satu metode yang digunakan pada sistem *variable-speed* adalah dengan mengatur besarnya sudut *pitch* baling-baling turbin. Melalui penelitian ini, diciptakan sebuah model turbin bertipe *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT). Jaringan saraf tiruan (JST) dengan algoritma pelatihan *backpropagation* ditanam pada sebuah mikrokontroler sebagai algoritma kendali. JST berarsitektur 2-10-1 memiliki fungsi transfer *tansig* pada lapisan tersembunyi, dan fungsi *purelin* pada lapisan output. Input JST adalah galat (*error*) dan posisi sudut, sedangkan outputnya adalah sudut *pitch* yang diinginkan. Motor servo digunakan sebagai aktuator, yang dapat menggerakkan sudut *pitch* antara 20 sampai 60 derajat. Respon sistem hasil *fitting* terhadap hasil percobaan menunjukkan nilai persen *overshoot* (%OS) yang lebih besar dari desain yang ditetapkan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, nilai %OS mencapai 66,67, sedangkan desain kontrol hanya 33,33. Nilai *rise time* (T_r) sebesar 5,46% masih memenuhi kriteria desain yaitu sebesar 10 detik, namun nilai *settling time* (T_s) sebesar 138 detik melebihi kriteria desain yaitu sebesar 20 detik.

Kata kunci—mikrokontroler; jaringan saraf tiruan; sudut *pitch*; kontrol turbin angin; *variable-speed*.

I. PENDAHULUAN

Pada awal perkembangannya, turbin angin umumnya dipasang dengan konfigurasi *fixed-speed*. Pada kenyataannya, pemanfaatan energi angin menggunakan konfigurasi ini menjadi tidak optimal [1]. Namun, masalah ini dapat dikurangi dengan menerapkan turbin bersistem *variable-speed*. Salah satu metode yang digunakan pada sistem *variable-speed* adalah dengan mengatur besarnya sudut *pitch* baling-baling turbin [2].

Sistem kontrol konvensional yang biasa digunakan dalam sistem kontrol *pitch* adalah PID (*Proportional-Integral-Derivative*). Kelemahan utama yang dihadapi ketika menggunakan PID adalah pencarian nilai-nilai penguatan K_p , K_i dan K_d yang dilakukan secara *trial-and-error*, serta sistem kontrol yang bersifat linier. Sistem kontrol cerdas seperti jaringan saraf tiruan (JST) mulai dikembangkan karena kemampuannya untuk mengenali pola-pola yang bersifat

nonlinear. Selain sebagai sistem kontrol, JST juga dapat digunakan untuk identifikasi dan prediksi sistem [3].

Kemampuan JST telah dimanfaatkan pada berbagai bidang, misalnya untuk memprediksi sifat-sifat aerodinamik angin seperti sudut *attack*, *lift force coefficient*, *dynamic pressure*, dan sebagainya [3]. Untuk ladang angin berskala besar, JST juga digunakan untuk memprediksi kedatangan angin ribut ataupun badai [4]. Tujuan utama penelitian ini adalah penerapan JST untuk mengontrol sudut *pitch* pada suatu model kincir angin dengan memanfaatkan kemampuan mikrokontroler. Dengan mempertimbangkan kemampuan teknis serta finansial, mikrokontroler dapat menjadi pilihan utama untuk desain sistem kontrol turbin angin untuk skala laboratorium [5].

II. DESAIN PENELITIAN

A. Strategi Kontrol

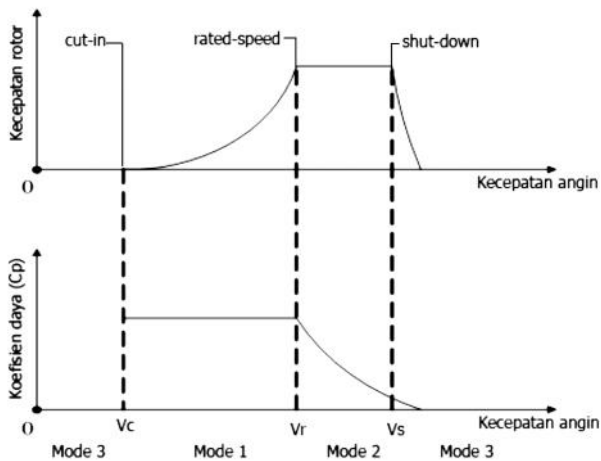
Merujuk pada [2] dan [6], terdapat dua variabel yang penting diperhatikan, yaitu daya elektrik yang dihasilkan turbin dan kecepatan putar rotor. Pada umumnya, fluktuasi keluaran elektrik harus sekecil mungkin. Permintaan ini sangat mudah dicapai karena pada rentang yang tepat, daya yang dikonversi menjadi listrik dapat terkontrol oleh rangkaian elektronika daya sehingga output keluaran dapat dijaga konstan.

1) Pada angin berkecepatan rendah sampai sedang

Idealnya, kincir angin harus bekerja pada nilai efisiensi maksimum disegala kondisi. Pada angin dengan kecepatan lebih kecil dari batas *rate-power* generator, turbin harus bekerja pada efisiensi maksimum. Sudut *pitch* harus dikondisikan agar mencapai keadaan ini. Mode 1 (daerah antara V_c dan V_r) pada Gambar 1 memperlihatkan kondisi ini.

2) Pada angin berkecepatan tinggi

Seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, maka daya yang dihasilkan oleh kincir juga akan meningkat, sampai mencapai batas ketika konverter akan mengeluarkan daya konstan. Mode 2 (daerah antara V_r dan V_s) pada Gambar 1 memperlihatkan keadaan ini. Strategi pada mode ini adalah dengan mengatur sudut *pitch* sehingga turbin bekerja dengan efisiensi yang lebih rendah. Kecepatan putar rotor dapat dipertahankan konstan, walaupun angin berfluktuasi disepanjang daerah mode 2.

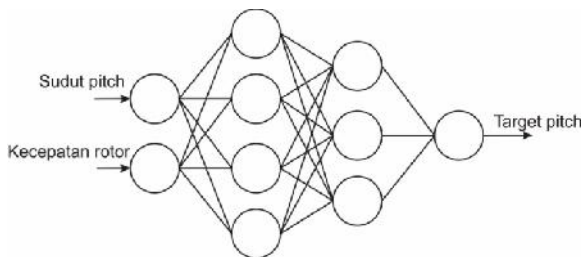


Gambar 1. Strategi Kontrol Turbin Angin

B. Perancangan Jaringan Saraf Tiruan

Penelitian ini akan mencoba menerapkan JST dengan algoritma pembelajaran *backpropagation* untuk mengontrol putaran turbin agar sesuai yang diinginkan. Jaringan saraf tiruan perlu dilatih untuk mengenali sejumlah data yang dimasukkan. Proses pelatihan sangat penting untuk memberikan kecerdasan kepada JST [5][7][8]. Kecerdasan ini berupa nilai bobot dan bias. Bobot dan bias yang tepat di masing-masing neuron akan menghasilkan output yang diinginkan. Nilai bobot dan bias inilah yang sebenarnya akan dimasukkan ke mikrokontroler. Penelitian ini menggunakan MATLAB untuk melatih dan mencari parameter belajar, sehingga didapatkan bobot-bobot yang tepat. Mikrokontroler yang digunakan adalah seri ATmega32 dari keluarga AVR Atmel dan diprogram menggunakan bahasa C.

Input untuk JST yang penulis rancang adalah galat (*error*) sudut dan posisi aktual *pitch*, sedangkan targetnya adalah sudut *pitch* yang diinginkan[6]. Ilustrasi untuk input dan output jaringan diperlihatkan pada Gambar 2.

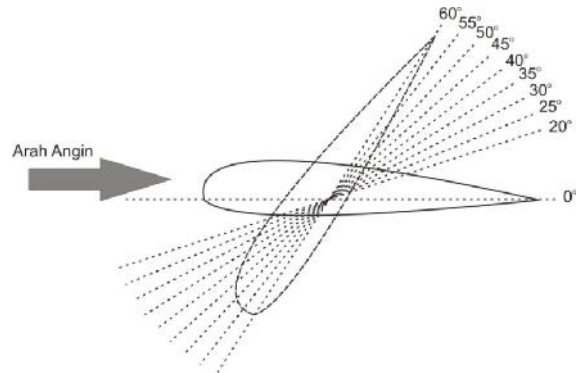


Gambar 2. Ilustrasi Pasangan Input-Output JST

C. Pengambilan dan Pengolahan Data

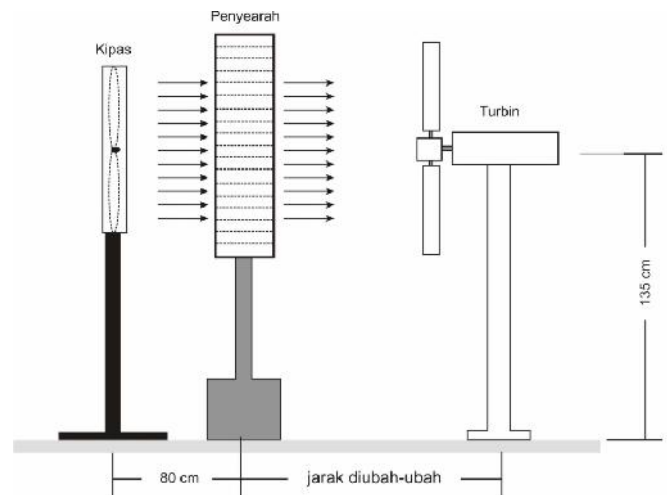
Besarnya sudut *pitch* akan berpengaruh terhadap jumlah putaran turbin. Besarnya sudut *pitch* daun turbin diatur untuk setiap variasi kecepatan untuk memperoleh dinamika respon turbin. Penelitian ini menerapkan sembilan variasi sudut,

yaitu 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55° dan 60°. Pengaturan ini dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaturan Sudut Daun Turbin

Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer. Kipas, penyearah angin, serta turbin diletakkan berurutan dan diatur agar berada pada sumbu pusat yang sama. Kipas yang digunakan pada penelitian ini memiliki 3 mode kecepatan (kecepatan tinggi, sedang dan rendah). Oleh karena itu, pada satu posisi, turbin dapat memperoleh 3 variasi kecepatan. Agar diperoleh variasi kecepatan angin yang lebih banyak, maka posisi turbin dapat digeser menjauh atau mendekati kipas, seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Penempatan Kipas, Penyearah dan Turbin

Terdapat beberapa proses pengolahan data yang dilakukan agar tujuan penelitian ini dapat dipenuhi. Pengolahan tersebut mencakup pemilihan dan normalisasi data yang akan digunakan sebagai pasangan input dan target JST. Pemilihan pasangan input dan target dilakukan dengan mencari nilai-nilai kecepatan putar turbin yang mendekati nilai 60 rotasi per menit (RPM). Nilai 60 RPM ini ditentukan oleh penulis sebagai target pengendalian. Dengan mengetahui sudut-sudut berapa yang menghasilkan kecepatan 60 RPM (atau mendekati), maka kita dapat mendesain kontrol jaringan saraf tiruan. Asumsi awal penulis adalah sangat sulit memperoleh nilai yang tepat sebesar 60 RPM. Namun demikian, diusahakan untuk

merancang kontroler yang mampu mengontrol dengan menghasilkan nilai galat yang sekecil mungkin.

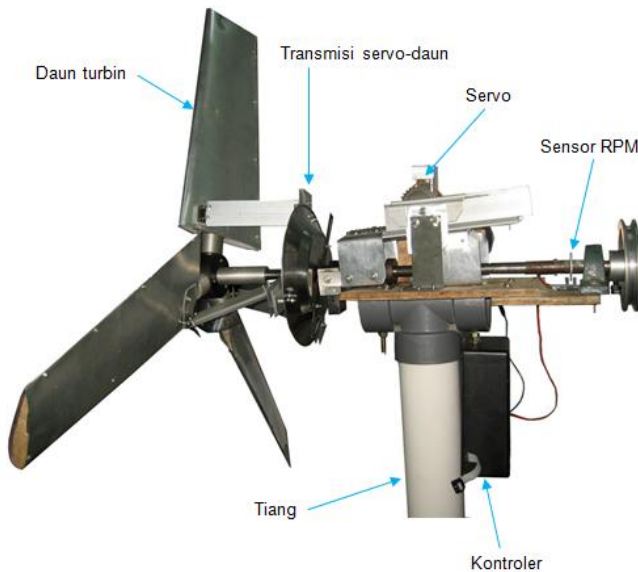
D. Kriteria Pengontrolan

Kriteria kontrol adalah tahap untuk menentukan sifat-sifat output yang diinginkan. Tahap ini menjadi penting untuk mengevaluasi apakah suatu kontroler memenuhi kriteria yang dibutuhkan atau tidak. Terdapat beberapa parameter yang dipertimbangkan dalam merancang kontroler, yaitu besarnya persen overshoot (%OS), rise time (T_r), settling time (T_s), dan juga keadaan ajeg yang diinginkan [9]. Pada penelitian ini, penulis mencoba menetapkan bahwa %OS tidak lebih dari 33,3 %. Keadaan ini mengindikasikan bahwa nilai overshoot tidak lebih dari 80 RPM. Nilai T_r ditetapkan 10 detik dan T_s 20 detik. Kriteria ini dipilih agar putaran turbin tidak terlalu lama dalam keadaan yang tidak sesuai dengan target.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Model Turbin

Model turbin yang dihasilkan pada penelitian ini adalah turbin tipe horizontal axis wind turbine (HAWT) dengan sudut pitch yang dapat dikontrol, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Model turbin angin yang dihasilkan memiliki dimensi diameter baling-baling sebesar 94 cm dan tinggi 135 cm. Secara keseluruhan, model turbin dapat bekerja untuk memenuhi tujuan penelitian.



Gambar 5. Model Turbin Tampak Samping

B. Pengolahan Data untuk JST

Ilustrasi skema pengamatan RPM turbin ditunjukkan pada Tabel I. Pada kode kecepatan 280:2 (jarak turbin 280 cm terhadap kipas dan kipas berputar pada mode 2), kecepatan putar yang paling mendekati 60 RPM misalnya berada pada kecepatan v_3 . Kondisi ini dipenuhi ketika turbin berada pada posisi sudut pitch 30°. Jika pada suatu keadaan turbin berputar v_8 RPM pada sudut 60°, maka JST harus mampu mengenali

kondisi ini dan membawa pitch ke sudut 30° lagi, sehingga turbin dapat berputar 60 RPM. Sistem ini berlaku untuk semua data pada kode posisi lainnya.

TABEL I ILUSTRASI SKEMA PENGAMATAN RPM TURBIN

| No | V_angin (m/s) | Kode posisi | RPM (tanpa beban) | | | | | | | | |
|----|---------------|-------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 55° | 60° |
| 1 | v_a | 280:2 | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 | v_6 | v_7 | v_8 | v_9 |

Berdasarkan ilustrasi pada Tabel I, data selengkapnya dari percobaan laboratorium ditunjukkan pada Tabel II. Pada saat pelatihan, pasangan input dan target dinormalisasi agar JST dapat berlatih secara efisien. Sudut putar akan dinormalisasi menjadi antara 1 sampai 9 (20 dinormalisasi menjadi 1, 25 dinormalisasi menjadi 2, dan seterusnya sampai 60 dinormalisasi menjadi 9). Normalisasi galat dilakukan dengan membagi nilai galat dengan 10.

TABEL II DATA PELATIHAN JST

| No | V_angin (m/s) | Kode posisi | RPM (tanpa beban) | | | | | | | | |
|----|---------------|-------------|-------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 20° | 25° | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 55° | 60° |
| 1 | 1.597 | 140:1 | 25 | 37.5 | 40 | 47.5 | 50 | 57.5 | 62.5 | 67.5 | 62.5 |
| 2 | 1.637 | 380:1 | 37.5 | 40 | 47.5 | 60 | 72.5 | 75 | 82.5 | 87.5 | 52.5 |
| 3 | 1.696 | 280:1 | 12.5 | 15 | 50 | 52.5 | 60 | 65 | 77.5 | 80 | 57.5 |
| 4 | 2.075 | 280:2 | 32.5 | 35 | 67.5 | 70 | 85 | 97.5 | 112.5 | 122.5 | 117.5 |
| 5 | 2.196 | 140:2 | 37.5 | 47.5 | 55 | 65 | 75 | 80 | 85 | 100 | 97.5 |
| 6 | 2.259 | 280:3 | 47.5 | 50 | 80 | 82.5 | 100 | 117.5 | 132.5 | 150 | 210 |
| 7 | 2.344 | 380:2 | 52.5 | 55 | 67.5 | 82.5 | 92.5 | 100 | 127.5 | 137.5 | 145 |
| 8 | 2.494 | 460:1 | 35 | 40 | 40 | 47.5 | 50 | 57.5 | 67.5 | 70 | 50 |
| 9 | 2.605 | 140:3 | 45 | 57.5 | 62.5 | 75 | 85 | 97.5 | 105 | 120 | 110 |
| 10 | 2.621 | 380:3 | 62.5 | 65 | 85 | 92.5 | 105 | 115 | 145 | 170 | 187.5 |
| 11 | 2.993 | 460:2 | 50 | 55 | 55 | 65 | 72.5 | 85 | 105 | 110 | 105 |
| 12 | 3.669 | 460:3 | 60 | 62.5 | 65 | 75 | 85 | 102.5 | 125 | 130 | 150 |

C. Pelatihan dan Pemilihan JST

Proses pelatihan adalah tahapan yang menentukan kecerdasan suatu jaringan saraf. Sebelum dilatih, parameter-parameter pelatihan seperti arsitektur JST, momentum, kecepatan belajar (learning rate), maksimal epoch dan target galat harus ditetapkan terlebih dahulu. Kecepatan belajar sangat berperan penting dalam proses pelatihan. Kecepatan belajar yang terlalu tinggi akan menyebabkan algoritma berosilasi dan menjadi tidak stabil, sedangkan jika terlalu kecil maka pelatihan akan terlalu lama untuk mencapai konvergensi. Menjadi tidak praktis untuk menentukan kecepatan belajar sebelum pelatihan, karena pada kenyataannya parameter optimal berubah ketika pelatihan sedang berlangsung [8]. Oleh karena itu, penulis memanfaatkan fungsi *traingdx* pada MATLAB selama pelatihan.

Dengan menggunakan metode pelatihan *traingdx*, kecepatan belajar selama proses pelatihan akan berubah secara otomatis. Terdapat beberapa parameter yang bisa digunakan untuk menghentikan proses pembelajaran, diantaranya adalah target galat dan jumlah epoch yang diinginkan. Pada penelitian ini, nilai 1000 epoch digunakan sebagai batas untuk mengakhiri pelatihan.

Pada penelitian ini, dihasilkan jaringan saraf berarsitektur 2-10-1 sebagai jaringan terbaik yang mampu mengenali pola-pola pelatihan. Tingkat pengenalan diperoleh melalui regresi linear antara hasil pelatihan dan data target. Kode 2-10-1

berarti jaringan yang dibentuk memiliki dua neuron input, satu buah lapisan tersembunyi dengan sepuluh neuron, dan satu lapisan output dengan satu neuron. Fungsi transfer pada lapisan tersembunyi adalah sigmoid bipolar (*tansig*), dan fungsi transfer lapisan tersembunyi adalah linear (*purelin*). Penggunaan fungsi *tansig* pada lapisan tersembunyi akan memetakan output antara nilai -1 sampai 1. Sedangkan fungsi *purelin* akan memetakan output sesuai dengan inputnya.

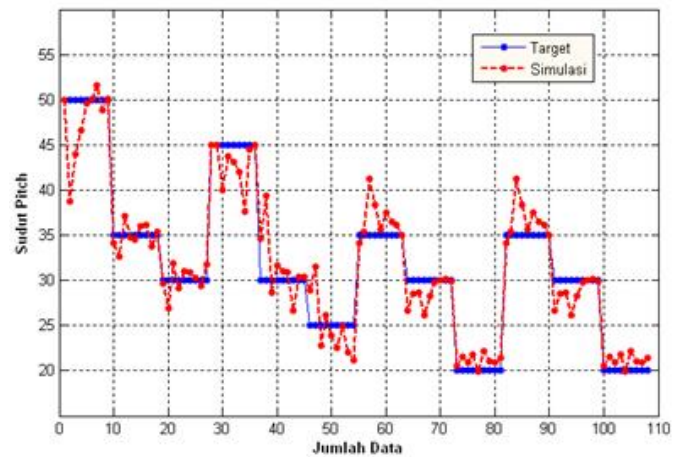
Nilai-nilai bobot dan bias yang diperoleh setelah pelatihan akan diunggah ke mikrokontroler. Pada mikrokontroler, proses yang dilakukan hanya merambatkan sinyal input ke depan (perambatan maju) melalui bobot-bobot dan bias-bias yang diperoleh setelah proses pelatihan JST. Komputasi hanya dilakukan satu arah, tidak seperti saat pelatihan yang harus dua arah (karena harus mencapai target yang diinginkan). Disinilah peran MATLAB yang sangat berguna untuk melatih jaringan, karena prosesnya cepat dan banyak pilihan metode untuk membentuk dan melatih jaringan. Dengan demikian, tugas mikrokontroler menjadi ringan. Tabel III menunjukkan besarnya bobot dan bias yang dimasukkan pada mikrokontroler.

TABEL III. NILAI BOBOT DAN BIAS AKHIR JST

| No | Bobot Input 1 ke lapisan tersembunyi | Bobot Input 2 ke lapisan tersembunyi | Bobot Lapisan tersembunyi ke lapisan output | Bias 1 ke lapisan tersembunyi | Bias 2 ke lapisan output |
|----|--------------------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------|--------------------------|
| 1 | -14,5958 | -5,8267 | -0,7592 | 67,2796 | 3,3627 |
| 2 | -2,5766 | -2,4064 | 2,6061 | 16,3479 | - |
| 3 | -0,3181 | -0,7279 | -9,3024 | -2,7247 | - |
| 4 | -0,2868 | -0,8971 | 8,5676 | -3,9898 | - |
| 5 | -0,0529 | 0,5889 | 2,1476 | 0,1656 | - |
| 6 | 6,7217 | 0,1297 | 0,9013 | -17,2893 | - |
| 7 | -1,4269 | -0,1276 | -1,6405 | 4,9927 | - |
| 8 | 7,2939 | 4,5782 | 0,705 | -3,9291 | - |
| 9 | -18,5593 | 24,8904 | 0,276 | -5,8026 | - |
| 10 | -10,9886 | 7,6336 | 2,5429 | -4,5653 | - |

D. Pengujian Laboratorium

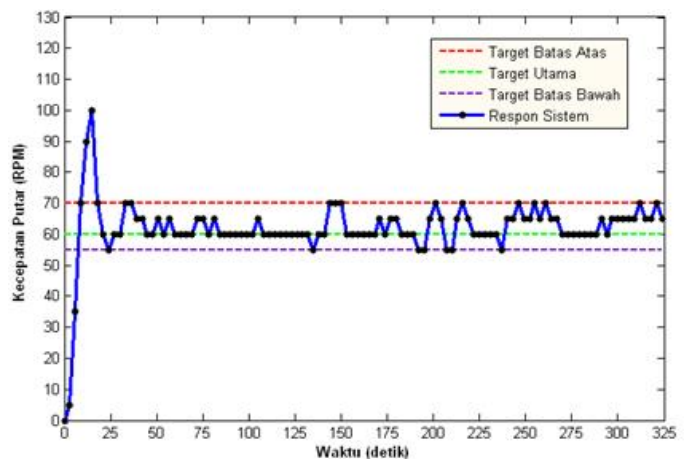
Berdasarkan hasil simulasi, nilai-nilai output JST tidak sepenuhnya mencapai target yang diinginkan. Namun demikian, titik-titik hasil simulasi pada umumnya telah mengikuti tren target. Hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Simulasi Pelatihan JST

Pada Gambar 6, terlihat bahwa JST tidak sepenuhnya mencapai target yang diinginkan. Namun demikian, hasil ini adalah hasil terbaik yang penulis dapatkan, dengan tingkat pengenalan sebesar 0,9512 (nilai 1 menunjukkan pengenalan yang sempurna). Tingkat pengenalan JST ini selanjutnya akan penulis ujikan di laboratorium.

Setelah nilai bobot dan bias diprogram ke dalam mikrokontroler, maka langkah selanjutnya adalah menguji kontroler dengan melakukan serangkaian percobaan di laboratorium. Percobaan awal dilakukan dengan menempatkan turbin dengan jarak tertentu dari kipas. Turbin dalam keadaan awal belum berputar. Jarak yang dipilih sebaiknya tidak berada pada jarak ketika dilakukan pengambilan data. Hal ini dilakukan untuk melihat kepekaan sistem. Dalam pengujian ini, dipilih jarak 90 cm terhadap kipas, dan kipas diputar pada mode 3 (selanjutnya ditulis 90:3). Percobaan kedua pada jarak 340 cm dengan kecepatan kipas pada mode 3 (340:3). Hasil pengujian turbin pada jarak 90 cm terhadap kipas diperlihatkan pada Gambar 7.



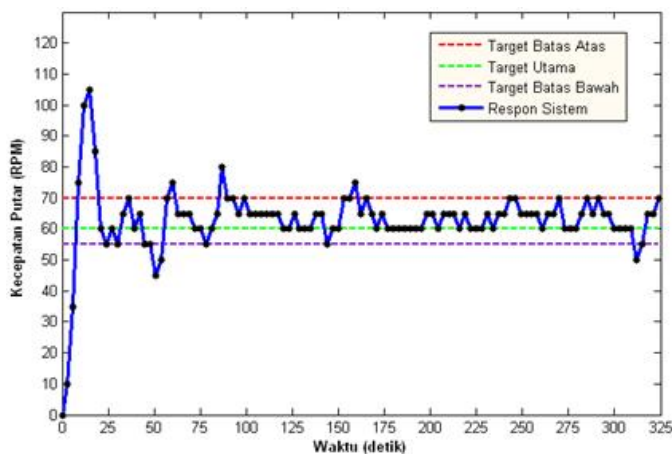
Gambar 7. Pengujian pada posisi 90:3

Pengujian yang dilakukan selama 324 detik menunjukkan bahwa kontroler berusaha bekerja agar target 60 RPM bisa

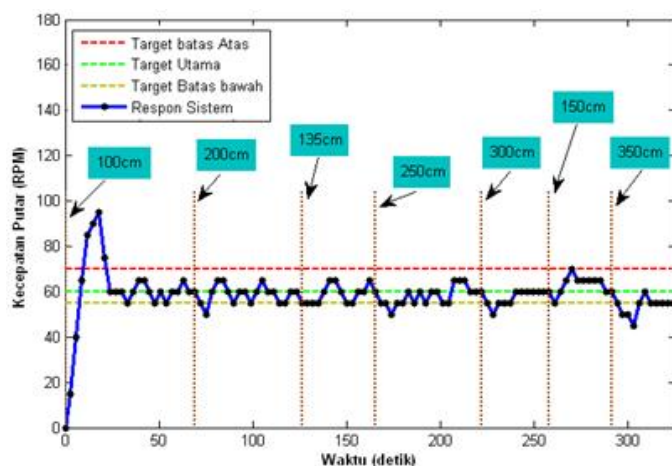
tercapai. Pada penelitian ini, sistem kontrol di-update setiap 3 detik. Pada Gambar 7, Nilai overshoot maksimal mencapai 100 RPM pada sampling data ke lima (15 detik). Angka 60 RPM telah dicapai pada ketujuh (21 detik), namun selanjutnya mengalami fluktuasi. Fluktuasi masih terjadi disekitar garis target.

Hasil pengontrolan lain ditunjukkan pada Gambar 8. Pada keadaan ini, turbin diposisikan pada jarak 340 cm dari kipas yang berputar pada mode 3 (kode posisi 340:3). Hampir sama seperti pada yang ditunjukkan pada Gambar 7, besarnya overshoot maksimal pada percobaan ini mencapai 105 RPM pada detik ke-15, dan berfluktuasi setelah detik ke-21.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mengubah jarak turbin terhadap kipas, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Bagian bawah turbin diberikan papan yang dilengkapi roda sehingga turbin dapat digerakkan maju dan mundur di depan turbin secara acak. Karena keterbatasan ruang pada laboratorium, turbin hanya bisa digerakkan pada jarak maksimal 460 cm terhadap kipas. Gerakan maju dan mundur dilakukan secara bebas untuk mendapatkan respon dinamik dari pengontrol. Hasil pengujian diperlihatkan pada Gambar 4.6. Maksimal overshoot mencapai 95 RPM, dan mulai berfluktuasi pada detik ke-30.



Gambar 8. Pengujian pada posisi 340:3

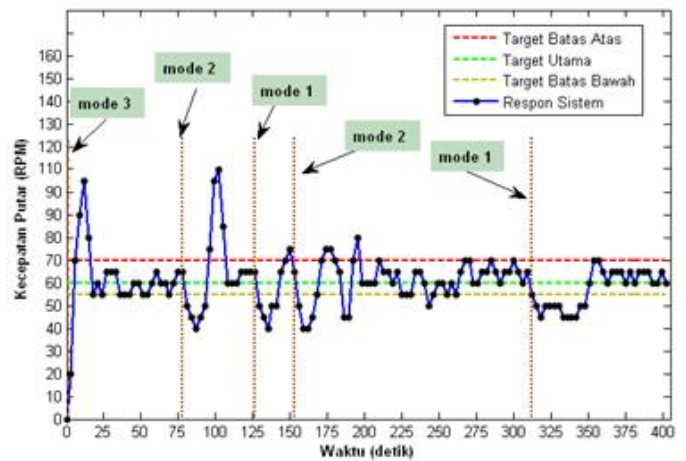


Gambar 9. Pengujian dengan Variasi Jarak Secara Acak

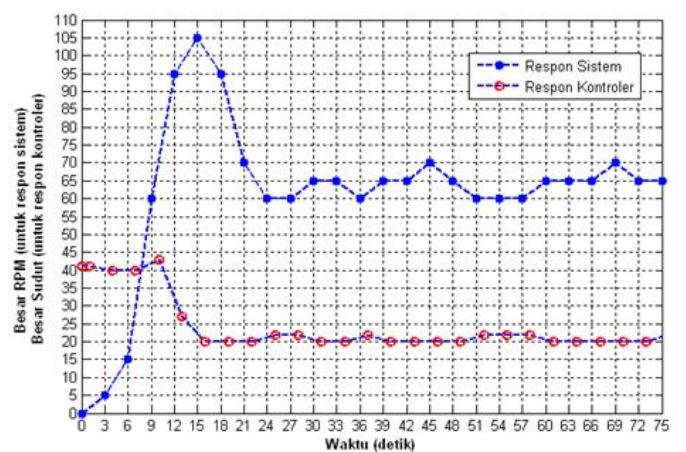
Percobaan terakhir dilakukan dengan menempatkan kipas pada posisi tetap (160 cm terhadap kipas), namun mode kecepatan kipas yang diubah-ubah. Hasil percobaan ini menunjukkan fluktuasi yang lebih beragam daripada percobaan yang dilakukan sebelumnya. Hasil percobaan diperlihatkan pada Gambar. 10.

E. Respon Kontroler

JST memberikan sinyal input kepada aktuator berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan. Gambar 11 memperlihatkan turbin dipasang pada keadaan lain posisi 90:3 selama 75 detik. Terlihat bahwa output JST akan bervariasi sesuai dengan pola input yang diberikan. Ketika set point telah tercapai, maka kontroler akan memberikan input yang sama seperti output sebelumnya, dan mulai berubah ketika kecepatan putar tidak sesuai target.



Gambar 10. Pengujian dengan Variasi Kecepatan secara Acak



Gambar 11. Respon Kontroler pada Keadaan Lain di Posisi 90:3

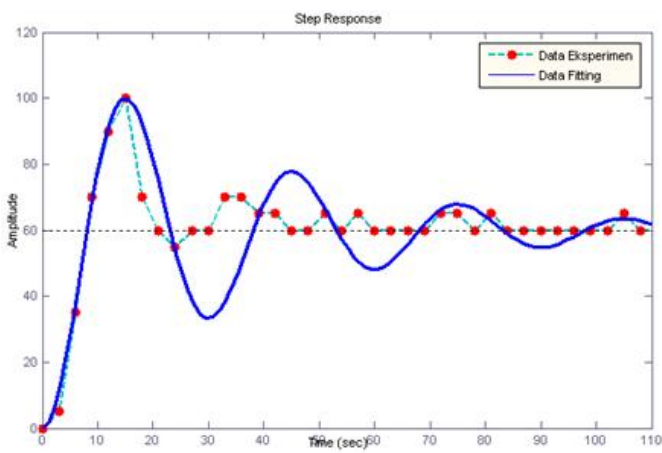
F. Karakteristik Sistem Kontrol

Untuk mengetahui karakteristik pengontrol, penulis melakukan identifikasi terhadap tanggapan sistem. Tanggapan sistem pada percobaan ini didekati dengan persamaan orde

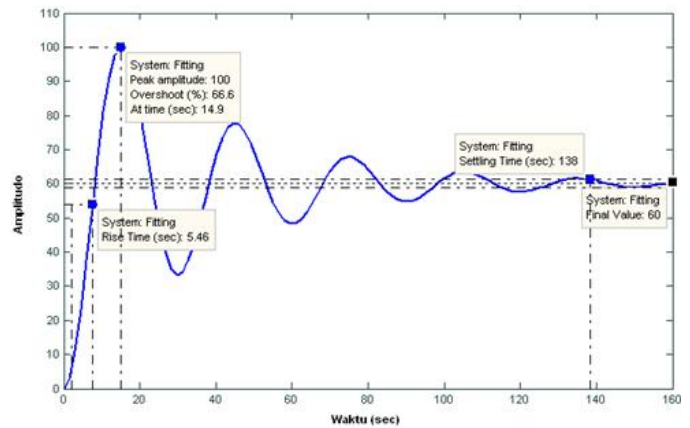
dua. Oleh karena respon sistem terlihat berfluktuasi, maka penulis melakukan *fitting* terhadap tanggapan sistem agar dapat diperoleh karakteristiknya.

Dua parameter penting yang harus diketahui untuk membentuk fungsi transfer sistem adalah nilai rasio redaman (*damping ratio*, ζ) dan nilai frekuensi natural (*natural frequency*, ω_n). Parameter yang dapat teramati secara langsung pada respon sistem dapat digunakan untuk mencari kedua nilai tersebut. Beberapa parameter yang dapat diketahui secara langsung adalah waktu puncak (*peak time*, T_p), dan nilai maksimum *overshoot* yang dilakukan sistem. Untuk mengetahui respon sistem, penulis mengambil salah satu tanggapan sistem, yaitu Gambar 7, yaitu pada posisi 90:3. Plot sistem terhadap data percobaan diperlihatkan pada Gambar 12. Grafik fitting yang dibentuk mewakili data yang diperoleh melalui eksperimen dengan pendekatan sistem orde dua. Selanjutnya, dengan menggunakan persamaan *fitting* kita dapat melakukan karakterisasi sifat-sifat sistem dalam tanggapan waktu.

Gambar 13 memperlihatkan bahwa respon berorde dua dengan jenis *underdamped*. Hal ini dikarenakan pole-pole sistem memiliki komponen nilai riil dan imajiner. Berdasarkan Gambar 13, diperoleh karakteristik untuk sistem kontrol yang telah dibentuk. Besarnya nilai puncak (c_{max}) adalah 100 pada detik ke-15 dan %OS sebesar 66,6667. *Rise time* sebesar 5,46 dan mencapai keadaan *settle* pada detik ke 138. Perlu dicatat bahwa kurva ini adalah hasil fitting untuk mencari pendekatan terhadap data hasil percobaan.



Gambar 12. Fitting Grafik Hasil Percobaan pada Kode Posisi 90:3



Gambar 13. Respon *Underdamped* dan Analisis Waktu

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mencoba menerapkan algoritma Jaringan Saraf Tiruan untuk mengontrol sudut *pitch* pada turbin angin berbasis mikrokontroler. Untuk JST, tahap pelatihan merupakan proses yang menentukan kecerdasan suatu JST. Proses pelatihan ini sangat terkait erat dengan data yang dilatih, arsitektur jaringan, fungsi transfer, serta parameter lainnya. Oleh karena itu, pemilihan parameter-parameter ini penting untuk diperhatikan pada penelitian selanjutnya. Berdasarkan hasil percobaan, beberapa parameter kontrol tidak memenuhi target. Namun demikian, pemanfaatan mikrokontroler sebagai kendali cerdas dapat menjadi alternatif untuk kontrol yang bersifat nonlinier.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adzic, E., Ivanovic, Z., Adzic, M., Katic, V., "Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control," Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 6, No. 1, 2009.
- [2] Muljadi, E., and Butterfield, C.P., "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation," The 1999 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Arizona, October 3-7, 1999.
- [3] Malmathanraj, R., dan Thamaraj, S. S., "Prediction of Aerodynamic Characteristics Using Neural Networks," Asian Journal of Information Technology 7(1), 19-26. ISSN: 1682-3915. Medwell Journals.2008.
- [4] Spudic, V., Maric, M., dan Peric, N., "Neural Networks Based Prediction of Wind Gusts," Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, Croatia, 2008.
- [5] Kusuma, W., "Penerapan Jaringan Saraf Tiruan Sebagai Sistem Kontrol Sudut Pitch pada Turbin Angin," Tesis S2, Magister Sistem Teknik UGM. Yogyakarta, 2010.
- [6] Wu, Dingguo dan Wang, Zhixin, "Modeling and Design of Control System for Variable Speed Wind Turbine in All Operating Region," International Journal of Systems Applications, Engineering and Development, Issue 3 Volume 1, page 62-68, 2007.
- [7] Kusuma, W. "Identifikasi Intonasi Ucapan Bahasa Indonesia untuk Sistem Monitoring dan Pengendalian Perangkat Listrik Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan" Skripsi S1, Jurusan Teknik Fisika UGM. Yogyakarta, 2008.
- [8] Demuth, H., Beale, M., Hagan, M., "Neural network Toolbox 6 User's Guide". The Matwork, Inc., USA, 2010.
- [9] Nise, Norman S., "Control Systems Engineering sixth edition", John Wiley and Sons, Inc, 2011.